

Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal
Fachgebiet Abfall- und Siedlungswasserwirtschaft



**Abschätzung der Restemissionen von Deponien in der
Betriebs- und Nachsorgephase auf der Basis realer
Überwachungsdaten**

Abschlußbericht

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und
Forschung gefördert

Förderkennzeichen : 1471067

Projektträger: Abfallwirtschaft und Altlastensanierung im Umweltbundesamt

Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Ehrig

Bearbeitung: Dipl.-Biol. Inge Krümpelbeck

Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Abfall- und Siedlungswasserwirtschaft
Pauluskirchstr. 7
42285 Wuppertal

Wuppertal, im Mai 1999

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	UNTERSUCHUNGSMETHODIK UND CHARAKTERISIERUNG DER UNTERSUCHUNGSOBJEKTE	3
2.1	Charakterisierung der Abfalldeponien	10
2.2	Graphische Gegenüberstellung einiger Deponiekenndaten	15
2.3	Prozesse im Deponiekörper	17
2.4	Anmerkungen zur Datenerhebung und Dokumentation von Betriebsdaten	18
3	DARSTELLUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE	20
3.1	Sickerwasserqualität	20
3.1.1	Darstellung von Sickerwasserkonzentrationsverläufen einzelner Deponien	29
3.1.1.1	D7 (Gruppe 1)	31
3.1.1.2	D1 (Gruppe 2)	33
3.1.1.3	NRW-Deponie A (Gruppe 2)	36
3.1.1.4	D34 (Gruppe 3)	38
3.1.1.5	D35 (Gruppe 4)	41
3.1.1.6	D8II (Gruppe 5)	43
3.1.1.7	Gegenüberstellung der vorgestellten Gruppen	45
3.1.2	Sickerwasserparameter Arsen, PAK und PCB	46
3.2	Sickerwasserquantität und Oberflächenabdeckung	48
3.2.1	Beispiele für die Oberflächenabdeckungen und -dichtungen der Deponien	54
3.3	Sickerwasserfrachten	61
3.4	Gasanalysen	67
3.4.1	Gasanalysen der Deponie D1	67
3.4.2	Hauptbestandteile des Deponiegases	70
3.4.3	Vergleich der Konzentrationen von Spurenstoffen im Deponiegas	73
3.4.4	CKW- und FCKW-Konzentrationen	75
3.5	Gasmenge	77
3.6	Setzungen	81

4	EXTRAPOLATIONEN	86
4.1	Sickerwasserparameter und Grenzwerte	86
4.1.1	Extrapolation des Parameters CSB	87
4.1.2	AOX-Extrapolationen	90
4.1.3	Extrapolation des Parameters Stickstoff gesamt	91
4.1.4	Extrapolationen des Parameters Chlorid	91
4.1.5	Extrapolationen der Schwermetalle im Sickerwasser	92
4.1.6	Abschätzung der Nachsorgedauer anhand verschiedener Parameter	93
4.2	Prognose der Gasmengen	94
5	ZUSAMMENFASSUNG	97
5.1	Sickerwasserqualität	97
5.2	Sickerwassermenge und Oberflächenabdichtung	99
5.3	Gasmenge	100
6	EMPFEHLUNGEN FÜR DEN LANGFRISTIGEN UMGANG MIT DEPONIEEN, DIE MIT UNVORBEHANDELTEM ABFALL VERFÜLLT WORDEN SIND	101
7	LITERATURVERZEICHNIS	105

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Anzahl der Sickerwasseranalysen pro Parameter der alten Bundesländer außer NRW	6
Abb. 2: Anzahl der Sickerwasseranalysen pro Parameter der NRW-Deponien, Parameteranzahl wurde im Rahmen der LUA Studie beschränkt	7
Abb. 3: Anzahl der Deponiegasanalysen pro Parameter in den alten Bundesländern außer NRW	8
Abb. 4: Anzahl der Deponiegasanalysen pro Parameter der NRW-Deponien	9
Abb. 5: Altersverteilung der Deponien in NRW und der übrigen untersuchten Deponien im Jahre 1996	16
Abb. 6: Größe der Deponieflächen in NRW und den übrigen untersuchten Deponien	16
Abb. 7: Größe der Abfallvolumina der Deponien in NRW und den übrigen untersuchten Bundesländern	17
Abb. 8: Aerob und anaerobe metabiotische Mineralisierung des natürlichen Abfalls [nach KUCKLICK ET AL., 1996]	23
Abb. 9: Darstellung der Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie D7	32
Abb. 10: Darstellung der Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie D1	35
Abb. 11: Darstellung der Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie A	37
Abb. 12: Darstellung der Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie D34	40
Abb. 13: Darstellung der Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie D35	42
Abb. 14: Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie D8,II	44
Abb. 15: Gegenüberstellung der CSB-Konzentrationsverläufe der einzelnen Gruppen	45
Abb. 16: Darstellung der Jahresmittelwerte der Arsenkonzentrationen im Sickerwasser (ohne NRW)	47
Abb. 17: Darstellung der Jahresmittelwerte der PAK- und PCB-Konzentrationen im Sickerwasser der NRW-Deponien	48
Abb. 18: Darstellung der Sickerwassermengenverläufe der einzelnen Deponien nach Deponieabschluß	51
Abb. 19: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Altdeponie D31 (geringfügige Bodenabdeckung); 16. Jahr ist letztes Betriebsjahr.	55
Abb. 20: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der nordrhein-westfälischen Deponie C (geringfügige Bodenabdeckung); 20. Jahr ist letztes Betriebsjahr.	56
Abb. 21: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Deponie D44 (Bodenabdeckung > 1m); 19. Jahr ist letztes Betriebsjahr.	57
Abb. 22: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der nordrhein-westfälischen Altdeponie M (Bodenabdeckung > 1 m); 4. Jahr ist letztes Betriebsjahr.	57
Abb. 23: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Altdeponie D9 (mineralische Abdichtung); 7. Jahr ist letztes Betriebsjahr.	58
Abb. 24: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Deponie D15 (mineralische Abdichtung); 7. Jahr ist letztes Betriebsjahr.	59
Abb. 25: Sickerwasserfrachtenverlauf der Deponie D7 (mineralische Abdichtung, 6. Jahr ist letztes Betriebsjahr).	62
Abb. 26: CSB-Frachtenentwicklung über die Zeit bei den untersuchten Deponien	63
Abb. 27: NH ₄ -N-Frachtenentwicklung über die Zeit bei den untersuchten Deponien	63
Abb. 28: Verlauf der Konzentrationen im Deponiegas der Deponie D1	69

<i>Abb. 29: Jahresmittelwerte der Methan-, Kohlendioxid-, Stickstoff- und Sauerstoffkonzentrationen im Deponiegas der im Rahmen des BMBF-Vorhabens untersuchten Deponien und NRW-Deponien aus der Studie des Landesumweltamtes NRW</i>	72
<i>Abb. 30: Langzeitmodell Rettenberger [RETTENBERGER ET AL., 1992]</i>	73
<i>Abb. 31: Jahresmittelwerte der CKW-Konzentrationen der Deponien</i>	76
<i>Abb. 32: Jahresmittelwerte der FCKW-Konzentrationen der Deponien</i>	76
<i>Abb. 33: erfaßte Gasmengen der Deponien nach Deponieabschluß</i>	78
<i>Abb. 34: Gasmengenverläufe von 8 Deponien mit unterschiedlichen Oberflächenabdichtungssystemen</i>	79
<i>Abb. 35: Setzungsverläufe der Pegel der Deponie D19,I</i>	82
<i>Abb. 36: Setzungsverläufe der Pegel der Deponie D19,II</i>	83
<i>Abb. 37: Setzungsverläufe der Deponie Leppe aus SCHMIDT [1993], weitergeführt bis ins Jahr 1997</i>	84
<i>Abb. 38: Extrapolation der Setzungsverläufe der Deponie I (NRW)</i>	85
<i>Abb. 39: Darstellung der Extrapolationen für den Parameter CSB</i>	88
<i>Abb. 40: Prognose der CSB-Konzentrationsverläufe der Deponien D1, D5,II und D9</i>	89
<i>Abb. 41: Darstellung der Extrapolationen für den Parameter AOX</i>	90
<i>Abb. 42: Extrapolationen des Parameters Chlorid</i>	92
<i>Abb. 43: Darstellung der erfaßten Gasmengen als Einzelwerte</i>	94

TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tab. 1: Anzahl der Deponien pro Bundesland</i>	4
<i>Tab. 2: Zusammenstellung der Sickerwasser- und Gasparameter und der dazugehörigen Einheiten</i>	4
<i>Tab. 3: Allgemeine Kenndaten der Deponien</i>	11
<i>Tab. 4: Allgemeine Kenndaten der nordrhein-westfälischen Deponien</i>	13
<i>Tab. 5: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 1-5 einer Deponie bzw. eines neu eröffneten Abschnitts.</i>	24
<i>Tab. 6: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 6-10 für die Deponie bzw. für einen neu eröffneten Abschnitt</i>	25
<i>Tab. 7: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 11-20 für die Deponie bzw. für einen neu eröffneten Abschnitt</i>	26
<i>Tab. 8: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 21-30 für die Deponie bzw. für einen neu eröffneten Abschnitt</i>	27
<i>Tab. 9: Bestimmungsgrenzen</i>	28
<i>Tab. 10: Einteilung der Deponien in Gruppen gemäß ihrer Sickerwasserbelastung. 15 der 53 Deponien fehlen in dieser Tabelle, da von ihnen keinerlei Angaben zum Sickerwasserverhalten vorliegen. Bei einigen Deponien liegen Sickerwasserdaten nur aus Teilbereichen vor, z. B. D19II.</i>	30
<i>Tab. 11: Übersicht zur Verbreitung der Stoffe Arsen, PAK und PCB</i>	46
<i>Tab. 12: Zuordnung der Deponien zu unterschiedlichen Oberflächenabdeckungen (Doppelnennungen möglich)</i>	53
<i>Tab. 13: Prognose der Emissionspotentiale für den Sickerwasserpfad</i>	65
<i>Tab. 14: Vol.-%-Anteile der Hauptbestandteile des Deponiegases</i>	70
<i>Tab. 15: Gegenüberstellung der Konzentrationsmaxima und -minima verschiedener Spurenstoffe im Deponiegas und in der Abluft einer MBA</i>	74
<i>Tab. 16: Grenzwerte des Anhang 51 der Rahmen-AbwasserVwV [N. N., 1996]</i>	86
<i>Tab. 17: Tabellarische Gegenüberstellung der Ergebnisse unterschiedlicher Autoren zum Problem Nachsorgedauer</i>	93
<i>Tab. 18: Prognose des mittleren Emissionsintervalls von Siedlungsabfalldeponien zu verschiedenen Zeitpunkten, basierend auf den bisherigen Abschätzungen und der einzelnen Konzentrationsverläufe</i>	95

1 Einleitung

Die Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASi, [N. N., 1993]) enthält in Verbindung mit dem Anhang G der Technischen Anleitung Abfall (TA Abfall, [N. N., 1991]) umfangreiche Anforderungen an die Überwachung und Kontrolle der Betriebs- und Nachsorgephase von Siedlungsabfalldeponien. Konkrete Orientierungswerte für die Festlegung des Endes der Nachsorgephase werden jedoch nicht vorgegeben. Gegenwärtig ist es der zuständigen Behörde überlassen, von Einzelfall zu Einzelfall auf der Grundlage der vorliegenden Daten der betreffenden Deponie über die erforderlichen Maßnahmen zu entscheiden. Referenzwerte ähnlicher Deponien liegen den Behörden nur selten vor. Zur Zeit gibt es keine den Autoren bekannte Deponie, die unter Berücksichtigung der in der TASi enthaltenen Vorgaben bereits aus der Nachsorge entlassen wurde.

Von Deponiebetreibern wird aufgrund dieser offenen Regelung und aus rein betriebswirtschaftlichen Erwägungen häufig von einem 30 bis 50-jährigen Nachsorgezeitraum ausgegangen. Hierbei handelt es sich um ein willkürlich gewähltes Zeitintervall, das einer wissenschaftlichen Grundlage entbehrt und lediglich der Kostenkalkulation dient. Dieser Sachverhalt verdeutlicht die Notwendigkeit, eine größere Sicherheit auf diesem Gebiet zu erlangen. Dies kann in keinem Falle bedeuten, daß infolge der übergreifenden Auswertung von Deponiedaten die Überwachungsdaten der einzelnen Deponie nicht mehr berücksichtigt werden. Die einzelfallspezifische Auswertung ist unumgänglich, aber die Daten der Einzeldeponie sollten mit anderen verglichen werden, um so die Aussagekraft zu erhöhen. Die in diesem Bericht dargestellten Daten können hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten.

Gegenwärtig findet kaum eine gezielte, mehrere Deponien umfassende Auswertung von Überwachungsdaten statt. Die einzelnen Deponiebetreiber sind entweder durch Bescheide der Überwachungsbehörden oder durch Verordnungen auf Landesebene (Hessen, Nordrhein-Westfalen, Thüringen) dazu verpflichtet, Jahresberichte zum Deponieverhalten zu erstellen. Eine weitergehende, systematische Auswertung auf Landes- oder Bundesebene wird nur in Ausnahmefällen durchgeführt.

In der Vergangenheit hat es bereits einige deponieübergreifende Auswertungen von Überwachungsdaten gegeben. Hierzu zählen u. a. die Arbeiten von EHRIG [1978, 1985, 1989], ANDREOTTOLA ET AL. [1990], KRUSE UND KAYSER [1993], KRÜMPELBECK [1996] und KRUG

UND HAM [1997]. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag hierbei zumeist auf dem Emissionspfad Sickerwasser.

Demgegenüber stehen eine Reihe von Versuchsauswertungen im Labormaßstab zur Verfügung. Auf der Grundlage dieser Versuche wurden ebenfalls Emissionsverläufe unter den unterschiedlichsten Rahmenbedingungen abgeschätzt und die Dauer der sich daraus ergebenden Nachsorgephase prognostiziert. Hierzu gehören u. a. die Arbeiten von BELEVI UND BACCINI [1989], KRUSE [1994] und HEYER ET AL. [1997].

Das Ziel des durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) geförderten Forschungsvorhabens "Abschätzung der Restemissionen von Deponien in der Betriebs- und Nachsorgephase auf der Basis realer Überwachungsdaten" ist die Abschätzung der Zeitdauer der Nachsorgephase von Siedlungsabfalldéponien. Zudem wird der zu erwartende Verlauf der Emissionen bei Altanlagen gemäß TAsi Nr. 2.2.1 anhand von Einzelfallbeispielen und übergreifenden Darstellungen dokumentiert. Hierdurch wird ein Vergleich der verschiedenen Déponien und deren unterschiedlichen Problemlösungen ermöglicht.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird die jeweilige Entwicklung der Sickerwasseremissionen und der Gasproduktionsraten dargestellt. Die langfristige Emissionsabnahme und das Ende der Nachsorge werden näher charakterisiert. Zudem werden Effekte von Oberflächenabdichtungen und –abdeckungen auf den Wasserhaushalt dargestellt.

2 Untersuchungsmethodik und Charakterisierung der Untersuchungsobjekte

Im Rahmen der Zielsetzung des Untersuchungsvorhabens wurde es als sinnvoll erachtet, eine möglichst große, über die gesamte Fläche der alten Bundesländer verteilte Anzahl an gut dokumentierten Siedlungsabfalldeponien zu erfassen. Hierzu wurde von Bundesland zu Bundesland individuell vorgegangen. Zuerst wurde in jedem Fall die zuständige Landesbehörde oder das zuständige Ministerium in Kenntnis gesetzt und dann erfolgte, soweit nötig, die Anfrage bei den Behörden, wie z. B. Regierungspräsidien, Bezirksregierungen oder Staatlichen Ämtern für Wasser und Abfall. Im Laufe der Zeit sind dann noch weitere Kontakte mit verschiedenen Ingenieurbüros hinzugekommen. Dadurch konnten von insgesamt mehr als 50 Deponiebetreibern ausführliche Informationen zum Zustand ihrer Deponie und die jeweiligen Überwachungsdaten erhalten werden. Im Rahmen von Standortbegehungen wurden diese Deponien zudem näher untersucht. Die Anzahl der angesprochenen und nicht in diese Untersuchung einfließenden Betreiber liegt mehr als doppelt so hoch. In diesen Fällen konnte bereits im Vorfeld abgeklärt werden, daß es sich um kein geeignetes Objekt für die Untersuchung handelt. Unter den verbliebenen 53 Deponien gibt es ebenfalls noch Anlagen, die sich erst im nachhinein als nicht oder nur bedingt geeignet herausgestellt haben.

Auf Grund des unterschiedlichen Ursprungs der Deponiedaten stellt sich deren Qualität und Quantität als sehr heterogen dar. Zudem kann im nachhinein nichts mehr über die Sorgfalt bei der Probenahme und der Durchführung der Analysen ausgesagt werden. In Tab. 1 ist jeweils die Anzahl der Deponien dem betreffenden Bundesland zugeordnet. Sehr stark vertreten sind demnach die Länder Niedersachsen, Hessen und Bayern. Für das Bundesland NRW wird zudem auf die noch unveröffentlichte Studie des Landesumweltamtes NRW (LUA NRW) Bezug genommen, in der die Daten von 25 Deponien ausgewertet wurden [KRÜMPELBECK, 1996]. Die Daten der NRW-Deponien werden insbesondere in die übergreifenden Aus- und Bewertungen einfließen. Die gegenüber den übrigen Ländern hohe Anzahl der Deponien ist darauf zurückzuführen, daß für die gesamte Datenaufnahme im Bundesland NRW 1 Jahr zur Verfügung stand und somit eine intensivere Suche ermöglicht wurde. Zudem wurden zum damaligen Zeitpunkt weniger strikte Auswahlkriterien als beim vom BMBF geförderten Vorhaben für die Deponien vorgegeben. Auf Grund dieser geleisteten Vorarbeit des Landes NRW konnten einige bereits bekannte Probleme bei der Datenerhebung zu Beginn des Untersuchungsvorhabens vermieden werden.

Im Rahmen der Erhebung der Daten wurden nur Siedlungsabfalldeponien aus den alten Bundesländern berücksichtigt. Der Hauptgrund hierfür ist das nur unzureichende Vorhandensein von geeigneten Objekten (Fehlen von Sickerwassersammlung und Entgasungsanlagen) sowie die daraus resultierende geringe Anzahl an belastbaren Daten zur Qualität und Quantität der Emissionen. Ein weiterer Grund ist die stark vom westdeutschen Abfall abweichende Abfallzusammensetzung in den ostdeutschen Bundesländern in den Jahren vor 1990.

Tab. 1: Anzahl der Deponien pro Bundesland

Bundesland	Anzahl der Deponien
Baden-Württemberg	5
Bayern	11
Bremen	0
Hamburg	1
Hessen	12
Niedersachsen	14
Nordrhein-Westfalen	(25) aus LUA-Studie ¹
Rheinland-Pfalz	8
Saarland	0
Schleswig-Holstein	2
	Σ 53 + 25

Zur Charakterisierung des Sickerwassers und des Deponiegases wurden die Analysenergebnisse von insgesamt 55 Parametern ausgewertet. Um welche Parameter es sich handelt, geht aus der Tab. 2 hervor.

Tab. 2: Zusammenstellung der Sickerwasser- und Gasparameter und der dazugehörigen Einheiten

Parameter	Einheit	Parameter	Einheit	Parameter	Einheit
AOX	µg/l	Fluor gesamt	mg/m ³	Summe PCB	mg/l
Arsen	mg/l	Kalium	mg/l	pH-Wert	-
Benzol	mg/m ³	Kohlendioxid	Vol %	Sauerstoff	Vol %
Blei	mg/l	Kohlenmonoxid	Vol %	Schwefel gesamt	mg/m ³
Bor	mg/l	Kupfer	mg/l	Schwefelwasserstoff	mg/m ³
BSB ₅	mg/l	Leitfähigkeit	µS/cm	Stickstoff	Vol %
Summe BTEX	mg/m ³	Magnesium	mg/l	Stickstoff gesamt	mg/l
Cadmium	mg/l	Mangan	mg/l	Sulfat	mg/l
Calcium	mg/l	Methan	Vol %	Sulfid	mg/l
Chlor gesamt	mg/m ³	Naphthalin	mg/m ³	Summe CKW	mg/m ³
Chlorid	mg/l	Natrium	mg/l	Summe KW	mg/m ³

¹[KRÜMPELBECK, 1996]

Fortsetzung der Tab. 2

Chloroform	mg/m ³	NH₄	mg/l	Tetrachlorethylen	mg/m ³
Chrom	mg/l	Nickel	mg/l	TOC	mg/l
CSB	mg/l	NO₃	mg/l	Toluol	mg/m ³
1,2-Dichlorethen	mg/m ³	NO₂	mg/l	Trichlorethan	mg/m ³
Dichlormethan	mg/m ³	NH₄-N	mg/l	Trichlorethylen	mg/m ³
Eisen	mg/l	NO₂-N	mg/l	Xylol	mg/m ³
Ethylbenzol	mg/m ³	NO₃-N	mg/l	Zink	mg/l
Summe FCKW	mg/m ³	PAK´s	mg/l		

Anhand der Abbildungen 1-4 ist zu ersehen, daß die Anzahl der ausgewerteten Analyseergebnisse pro Parameter starken Schwankungen unterworfen und die Sickerwasserparameteranzahl im Rahmen der Studie des Landesumweltamtes NRW deutlich geringer ist. Diese geringere Anzahl ist nicht darauf zurückzuführen, daß weniger Parameter untersucht wurden, sondern die Einbeziehung dieser Parameter wurde zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie als nicht notwendig erachtet.

Die Unterschiede in der Analysenanzahl der einzelnen Parameter liegt darin begründet, daß Größen wie die Leitfähigkeit und der pH-Wert nahezu in jeder Sickerwasseranalyse ermittelt werden, andere hingegen nur im Rahmen von sogenannten Vollanalysen. Insgesamt ist die Anzahl der Sickerwasseranalysen um ein Mehrfaches höher als die der Deponiegasanalysen. Das Sickerwasser wird zumeist im vierteljährlichen Rhythmus beprobt, das Deponiegas lediglich einmal im Jahr oder sogar noch seltener. Zudem werden einige Parameter sowohl im Deponiegas als auch im Sickerwasser nur ermittelt, wenn ein Verdacht auf eine unzulässige, möglicherweise gesundheitsgefährdende Erhöhung derselben besteht.

Für die bundesweite Umfrage liegt die Anzahl der einzelnen Sickerwasseranalysen bei 26.235. Demgegenüber stehen 10.545 Sickerwasseranalysen der NRW-Deponien mit einer etwas geringeren Anzahl an Einzelparametern. Lediglich 2.891 Analysen einzelner Gaskomponenten liegen im westdeutschen Bundesgebiet, sowie zusätzlich 1080 in NRW vor.

Bei den im Rahmen dieses Berichtes dargestellten Konzentrationsverläufen verschiedener Parameter und Deponien handelt es sich um Darstellungen der jeweiligen Jahresmittelwerte. In den Tabellen 5-8 sind die jeweiligen Mittelwerte, Maxima und Minima innerhalb eines festgelegten Zeitraumes dargestellt. Die Konzentrationen wurden folgendermaßen errechnet: Zuerst wurde der Jahresmittelwert pro Parameter und Deponie, dann der mittlere Wert für die jeweilige Zeitspanne und zum Schluß der Mittelwert für die Zeitspanne und den betreffenden Parameter berechnet. Das angegebene Konzentrationsmaximum bzw. -minimum stellt den

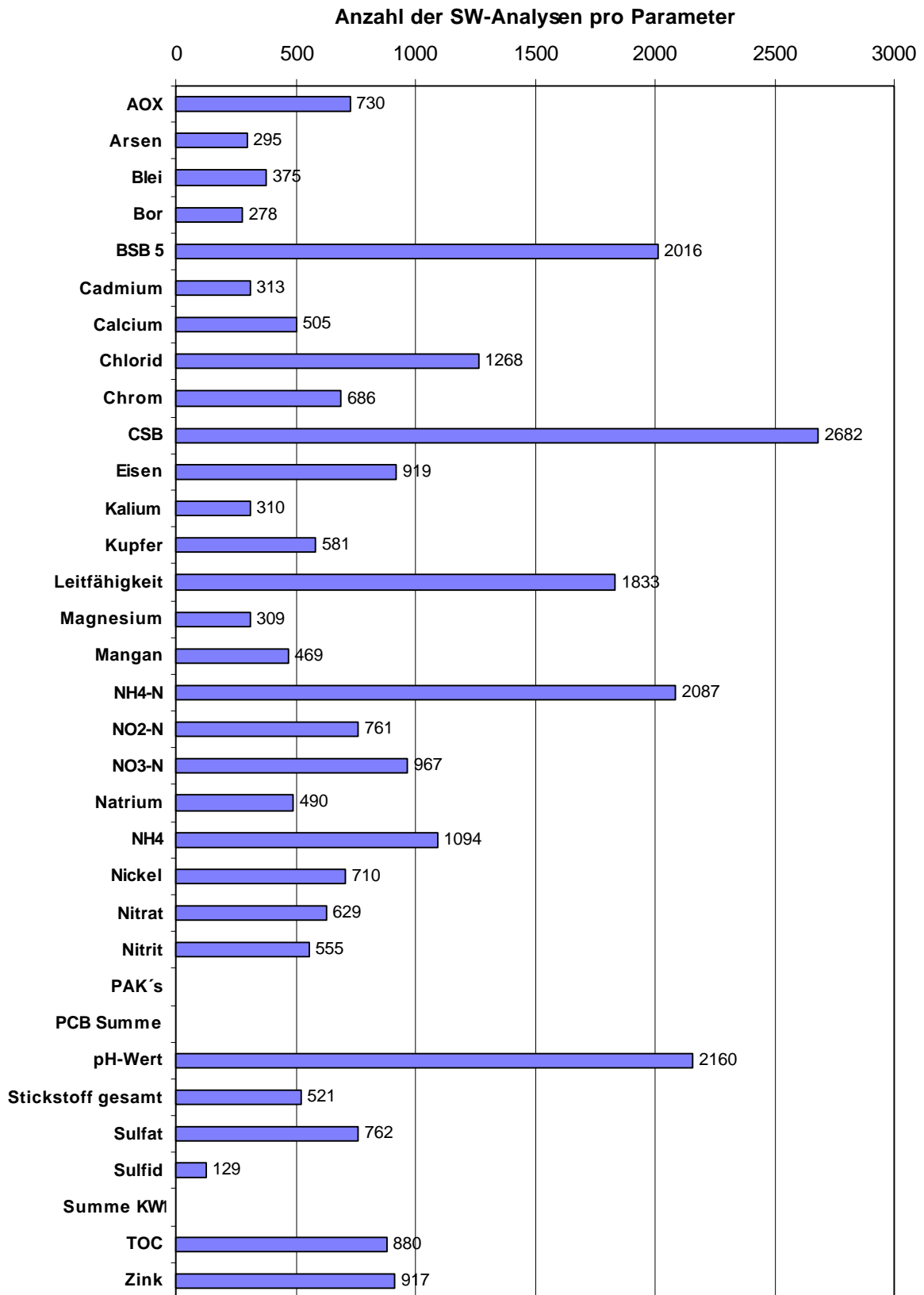


Abb. 1: Anzahl der Sickerwasseranalysen pro Parameter der alten Bundesländer außer NRW

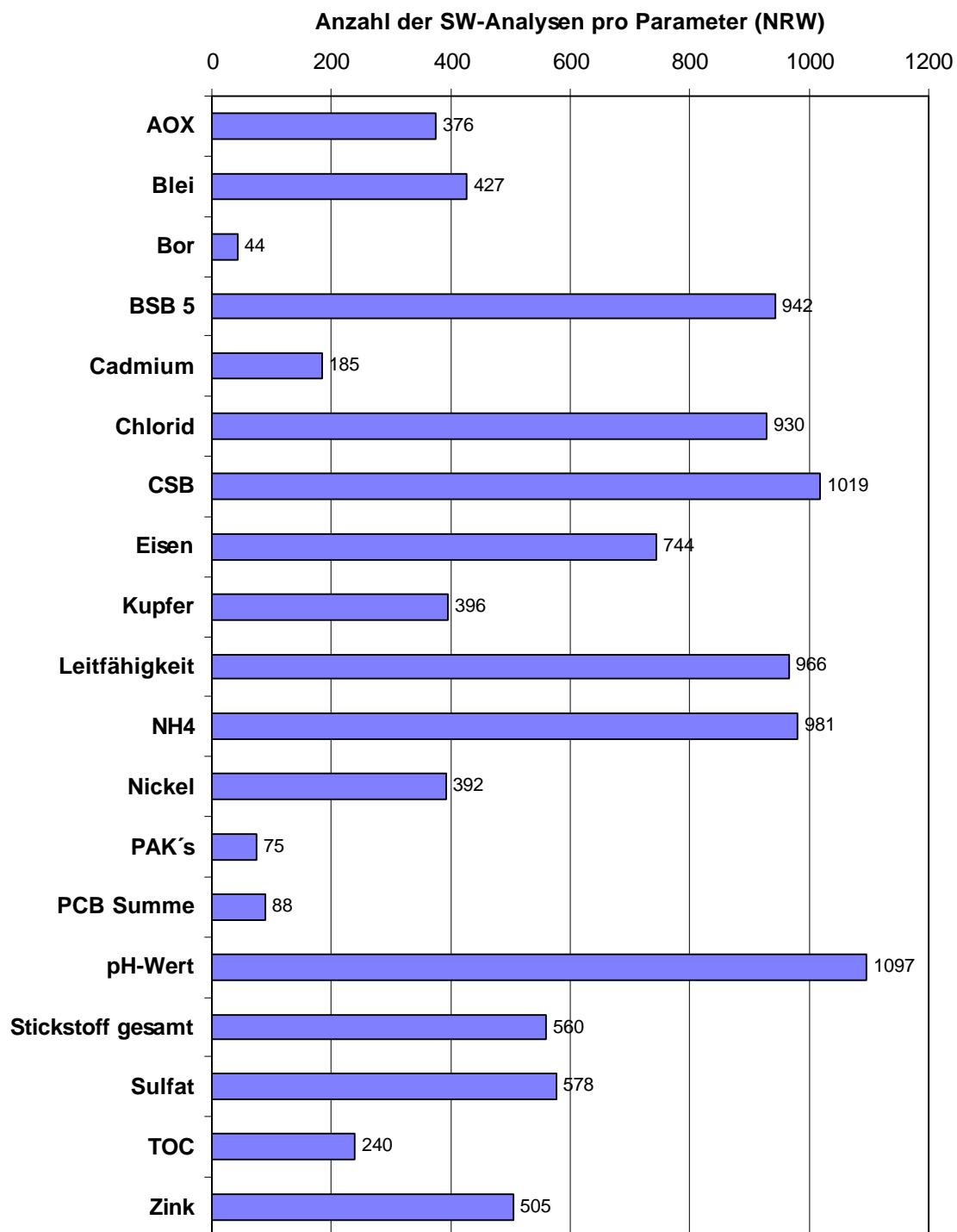


Abb. 2: Anzahl der Sickerwasseranalysen pro Parameter der NRW-Deponien, Parameteranzahl wurde im Rahmen der LUA Studie beschränkt

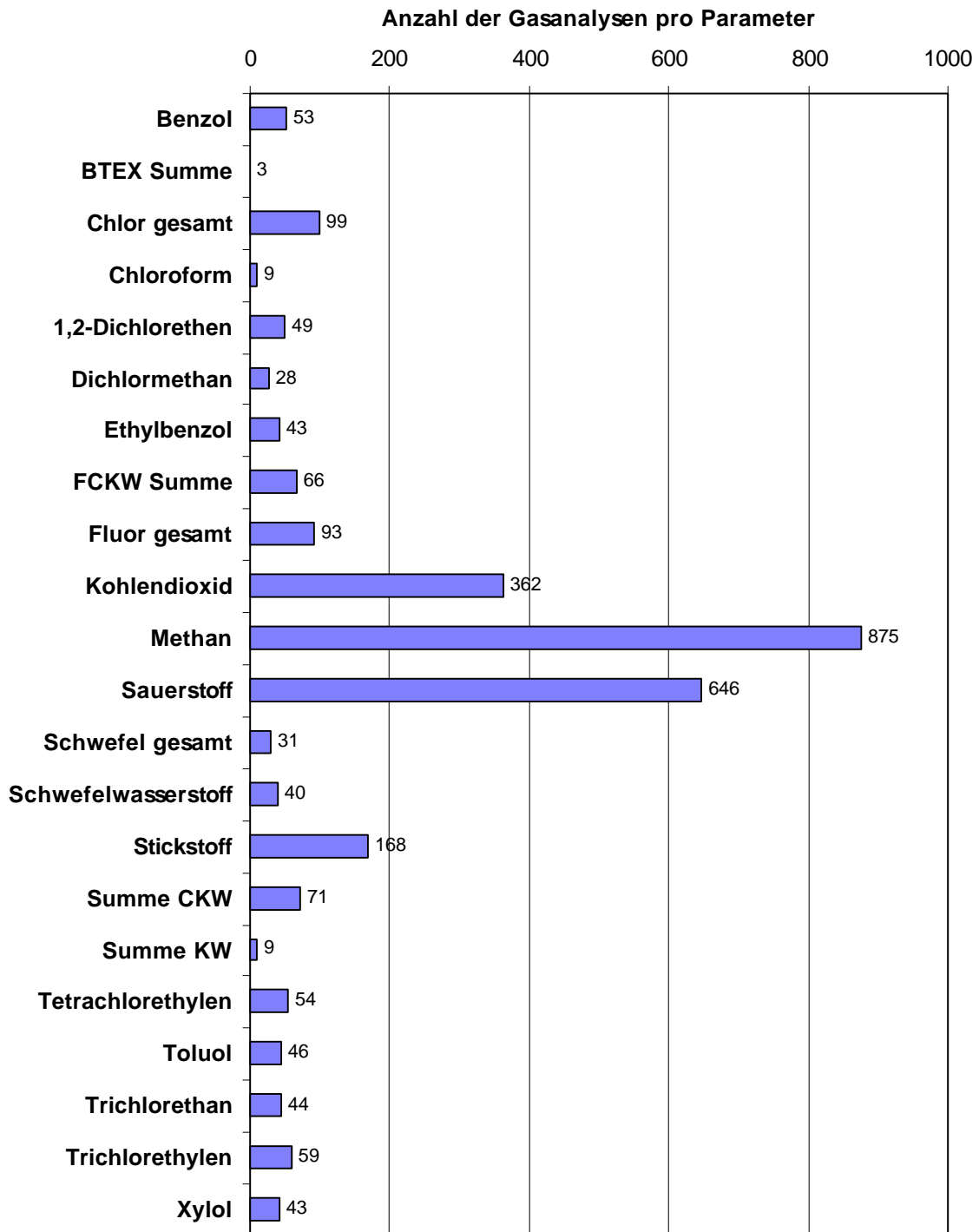


Abb. 3: Anzahl der Deponiegasanalysen pro Parameter in den alten Bundesländern außer NRW

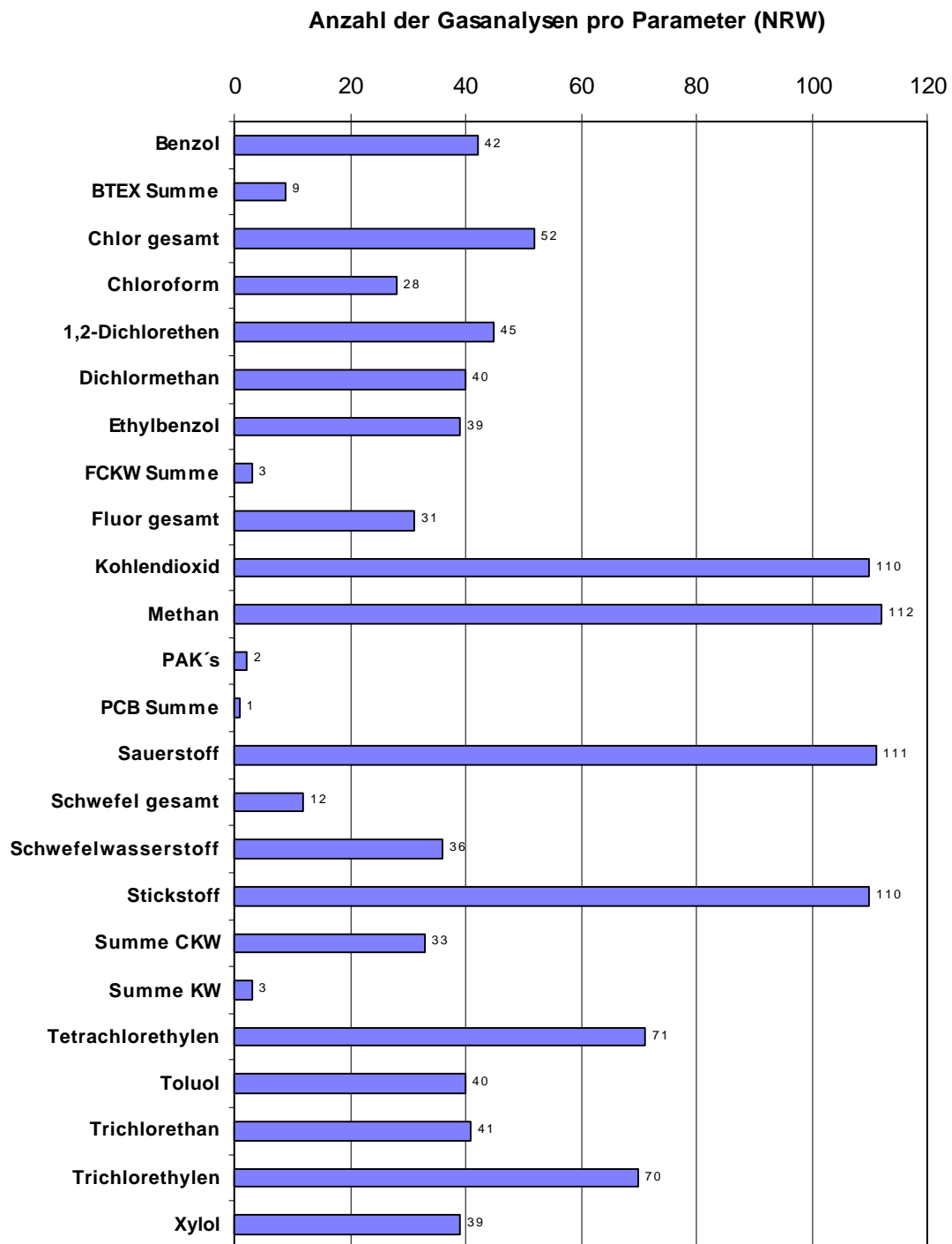


Abb. 4: Anzahl der Deponiegasanalysen pro Parameter der NRW-Deponien

entsprechenden maximalen oder minimalen Einzelwert innerhalb einer Zeitspanne dar. Deponien bei denen eine Beeinflussung des Sickerwassers vermutet (z. B. Fremdwasserzufluß) werden konnte, wurden in die Mittelwertbildung nicht mit einbezogen.

2.1 Charakterisierung der Abfalldeponien

Zur besseren Vergleichbarkeit der Deponien untereinander sind in den Tabellen 3 und 4 die allgemeinen Kenndaten der im Rahmen des BMBF-Projektes untersuchten Deponien und der nordrhein-westfälischen Deponien aufgeführt. Aus den Daten in Tab. 3 ist ersichtlich, daß die Mehrheit der untersuchten Altdeponien ein Abfallvolumen von bis zu 1,5 Mio. m³ besitzt. Die meisten verfügen zudem über eine Entgasungsanlage und technische Einrichtungen zur Fassung des Sickerwassers. Zur jeweiligen Abfallzusammensetzung liegen nicht immer genaue Daten vor, so daß die Mengen in einigen Fällen abgeschätzt werden müssen. Bei dem Großteil der untersuchten Deponien ist der Hausmüll allerdings die bestimmende Größe. Je älter die Deponie, desto größer wird der Anteil an Bauschutt und Erdaushub, der zur Verfüllung gelangt ist. Während des Betriebes der hier untersuchten Deponien haben Recyclingmaßnahmen und die zum damaligen Zeitpunkt steigenden Deponiegebühren zu einer deutlichen Verringerung dieses Abfallanteils geführt.

Tab. 3: Allgemeine Kenndaten der Deponien

Deponie	Laufzeit	Fläche [ha]	Höhe [m]	Abfallvol./-menge Mio	Abfallzusammensetzung	Rekultivierungsmaßnahmen	Technische Ausstattung
D1	1973-1983	16,6	8,1	1,427 t	46 % H, 11 % Sp, 22,4 % B, 17 % G, 2,6 % KS, 0,9 % IS	Bodenabdeckung > 1 m	SW ² , Ga
D2	1965-1979	6,4	5-25	1,102 t	32 % H/Sp, 10 % G, 25-35 % I, 30-50 % B, 8 % IS/KS	Bodenabdeckung > 1 m	Ga
D3	1971-1989	9	10	0,9 m ³		mineral. Abdichtung	SW teilweise, Ga
D4	1974-1993	7,27	10	0,8 m ³	66 % B, 34 % H/hG	Bodenabdeckung > 1 m	Ba und SW teilweise, Fremdw
D5	1966-1988	18,1	10	2,3 m ³	H, hG, G, B, KS	z. T. mineral. Abdichtung, z. T. Folie	Ba und SW teilweise, Ga
D6	1967-1988	3,76	20	0,84 m ³	50 % H, 20 % hG, 30 % B	Bodenabdeckung > 1 m	Ba, SW teilweise, Ga
D7	1986-1991	2,3	20	0,13 m ³	> 50 % H/hG, ?B, ? Sp, ?IS	mineral. Abdichtung	Ba, SW, Ga
D8	1978-1986	3	12	0,27 m ³	> 50 % H/hG, <<I	Bodenabdeckung > 1 m	Ba und SW teilweise, Ga
D9	1983-1989	1,38	15	0,308 m ³	80 % H, hG, Sp, B, KS	mineral. Abdichtung	Ba teilweise, SW, Ga
D10	1983-1993	4,8	12	0,54 t	> 50 % B/hG, H, Sp	Bodenabdeckung > 1 m	Ba, SW teilweise, Ga
D11	1983-1996	8	15	0,31 m ³	>>50 % H/hG	mineral. Abdichtung	Ba, SW, Fremdw, Ga
D12	1959-1988	6	10	0,519 m ³	>> 50 % H/hG	mineral. Abdichtung	SW teilweise
D13	1986-1994	2,5	8	0,237 m ³	80 % H/Sp, 20 % hG	Bodenabdeckung ≤ 1 m	Ba, SW, Ga
D14	1976-1986	1	10	0,1 m ³	H, Sp, hG	mineral. Abdichtung	Ba und SW teilweise, Fremdw, Ga
D15	1983-1989	2,8	15	0,25 m ³	> 50 % H, hG, Sp, KS	mineral. Abdichtung	B, SW, G
D16	1972-1989	14	?	?	H, hG, I	Bodenabdeckung ≤ 1 m	Ba teilweise, SW, Ga teilweise passiv
D17	1973-1993	7	20	1,5 m ³	H, hG, KS, B	mineral. Abdichtung	SW, Ga
D18	1958-1973	9,5	25	2,2 m ³	H, G, B	Bodenabdeckung > 1 m	G
D19	1973-1983 (I) 1983-1995 (II)	30	65	5,5 m ³	H, hG, B	Bodenabdeckung > 1 m	SW teilweise, Ga
D20	1970-1976	1	20	0,2 m ³	> 50 % I, H, B	z. T. Bodenabdeckung > 1 m	SW teilweise, Fremdw, Ga
D21	1965-1995	8,11	25	1,8-2 m ³	> 50 % H/hG, KS, IS, B	Bodenabdeckung ≤ 1 m	SW teilweise, Ga
D22	1976-1993	10	?	0,67 m ³	34,1 % H, 36,4 % B, 15,7 % G, 7 % Sp, 6,9 KS	Bodenabdeckung ≤ 1 m	Ba und SW teilweise, Ga
D23	1977-1980	6	12	0,8 m ³	H, hG, B	Bodenabdeckung > 1 m	Ga
D24	1972-1993	10,8	?	3,2 m ³	<50 % H/hG, > 50 % I/IS	Bodenabdeckung ≤ 1 m	SW teilweise, Ga

H=Hausmüll, Sp=Sperrmüll, B=Boden und Bauschutt, G=Gewerbeabfall, KS=Klärschlamm, IS=Industrieschlamm, I=Industrieabfälle, hG= hausmüllähnlicher Gewerbeabfall, SW=Sickerwasser, - Ga=Gas, Ba=Basis, Fremdw=Fremdwasser

Fortsetzung Tab. 3

Deponie	Laufzeit	Fläche [ha]	Höhe [m]	Abfallvolumen Mio	Abfallzusammensetzung	Rekultivierungsmaßnahmen	Technische Ausstattung
D25	1975-1985	5,5	10	0,35 m ³	H, hG, B	Bodenabdeckung > 1 m	SW, Fremdw, Ga
D26	1969-1982	8,8	12	0,95 m ³	I, hG, KS, H	Bodenabdeckung > 1 m	SW, Fremdw, Ga
D27	1973-1994	11,5	?	1,5 m ³	H, hG, B	mineral. Abdichtung	SW, Fremdw,
D28	1975-1990	6,755	60?	0,75 m ³	30 % H, 45 % hG, 10 % B, 10 % KS, 5 % Sp	mineral. Abdichtung	SW, Fremdw, Ga
D29	Vor 1973-1982	16	10	2,2 m ³	H, hG, B, G	Bodenabdeckung > 1 m	SW teilweise, Ga
D30	Vor 1972-1986	4		0,273 m ³	> 50 % B, H, hG, G	mineral. Abdichtung	Ga
D31	1979-1994	8,2		1-1,25 m ³	H, Sp, hG, B, KS	Bodenabdeckung ≤ 1 m	SW, Ga
D32	1988-1994	3,7	20	0,315 m ³	H, hG, B, Sp, KS	Bodenabdeckung ≤ 1 m, seit 1994 Folie	Ba, SW mit Rückführung, Ga
D33	1974-1989	3	8		H, hG, B, Sp	Bentonitmatte	Ga
D34	1982-1993	8,5	40	1,6 m ³	H, hG, B, Sp, KS	mineral. Abdichtung	Ba, SW, Ga
D35	1972-1984	6		0,4 m ³	60 % B, 20 % H, 10 % KS, 10 % G	Bodenabdeckung > 1 m	SW, Fremdw
D36	1969-1992	16,64	35	4,5 m ³	44,8 H, 27,9 % B, 15,9 % Sp, 9,2 % I, 2,14 KS	Bodenabdeckung > 1 m	SW, Fremdw, Ga
D37	1975-1994	7,6	12	0,85 t	50 % H, 25 % G, 12 % Sp, 5-10 % B, < 1 % KS	Bodenabdeckung ≤ 1 m	Ba, SW früher Rückführung, Ga
D38	1975-1987	12	17	1 m ³	>> 50 % H	Bodenabdeckung ≤ 1 m	SW, Fremdw, Ga
D39	1972-1988	31	16	0,7 m ³	33 % H, 33 % B, 33 % hG	Bodenabdeckung ≤ 1 m	SW, Fremdw
D40	1978-1994	12		2 m ³		Bodenabdeckung > 1 m	SW
D41	Ca. 1960-1992	6,6	22		H, hG, B, Sp	Bentonitmatte	Ga
D42	Ca. 1963-1990	6,4	8	0,55 m ³		Bodenabdeckung ≤ 1 m	Ga
D43	1973-1978	8,4		0,31 m ³	> 50 % I, H, hG, B	Bodenabdeckung > 1 m	SW, Fremdw, Ga
D44	1977-1995	15	20	1,1 m ³	H, hG, B, KS	Bodenabdeckung > 1 m und z. T. ≤ 1 m	Ba teilweise, SW, Ga
D45	1900-1981	6			H, hG, B	Bodenabdeckung > 1 m	SW teilweise
D46	1978-1988	11,8		1,5 t	H, B, G, KS	mineral. Abdichtung	Ga
D47	1985-heute	32	35		H, hG, G, B, KS	Bodenabdeckung > 1 m	Ba, SW, Ga
D48	Ca. 1950-1995	2,5		0,3 m ³	H, hG, B	Bodenabdeckung ≤ 1 m	SW
D49	1978-1992	12,7		2,1 m ³	> 50 % G, B, H, KS, Sp	Folie/Bentonitmatte	Ba teilweise, SW Fremdw, Ga
D50	1973-1993	12		3 m ³	50 % hG/B, 40 % H, 10 % B/Sp	mineral. Abdichtung	Ga
D51	1969-1986	30	10	3,4 m ³	H, G, hG, I, KS, Sp	Folie/Bentonitmatte	SW teilweise, Ga

Tab. 4: Allgemeine Kenndaten der nordrhein-westfälischen Deponien

Deponie	Laufzeit	Fläche ha]	Höhe [m]	Abfallvol./-menge in Mio	Abfallzusammensetzung	Rekultivierungsmaßnahmen	Technische Ausstattung
A	1976/77-1983	7,4	15	1,1 m ³	45 % H*, 55 % B** und G****	mineral. Abdeckung, 1 m	Ba, SW, Ga
B	1971-1985	10,5	12	1 m ³	50 % H, 50 % B und G	mineral. Abdeckung, 0,65 m	Ba, SW, Ga
C	1973-1992	17	3 - 17	1,61 m ³	54 % H, 46 % G	Sand 0,1 m	Ba, SW, Ga
D	1974-1983	7	8	0,145 m ³	H, G, und B	Erzsand 0,3 m Dränschicht	Ba, SW
E	1960-1975	5,46	8	0,189 m ³	> 50 % Siedlungsabfall	0,4 – 0,9 m Sand/Mutterboden	SW teilweise Fremdw
F	1971, 1975- 1979	7	12	0,2 m ³	> 50 % Siedlungsabfall	0,3 – 2,4 m Sand/Mutterboden	Ba teilweise, SW
G	1969-1985	20	8 - 12	1,1 m ³	> 50 % Siedlungsabfall	1,5 – 3 m Bodenabdeckung	SW teilweise Fremdw, Ga
H	1966-1983	7,8	7	1,8 m ³	H, G und B	0,8 m Inertmaterial	Ga
I	1967-1987	30	12 - 15	3,7 m ³	50 % H und ?G, B separat	Ca. 0,3 m Ton	Ba teilweise SW teilweise Ga, Fremdw
J	1957-1980	8	40	1,2 m ³	30 % Organik	0,3 – 1 m Bauschutt/Sand	SW teilweise, Ga
K	1966-1981	6,4	12 - 18	0,9 m ³	50 % H, 30 % B und 20 % G	0,4 m bindiger Boden	SW teilweise
L	1969-1981	12	7,5	0,9 m ³	H, G und K*****	Ca. 2 m Boden/Sand	SW
M	1955-1983	44	16 - 28	4,9 m ³	45 % Organik, 35 % Anorganik, 20 % G	2,5 m Boden	SW teilweise Ga
N	1945-1992	55	45	14,5 m ³	13 % H, Industrieabfall und B	1 – 3 m Boden	Ba und SW teilweise, Ga
O	1964-1994	22	15	5,7 m ³	33 % Organik, 67 % Inertstoffe	Geplant	Ba und SW teilweise, Ga
P	1973-heute	20	14	1,9 m ³	> 50 % Siedlungsabfall	1,5 – 3 m Boden	Ba teilweise SW
Q	1972-heute	20,8	17 - 20	3,4 m ³	> 50 % Siedlungsabfall	1 – 2 m bindiger Boden	Ba teilweise SW, Ga
R	1968-1988	17,7	12	2 m ³	Siedlungsabfall, viel Bauschutt	0,5 – 2 m bindiger Boden	SW, Ga Fremdw
S	1974-1987	6	45	1,4 m ³	Siedlungsabfall	1,5 – 3 m bindiger Boden	SW teilweise Fremdw
T	1968-1993	5,5	30 - 40	1,9 m ³	H, Inertstoffe und G	0,2 – 0,3 m Boden	Ba, SW, Ga Fremdw
U	1969-1989	27,6	6 - 14,5	2,8 m ³	50 % H, Aschen und Schlacken	0,3 – 0,4 m bindiger Boden	Ba, SW, Ga Fremdw?

H=Hausmüll, B=Bauschutt und Boden, hG=hausmüllähnlicher Gewerbeabfall, KS= Klärschlamm, Ba=Basis, SW= Sickerwasser, Ga=Gas, Fremdw=Fremdwasser

Fortsetzung Tab. 4

V	1968-1980	7	17 - 20	0,3 m ³	70 % Organik	0,5 – 2 m Boden	G
W	vor 1982-heute	3,5	-	-	Siedlungsabfall	mineralische Abdeckung	B teilweise SW, G
X	1966-1982	4,3	30 - 40	0,75 m ³	H, G und KS	3-lagige mineralische Abdeck.	B, SW teilweise, G
Y	1977-1980	2	9	0,273 m ³	H, 5 % B und Kunststoffabfall	2,5 mm PEHD, Geotextil, etc.	SW teilweise G
A1	1991-heute	3 z. Z.	Im Aufbau	In Betrieb	Restabfälle	In Betrieb	B, SW, G

2.2 Graphische Gegenüberstellung einiger Deponiekenndaten

In den folgenden Abbildungen wird eine Gegenüberstellung der im Rahmen der LUA-Studie NRW [KRÜMPELBECK, 1996] und des vorliegenden Vorhabens untersuchten Deponien vorgenommen. Abb. 5 zeigt die prozentuale Altersverteilung der Deponien im Bezugsjahr 1996. Ein Großteil der innerhalb des durch das BMBF geförderten Vorhabens untersuchten Deponien ist jünger als die Deponien der NRW-Studie. Das Deponiealter, das prozentual gesehen am häufigsten erreicht wurde, befindet sich im Intervall 21-25 Jahre. Für die NRW-Deponien liegt dieses Intervall zwischen 26 und 30 Jahren.

Bei der Auswertung der Kriterien Flächengröße und Volumenverteilung auf den Deponien (Abb. 6) zeichnet sich ebenfalls ein Unterschied ab. Die am häufigsten auftretende Deponiegröße der Altdeponien in den alten Ländern (Sonstige) liegt bei 5-10 ha. NRW besitzt darüber hinaus noch einen über 16 % igen Anteil an Deponien, die über eine Fläche von mehr als 25 ha verfügen. Im übrigen westdeutschen Raum bilden die kleineren Flächeneinheiten die überwiegende Mehrheit.

Die Abb. 7 zeigt die Gegenüberstellung der Deponievolumina des Bundeslandes NRW und der übrigen Bundesländer. Die Deponien des bevölkerungsreichsten Bundeslandes NRW besitzen prozentual gesehen deutlich größere Deponievolumina als die untersuchten Deponien der übrigen Bundesländer. Zurückzuführen ist dieser Unterschied vor allem auf die nicht so dicht besiedelten Flächenländer Bayern und Niedersachsen. Dort sind die in den letzten Jahrzehnten zur Verfüllung gelangten Deponien im Volumen deutlich kleiner als in NRW. Am Vergleich des Flächenbedarfs kann dieser Unterschied ebenfalls manifestiert werden, da die NRW Deponien deutlich stärker im Bereich der größeren Flächen vertreten sind.

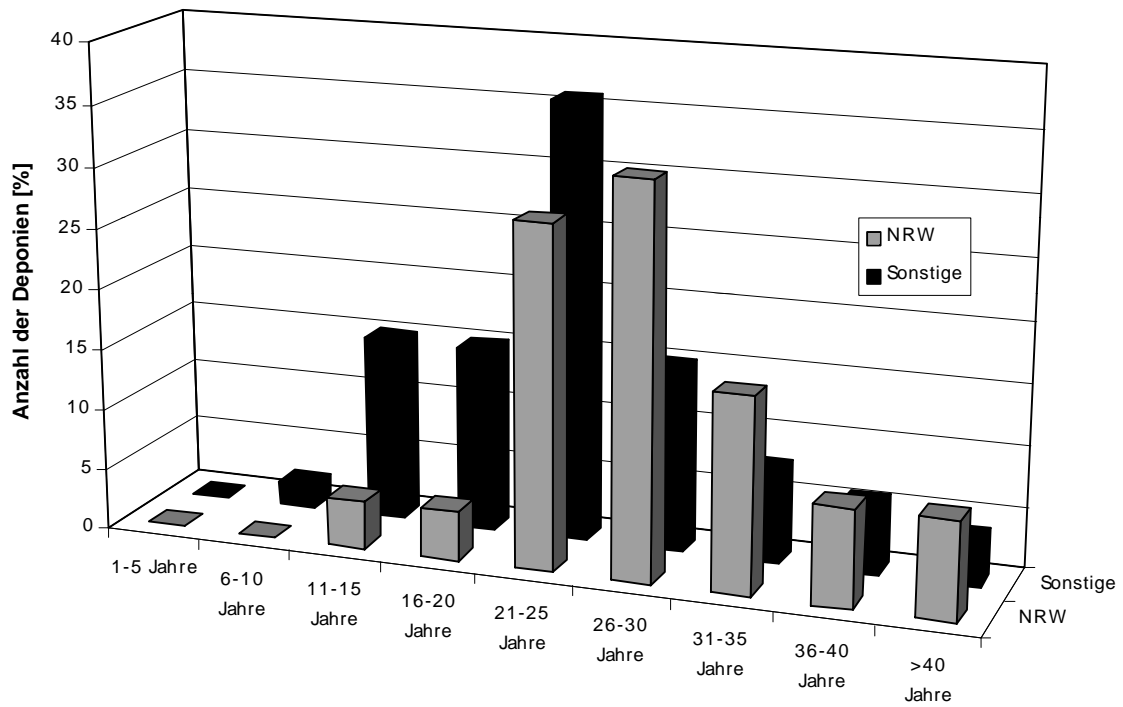


Abb. 5: Altersverteilung der Deponien in NRW und der übrigen untersuchten Deponien im Jahre 1996

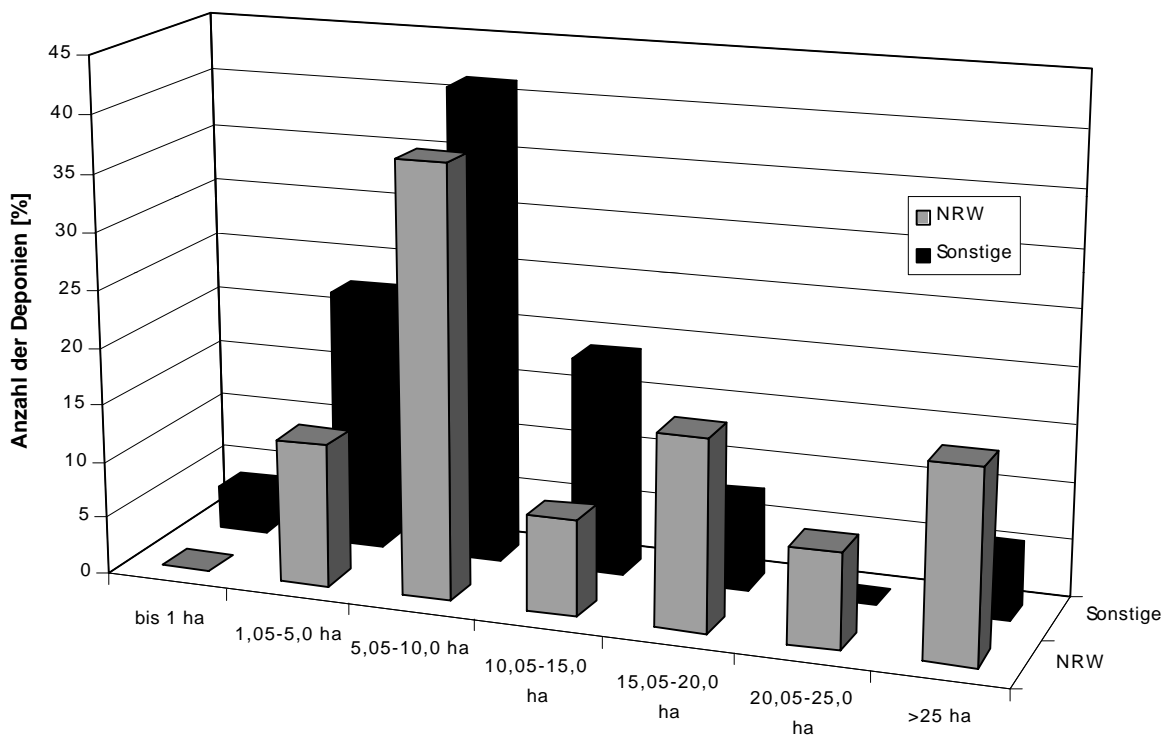


Abb. 6: Größe der Deponieflächen in NRW und den übrigen untersuchten Deponien

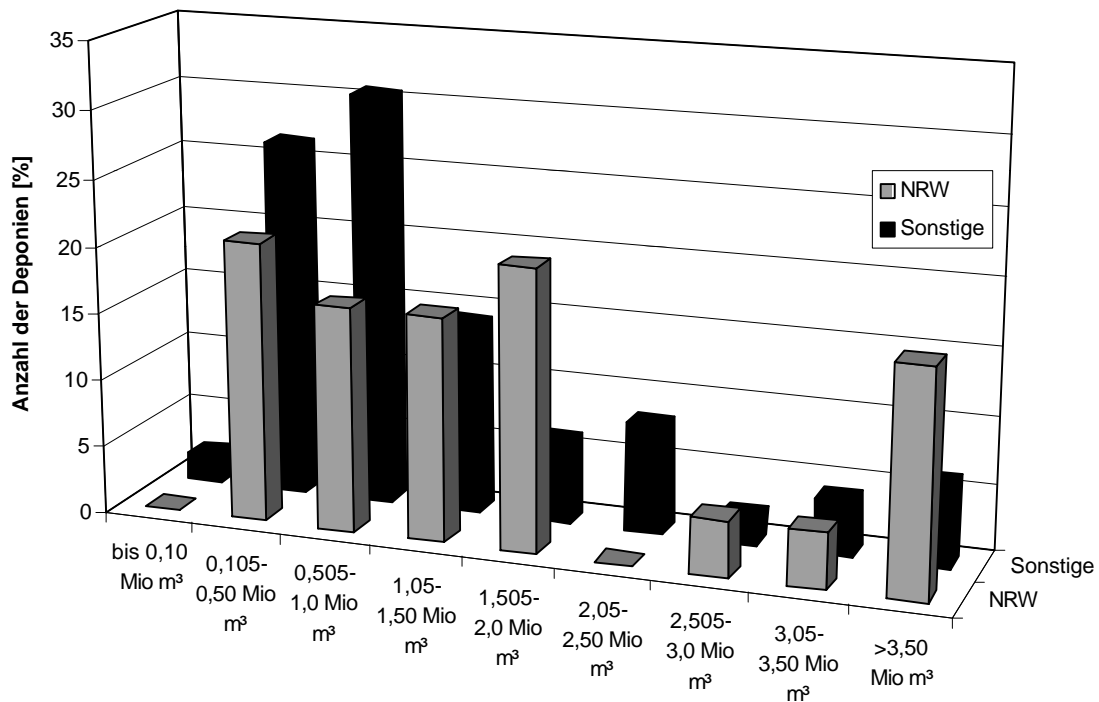


Abb. 7: Größe der Abfallvolumina der Deponien in NRW und den übrigen untersuchten Bundesländern

2.3 Prozesse im Deponiekörper

Der Deponiekörper stellt mit seiner heterogenen Zusammensetzung und unterschiedlichen Altersstruktur ein äußerst reaktives, stationäres Gebilde dar. In ihm laufen die verschiedensten Um- und Abbauvorgänge parallel ab. FARQUHAR UND ROVERS [1973] teilen diese Prozesse, die zu unterschiedlichen Zeiten in verschiedenen Kompartimenten des Deponiekörpers durchlaufen werden, in vier Phasen ein.

In der ersten noch aeroben Phase werden Makromoleküle durch Hydrolyse in kleinere Bestandteile gespalten. Die zweite Phase, die saure Phase, zeichnet sich durch anaerobe Mikroorganismen aus, die die aus der ersten Phase erhaltenen Produkte in noch kleinere Moleküle abbauen, z. B. in organische Säuren. Da die Energiebilanz von anaeroben Stoffwechselfvorgängen sehr viel schlechter ist als von aeroben Prozessen kommt es zu einem nur geringen Biomassenzuwachs und einer hohen Konzentration an Endprodukten, die wiederum das Sickerwasser zu diesem Zeitpunkt stark belasten. Die dritte Phase ist die instabile Methanphase. Hier beginnen die Umsetzungsprozesse, die zur Produktion von Methan und Kohlendioxid führen. Zu diesem Zeitpunkt überwiegt noch die Kohlendioxidproduktion. Es handelt sich bei Methan und Kohlendioxid um die Endprodukte des anaeroben Stoffwechsels, d. h. eine weitere Umsetzung ist anaerob

nicht möglich. Die sich anschließende vierte Phase, die stabile Methanphase, zeichnet sich durch ein Deponiegas aus, das zu 99 % aus Methan und Kohlendioxid besteht.

Das entstehende Deponiegas kann zur Energiegewinnung genutzt werden. Erfolgt keine gezielte Absaugung des Deponiegases kommt es zu unkontrollierten Migrationen, die zu Vegetationsschäden führen können oder aber zu explosiven Gemischen. Insbesondere bei Deponien mit Bebauung im näheren Umfeld kann dies, wie die Vergangenheit bereits gezeigt hat, zu gefährlichen Situationen führen.

2.4 Anmerkungen zur Datenerhebung und Dokumentation von Betriebsdaten

In der TAsi wird unter Punkt 6.4.3 für die Deponien die Führung eines Betriebstagebuchs gefordert. Die zur Zeit betriebenen Deponien sind durch die jeweiligen Vorgaben der Behörden zur umfassenden Dokumentation des Betriebsablaufes verpflichtet. Hinzu kommt, daß die Unterlagen bis zur Entlassung aus der Nachsorge aufbewahrt werden müssen. Vor Inkrafttreten der TAsi gab es im Bereich der Datenaufbewahrung keine detaillierten Regelungen. Die für den einzelnen Betreiber geltenden Regeln zur Datenaufbewahrung etc. wurden im Bescheid der zuständigen Überwachungsbehörde geregelt.

Im Rahmen des durch das BMBF geförderten Vorhabens "Abschätzung der Restemissionen auf der Basis realer Überwachungsdaten von Deponien in der Betriebs- und Nachsorgephase" wurden bis weit über 100 kommunale und private Deponiebetreiber um ihre Mithilfe gebeten. Durch das Führen von Vorgesprächen konnte in jedem Einzelfall festgestellt werden, ob die jeweilige Deponie für diese Untersuchung geeignet war oder nicht. Der häufigste Grund für die Nichteinbeziehung einer Deponie war die unvollständige Dokumentation der Deponiedaten in der Vergangenheit. Bei der Datenerfassung auf bereits ausgewählten Deponien kam es in einigen Fällen ebenfalls zu Problemen mit der teilweise unzureichenden Archivierung von Deponiedaten bei einigen kommunalen und privaten Deponiebetreibern.

Eine Schwierigkeit für die Datenerhebung bei den nicht mehr betriebenen Deponien ist, daß es zur Zeit noch nicht überall zum "Stand der Technik" gehört, alle verfügbaren Daten auf einem Datenträger zu verwalten. Wird eine EDV gestützte Datenverarbeitung vorgenommen, so werden häufig nur die Daten der letzten 2 bis 3 Jahre in die Betrachtungen mit einbezogen. Die übrigen Daten werden für den gegenwärtigen Deponiebetrieb möglicherweise als irrelevant

angesehen. Informationen, die durch die langfristige Beobachtung von Sickerwasser und Deponiegas erhalten werden könnten, bleiben unberücksichtigt.

Bei einigen älteren Deponien bestand teilweise das Problem, daß altersbedingt das Personal in den letzten Jahren gewechselt hat, so daß Zeitzeugenaussagen bei diesen Deponien, über die insgesamt wenig bekannt ist, nur noch vereinzelt möglich waren. Auf Grund dieser Umstrukturierungsprozesse und auch durch die zunehmende Aufteilung verschiedener Aufgaben in diesem Bereich kann es zu einem Bruch in der Dokumentationsstruktur dieser Deponien kommen. Weitere Beispiele für Probleme bei der Dokumentation von Daten sind die Verteilung der älteren Daten auf mehrere Mitarbeiter, die Archivierung der Daten, das nicht mehr Auffinden von Daten oder generell das nicht mehr Vorhandensein der älteren Deponiedaten.

Insgesamt bleibt festzustellen, daß eine umfassende Dokumentation der Betriebsdaten dazu beitragen kann, auftretende Probleme schneller zu erkennen und ihnen gezielter entgegen zu wirken, da bei regelmäßiger Dokumentation und Fortführung der Datenaufzeichnungen Abweichungen schneller auffallen und dementsprechend effektivere Ursachenforschung betrieben werden kann. In vielen Fällen finden aber nur minimale Auswertungen der Überwachungsdaten statt, häufig werden sie lediglich archiviert oder die Darstellung erfolgt lediglich über einen Beobachtungszeitraum von 1 bis 2 Jahren. Somit stellen für einige Deponien die hier vorliegenden Auswertungen die ersten langfristigen Aufzeichnungen dar. Es liegt trotz der Erhebung von Deponiedaten in vielen Fällen kein wirklich abrufbares Basiswissen über diese Deponien vor. Der Aufwand dafür ist, wie diese Datenerhebung gezeigt hat, häufig auch sehr hoch, da hierzu alle Daten seit dem Betriebsbeginn erforderlich sind, die in vielen Fällen naturgemäß gar nicht vorhanden sind oder nur sehr mühsam recherchiert werden müssen.

3 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens wird das Emissionsverhalten von Deponien, die mit Siedlungsabfall verfüllt wurden, auf der Basis der Überwachungsdaten aus der Betriebs- und Nachsorgephase dargestellt. Bei den hier untersuchten Deponien handelt es sich noch um Anlagen, die nahezu das gesamte Abfallspektrum umfassen - Sonderabfälle ausgenommen. Hierzu gehören vor allen Dingen Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Bauschutt und Boden, aber auch z. T. Rückstände aus der Müllverbrennungsanlage oder Klärschlamm. Zudem werden Prognosen für das zukünftige Deponieverhalten erstellt. Die folgenden Auswertungen stützen sich auf 51 der 53 Deponien. Von zwei Deponien waren trotz intensiver Bemühungen keine für die hier vorgenommene Auswertung verwertbaren Daten erhältlich. Von den verbliebenen verfügen 27 sowohl über Sickerwasser- als auch Gasdaten. Von 12 Deponien stehen lediglich Sickerwasserdaten, aber keine Gasdaten zur Verfügung. Bei weiteren 12 Deponien liegen nur Gasdaten vor.

3.1 Sickerwasserqualität

In Tab. 5 bis Tab. 8 sind die Mittelwerte der Konzentrationen einzelner Sickerwasserparameter für die Zeitintervalle 1-5 Jahre, 6-10 Jahre, 11-20 Jahre und 21-30 Jahre dargestellt. Die einzelnen Konzentrationsverläufe der Sickerwasserparameter sind im Anhang 1 abgebildet. Anhand der Daten in den Tabellen sind die für die unterschiedlichen Zeiträume charakteristischen Konzentrationen der Parameter ablesbar und beim Vorliegen ähnlicher Randbedingungen auf andere Deponien übertragbar. Daten sehr alter Deponien und Daten von Deponien mit hohem Inertstoffanteil blieben hierbei unberücksichtigt.

Bei der Angabe der jeweiligen parameterspezifischen Minima fanden sehr stark von der Masse abweichende Werte keine Berücksichtigung, da sie keine Aussage über das zu erwartende Deponieverhalten beinhalten. Es ist unklar worauf sie zurückzuführen sind. Dieses Phänomen allein auf eine fehlerhafte Probenahme zu reduzieren, erscheint auf Grund ihrer Prozentanteile (ca. 2-5 %) und ihrer Präsenz in allen Zeitintervallen als nicht ausreichend. Die genauen Gründe und Ursachen für den jeweiligen Einzelfall bleiben offen. Somit kann beim Vergleich der Sickerwasseranalysen aus mehreren Jahren mit einzelnen sehr geringen Konzentrationen gerechnet werden, allerdings bedeutet das vereinzelt Auftreten geringer Konzentrationen nicht gleichzeitig, daß auch weiterhin mit geringen Konzentrationen gerechnet werden kann.

Erwartungsgemäß werden in den ersten Jahren der Ablagerung bei dem überwiegenden Anteil der Parameter die höchsten Konzentrationen ermittelt. Insbesondere die Konzentrationen des CSB und des BSB₅ sind auf Grund der gelösten organischen Säuren und weiterer Verbindungen deutlich erhöht. Ausnahmen bilden einige Ionen und die Stickstoffverbindungen. Die Stickstoffkonzentrationen zeigen erst in den darauffolgenden Jahren eine deutliche Erhöhung. Die in Relation zu den übrigen Stoffen geringere Konzentration an Stickstoffverbindungen im Intervall 1-5 Jahre kann teilweise darauf zurückgeführt werden, daß Stickstoffverbindungen direkt wieder zum Aufbau neuer Bakterienmasse verwandt werden, z. B. Aminosäuren als Bausteine für Proteine. Erst nachdem die Bakterienpopulationen auf eine bestimmte Größe angewachsen sind, wird die Stickstoffkonzentration in einem höheren Maße ansteigen und im Sickerwasser ausgeschwemmt. Zudem ist ein leichter Anstieg des Nitrat- und Nitritgehaltes im Laufe der Zeit erkennbar, der allerdings nicht durch Reaktionen im anaeroben Abfallkörper erklärbar ist, sondern lediglich durch Sauerstoffzufuhr während der Beprobung oder der Analyse.

Weitere Ausnahmen bilden die Parameter Arsen und Bor. Die Arsenkonzentration steigt zu Beginn an, im zuletzt dargestellten Zeitintervall von 21-30 Jahren ist hingegen ein Rückgang zu erkennen. Die Borkonzentration nimmt mit zunehmendem Deponiealter zu, wobei auf Grund des vorangegangenen Verlaufs der Borkonzentration, die Erhöhung lediglich auf eine Einzeldeponie mit sehr hohen Werten zurückzuführen ist. Insgesamt sind auf Grund der vorliegenden Daten keine eindeutigen Tendenzen erkennbar.

Die Ionen Chlorid und Natrium werden langfristig aus dem Abfall ausgewaschen und unterliegen keinerlei nachweisbaren Retentionsmechanismen im Abfallkörper, sondern lediglich der Verdünnung.

Die Schwermetallkonzentrationen nehmen mit fortschreitendem Deponiealter ebenfalls ab. Der Grund liegt an dem sich ändernden Milieu und der davon abhängenden Löslichkeit der Schwermetallionen. Als Indikator dient der pH-Wert. Im stark sauren oder alkalischen Milieu ist die Löslichkeit der Schwermetallverbindungen am größten. Ansonsten liegen die Schwermetalle komplexiert vor. Diese Substanzen sind in Wasser nur schwer löslich, so daß die Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser unter den gegebenen Milieubedingungen gering sind. Ein stark saurer pH-Wert wurde bisher nur in der Anfangsphase der Ablagerung beobachtet, da dort auf Grund des Beginns der Umsetzungsprozesse von organischen Substanzen u. a. stark erhöhte Konzentrationen an organischen Säuren im Sickerwasser vorkommen.

Beim Vergleich der vorliegenden Daten mit früheren Datenauswertungen [KRUSE, 1994; ANDREOTTOLA, 1990; EHRIG, 1989] zeigt sich, daß insbesondere die Konzentrationen der Summenparameter CSB und BSB₅ zu Beginn der Verfüllung bei den hier untersuchten Deponien sehr viel geringer sind als bei älteren Deponien. Anhand der bereits Anfang der siebziger Jahre errichteten Deponie D5 kann dieses Verhalten anschaulich nachvollzogen werden (Anlage 1, Abb. 24ff.). Diese Entwicklung ist einerseits auf die Datenstruktur zurückzuführen. Aus den ersten 2 bis 3 Deponiejahren liegen weniger Daten vor als aus den folgenden. Somit sind die ersten Jahre mit den möglicherweise höheren Emissionen unterrepräsentiert. Andererseits ist der Hauptgrund für die Reduzierung der Sickerwasserkonzentrationen die veränderte Deponietechnik. Dünnschichteinbau (z. B. D1), Einbau der untersten Schicht aus vorgerottetem Material (z. B. D32), ungesteuerte Vorrötte infolge großer offener Flächen und geringer Abfallmengen (z. B. D7), technische Veränderungen des Deponiebetriebes, wie z. B. Vorzerkleinerung (D19,I) und nicht zuletzt die Zusammensetzung des abgelagerten Abfalls selbst haben dazu geführt, daß die hohen Sickerwasserbelastungen zu Beginn der Verfüllung eines neuen Deponieabschnittes auf ein geringes Maß zurückgegangen sind. Bei den übrigen Parametern herrscht eine relativ große Übereinstimmung vor. Größere Abweichungen sind bei einigen Parametern bei den Maxima und Minima zu beobachten. Außerdem wurde im Gegensatz zu den Auswertungen von KRUSE [1994] und EHRIG [1989] keine Einteilung in durch biologische Umsetzungsprozesse beeinflusste und unbeeinflusste Parameter vorgenommen, da das derzeitige eingeschränkte Wissen über die Umsetzungsprozesse im Deponiekörper eine solche Einteilung nicht rechtfertigen.

KUCKLICK ET AL. stellten 1996 die These auf, daß zum Nachweis der Stabilität von Deponien der Konzentrationsrückgang der Summenparameter CSB und BSB₅ allein nicht ausreicht. Auf Grund thermodynamischer Gesetzmäßigkeiten, die dazu führen, daß die im Abfall enthaltene Organik nach einem hierarchischen Prinzip abgebaut wird (siehe Skizze Abb. 8), seien weitere Parameter zur Charakterisierung notwendig. Als Indizien für einen weitestgehend stabilisierten Abfall werden ein relativ hoher Nitratgehalt (> 20 mg/l) und ein niedriger Eisengehalt (< 5 mg/l) im Sickerwasser genannt. Eine Erhöhung des Nitratgehaltes unter den anaeroben Bedingungen der Deponie erscheint jedoch fraglich. Die in den Tab. 5 bis Tab. 8 dargestellten Mittelwerte der Parameter Nitrat und Eisen zeigen, daß die von KUCKLICK ET AL. [1996] jeweils angegebene Konzentration auch nach bis zu 30 Jahren bei den untersuchten Deponien noch nicht erreicht wurde.

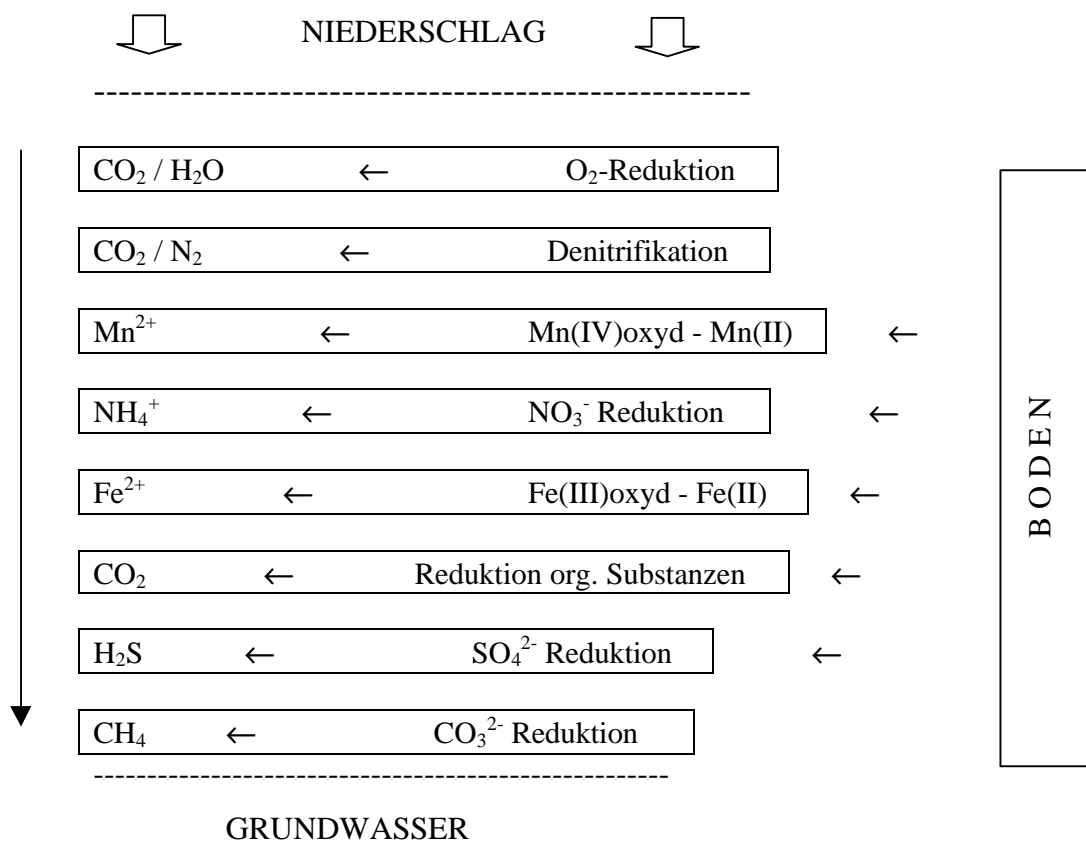


Abb. 8: Aerob und anaerobe metabiotische Mineralisierung des natürlichen Abfalls [nach KUCKLICK ET AL., 1996]

Tab. 5: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 1-5 einer Deponie bzw. eines neu eröffneten Abschnitts.

Parameter	Einheit	Mittelwert 1-5 Jahre	Maximum 1-5 Jahre	Minimum 1-5 Jahre	Anzahl der Deponien	Anzahl der Einzeldaten
pH-Wert	-	7,3	8,7	5,4	16	173
Leitfähigkeit	µS/cm	9280	23300	1370	15	172
CSB	mg/l	3810	22700	303	15	147
BSB ₅	mg/l	2285	16000	106	15	122
TOC	mg/l	1235	7725	159	12	104
NH ₄ -N	mg/l	405	7000	18	16	124
NO ₃ -N	mg/l	3,6	26	0,08	15	83
NO ₂ -N	mg/l	0,064	0,3	0,01	15	63
AOX	µg/l	2765	7500	452	7	21
Chlorid	mg/l	1300	11950	140	15	110
Sulfat	mg/l	98	400	19	13	83
Sulfid	mg/l	5,6	21	0,532	5	12
Natrium	mg/l	815	2200	112	11	51
Kalium	mg/l	1220	2200	240	5	27
Magnesium	mg/l	290	612	98	6	27
Calcium	mg/l	375	2290	46	12	48
Mangan	mg/l	3,9	43	0,055	13	63
Eisen	mg/l	50	550	0,1	14	83
Blei	mg/l	0,156	0,92	0,005	11	38
Zink	mg/l	1,1	24	0,02	14	67
Cadmium	mg/l	0,011	0,05	0,0002	10	30
Nickel	mg/l	0,199	1,4	0,02	13	56
Kupfer	mg/l	0,711	40	0,003	13	57
Chrom	mg/l	0,156	0,48	0,013	14	57
Arsen	mg/l	0,015	0,03	0,003	5	7
Bor	mg/l	5,9	15	0,4	5	15

Tab. 6: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 6-10 für die Deponie bzw. für einen neu eröffneten Abschnitt

Parameter	Einheit	Mittelwert 6-10 Jahre	Maximum 6-10 Jahre	Minimum 6-10 Jahre	Anzahl der Deponien	Anzahl der Einzeldaten
pH-Wert	-	7,5	8,7	6,4	26	300
Leitfähigkeit	µS/cm	12160	51400	1030	24	337
CSB	mg/l	3255	22500	194	26	359
BSB ₅	mg/l	1210	64880	20	26	192
TOC	mg/l	845	4930	65	20	219
NH ₄ -N	mg/l	600	2360	71,4	25	228
NO ₃ -N	mg/l	7,6	160	0,08	21	114
NO ₂ -N	mg/l	0,63	11,7	0,01	18	77
AOX	µg/l	1930	6200	282	15	104
Chlorid	mg/l	2135	28000	172	25	182
Sulfat	mg/l	146	1810	4	21	109
Sulfid	mg/l	6,1	47	0,04	11	30
Natrium	mg/l	1125	4700	146	17	90
Kalium	mg/l	910	1850	110	12	75
Magnesium	mg/l	205	1167	32	13	78
Calcium	mg/l	465	10000	44	19	105
Mangan	mg/l	2,5	95	0,12	21	90
Eisen	mg/l	29,5	1383	0,35	23	142
Blei	mg/l	0,056	0,317	0,005	18	61
Zink	mg/l	1,5	125	0,016	23	148
Cadmium	mg/l	0,0058	0,1925	0,0002	16	55
Nickel	mg/l	0,249	10,6	0,012	21	123
Kupfer	mg/l	0,115	3,3	0,002	19	91
Chrom	mg/l	0,224	2,57	0,02	21	114
Arsen	mg/l	0,021	0,097	0,002	13	58
Bor	mg/l	6	43	0,26	13	72

Tab. 7: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 11-20 für die Deponie bzw. für einen neu eröffneten Abschnitt

Parameter	Einheit	Mittelwert 11-20 Jahre	Maximum 11-20 Jahre	Minimum 11-20 Jahre	Anzahl der Deponien	Anzahl der Einzeldaten
pH-Wert	-	7,6	8,9	6,4	27	484
Leitfähigkeit	µS/cm	10610	40300	1100	27	536
CSB	mg/l	1830	29150	120	26	613
BSB ₅	mg/l	465	25800	10	26	397
TOC	mg/l	520	2600	41	24	339
NH ₄ -N	mg/l	555	2870	33	28	493
NO ₃ -N	mg/l	11,7	200	0,08	28	280
NO ₂ -N	mg/l	0,54	9,1	0,01	24	194
AOX	µg/l	1505	5300	130	25	242
Chlorid	mg/l	1760	13000	154	27	404
Sulfat	mg/l	92,5	556	2,2	25	236
Sulfid	mg/l	2	40	0,04	11	27
Natrium	mg/l	905	4400	100	25	190
Kalium	mg/l	695	1900	100	21	119
Magnesium	mg/l	145	593	50	20	119
Calcium	mg/l	325	5000	12	25	196
Mangan	mg/l	1,1	38,4	0,05	25	174
Eisen	mg/l	16,5	825	0,56	26	288
Blei	mg/l	0,067	1,3	0,005	21	150
Zink	mg/l	0,53	43,5	0,01	26	309
Cadmium	mg/l	0,0039	0,07	0,00013	19	110
Nickel	mg/l	0,135	1,93	0,007	26	233
Kupfer	mg/l	0,062	1,03	0,0025	26	187
Chrom	mg/l	0,164	1,16	0,006	26	240
Arsen	mg/l	0,042	0,37	0,001	20	119
Bor	mg/l	5,6	18	0,36	18	91

Tab. 8: Mittelwerte, Maxima und Minima der Sickerwasserkonzentrationen einzelner Parameter für die Jahre 21-30 für die Deponie bzw. für einen neu eröffneten Abschnitt

Parameter	Einheit	Mittelwert 21-30 Jahre	Maximum 21-30 Jahre	Minimum 21-30 Jahre	Anzahl der Deponien	Anzahl der Einzeldaten
pH-Wert	-	7,7	9	7,0	5	100
Leitfähigkeit	µS/cm	12930	109000	1602	5	117
CSB	mg/l	1225	6997	123	5	147
BSB ₅	mg/l	290	1100	12	6	95
TOC	mg/l	475	1120	35	5	39
NH ₄ -N	mg/l	445	1571	66,5	6	105
NO ₃ -N	mg/l	9,2	64	0,113	6	61
NO ₂ -N	mg/l	0,84	7,18	0,036	6	54
AOX	µg/l	1130	5600	130	4	117
Chlorid	mg/l	1025	2880	157	6	76
Sulfat	mg/l	83	490	5,2	6	101
Sulfid	mg/l	1,1	4,8	0,04	3	14
Natrium	mg/l	645	1500	74	6	41
Kalium	mg/l	595	1268	97	5	24
Magnesium	mg/l	115	221	43	5	30
Calcium	mg/l	155	863	71	6	50
Mangan	mg/l	0,91	5,7	0,21	6	34
Eisen	mg/l	12,5	189	0,4	6	47
Blei	mg/l	0,034	0,19	0,005	5	20
Zink	mg/l	0,538	9	0,05	6	98
Cadmium	mg/l	0,0028	0,018	0,0002	6	21
Nickel	mg/l	0,115	0,348	0,008	6	87
Kupfer	mg/l	0,036	0,27	0,004	6	51
Chrom	mg/l	0,177	1,62	0,005	6	94
Arsen	mg/l	0,036	0,182	0,0026	5	33
Bor	mg/l	9,1	58	0,96	5	20

In Tab. 9 sind die unteren Grenzwerte für die unterschiedlichen Parameter angegeben. Diese wurden in Anlehnung an die DIN Vorschriften [DIN] festgelegt, so daß niedrigere Konzentrationen als diese mit großer Sicherheit nicht mehr als meßbar angesehen werden können und im Rahmen der Auswertungen unberücksichtigt bleiben. Insbesondere in der Sickerwassermatrix ist auf Grund der vielfältigen Störstoffe eine Analyse niedrigster Konzentrationen einer Einzelsubstanz als schwierig anzusehen.

Tab. 9: Bestimmungsgrenzen

Parameter	Bestimmungsgrenze
CSB	> 15 mg/l
BSB5	> 5 mg/l
Chlorid	> 10 mg/l
AOX	≥ 20 µg/l
TOC	≥ 10 mg/l
Leitfähigkeit	> 500 µS/cm
NH4	≥ 0,5 mg/l
N-NH4	≥ 0,4 mg/l
Nges	> 10 mg/l
NO3	≥ 0,1 mg/l
N-NO3	≥ 0,02 mg/l
NO2	≥ 0,01 mg/l
N-NO2	≥ 0,003 mg/l
pH-Wert	-
Zink	> 0,005 mg/l
Blei	≥ 0,005 mg/l
Eisen	> 0,05 mg/l
Nickel	≥ 0,005 mg/l
Kupfer	> 0,001 mg/l
Cadmium	> 0,0001 mg/l
Chrom	≥ 0,005 mg/l
Sulfat	> 1mg/l
Sulfid	≥ 0,04 mg/l
Bor	> 0,1 mg/l
Calcium	> 10 mg/l
Magnesium	> 10 mg/l
Kalium	> 10 mg/l
Natrium	> 10 mg/l
Mangan	> 0,01 mg/l
Arsen	≥ 0,001 mg/l

3.1.1 Darstellung von Sickerwasserkonzentrationsverläufen einzelner Deponien

Die Einteilung der Deponien in Gruppen erweist sich auf Grund der Tatsache, daß eine Variation der Parameterkonzentrationen in einer bestimmten Bandbreite über die erfaßten Jahre als durchschnittlich angesehen werden muß, als schwierig. Diese Konzentrationsschwankungen sind zum Großteil auf den zunehmenden Grad des mikrobiologischen Abbaus organischer Substanz zurückzuführen. Weitere Gründe können in der Veränderung der Wasserverhältnisse, z. B. durch die Aufbringung einer Abdichtung liegen. Unterschiede zwischen den einzelnen Deponien sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Heterogenität der eingebrachten Abfälle, den technischen Standard der einzelnen Deponien, den individuellen Deponieaufbau und nicht zuletzt auf unterschiedlich hohe geogene Hintergrundbelastungen (z. B. hohe Chloridkonzentration der Deponie D37I-II) zurückzuführen. Diese Faktoren sind im nachhinein häufig nicht mehr zu ermitteln, insbesondere wenn im Laufe des Deponiebetriebs die Einbautechnik mehrfach verändert wurde und sich die Effekte der einzelnen Einbaumethoden überlagern. Zudem fehlen bei vielen Altdeponien Überwachungsdaten aus den Anfangsjahren, so daß Aussagen zur Dauer der sauren Phase in diesen Fällen spekulativ sind. Somit ist die Einteilung der Deponien in die unterschiedlichen Gruppen nicht als starres Element zu sehen, sondern als Hilfsmittel, um die Deponien unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachten zu können.

Insgesamt konnten die Deponien in 5 Gruppen unterteilt werden:

1. Deponien mit kurzer saurer Phase und geringen Schwermetallkonzentrationen
2. Deponien aus dem ländlichen Raum, Anfang der Verfüllung in den 60er und 70er Jahren, mit ausgeprägter saurer Phase und hohem Retentionsvermögen
3. Deponien mit zumindest zeitweiliger Sickerwasserrückführung
4. Deponien mit einem vermuteten Fremdwassereinfluß und dementsprechend geringeren Sickerwasserkonzentrationen
5. Deponien mit hohen anorganischen Sickerwasserbelastungen, die in den meisten Fällen auf den Einbau von Industrieabfällen oder MVA-Schlacken zurückzuführen sind

In Tab. 10 sind die einzelnen Deponien den Gruppen zugeordnet worden. Im Anhang 1 sind die Sickerwasserkonzentrationsverläufe der verschiedenen Parameter für jede Deponie auf insgesamt 311 Abbildungen dargestellt worden. Auf eine detaillierte Beschreibung dieser Kurven wird verzichtet. Statt dessen werden innerhalb des Berichtes nochmals Einzelbeispiele angeführt,

die im Rahmen der Auswertungen entweder stellvertretend für eine Gruppe dargestellt werden oder aber Besonderheiten aufweisen. Anhand dieser werden einerseits die möglichen Auswirkungen bestimmter Abfälle auf das Sickerwasser dargestellt, andererseits werden aber auch Abweichungen vom durchschnittlichen Deponieverhalten dokumentiert.

Tab. 10: Einteilung der Deponien in Gruppen gemäß ihrer Sickerwasserbelastung. 15 der 53 Deponien fehlen in dieser Tabelle, da von ihnen keinerlei Angaben zum Sickerwasserverhalten vorliegen. Bei einigen Deponien liegen Sickerwasserdaten nur aus Teilbereichen vor, z. B. D19II.

Gruppe	Deponien im Bund	NRW Anzahl
1	D7, D10, D11, D13, D15, D17, D19II, D21, D22, D37I-II, D39II, D40, D44I-III, D46, D47I-II, D48, D49	9
2	D1, D5I-IV, D6, D16, D31	6
3	D32, D34, D51	-
4	D4I-II, D8I, D12, D14I-II, D24, D25, D26, D27, D28, D29, D35, D36, D38, D39I, D43, D45	3
5	D8II, D9	3

Die Eingruppierung erfolgte bei den Deponien auf der Grundlage der Sickerwasserqualitätsdaten aus der Überwachung und der jeweiligen Historie der Deponien. Auf eine weitreichendere Eingruppierung in Untergruppen etc. wurde verzichtet, da sie für nicht zielführend gehalten wird. Ein Beispiel für eine andere Art der Einteilung von Deponien wurde in der britischen Deponiestudie "A Review of the Composition of Leachates from Domestic Wastes in Landfill Sites" [ROBINSON ET AL., 1995] vorgenommen. Hier wurden die untersuchten Deponien in 11 Kategorien eingeteilt, die weniger das Verhalten berücksichtigten als vielmehr die jeweilige Deponiegröße und die geschätzte Abfallfeuchte. Die Zielsetzung war eine Dokumentation des Ist-Zustandes der britischen Deponien. Sowohl in der britischen Studie als auch bei den vorliegenden Ergebnissen kommt es innerhalb der vorgegebenen Gruppen zu unterschiedlichen Ausprägungen des Emissionsverhaltens. Allerdings wird dadurch auch die Bandbreite der möglichen Emissionen bei ähnlichen Randbedingungen aber unterschiedlichem Abfall aufgezeigt.

Eine strenge Einteilung auf Grund eines festgelegten Normenkatalogs ist im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens nicht möglich, da die Überwachungsdaten für ein enges Raster bei vielen Deponien zu lückenhaft sind. Zudem ist das vornehmliche Anliegen der Untersuchung, Entwicklungstendenzen aufzuzeigen und nicht nur den statischen Ist-Zustand zu beschreiben.

3.1.1.1 D7 (Gruppe 1)

Die in der Gruppe 1 zusammengefaßten Deponien weisen keinen außergewöhnlichen, sondern den für die Mehrzahl der Deponien als am wahrscheinlichsten erachteten Sickerwasserkonzentrationsverlauf auf. Bei der Deponie D7 handelt es sich um eine über 6 Jahre lang hauptsächlich mit Hausmüll und hausmüllähnlichem Abfall verfüllte Deponie in einem eher ländlich geprägten Raum. Sowohl die Basis- als auch die Oberflächenabdichtung besteht aus mineralischem Material.

Die Deponie D7 durchläuft eine sehr kurze, wenig ausgeprägte saure Phase, in deren Verlauf der Jahresmittelwert des CSB auf maximal 3000 mg/l ansteigt (Abb. 9). Der etwas darüber hinaus liegende BSB₅-Jahresmittelwert weist darauf hin, daß der Höchstwert des CSB noch etwas höher lag. Insgesamt zeigen beide Summenparameter eine deutliche Abnahme über die Zeit. Dies gilt auch für die übrigen Parameter AOX, NH₄-N, Chlorid und die Schwermetallionen. Lediglich die NO₃-N-Konzentration zeigt im 11. Jahr einen spontanen einjährigen Anstieg, der sich retrospektiv nicht erklären läßt.

Der Parameter Eisen bewegt sich in einem Konzentrationsbereich von 250-1000 mg/l und die Sulfatkonzentrationen befinden sich im gesamten Überwachungszeitraum im Bereich ≤ 200 mg/l. Erwartungsgemäß erzielen die Parameter Eisen und Zink bei den Schwermetallen die höchsten Konzentrationen. Die Eisenkonzentrationen erreichen hierbei Maximalwerte von ca. 50 mg/l und die Zinkkonzentrationen von ca. 3 mg/l. Alle übrigen (siehe auch Anhang 1, Abb. 53 bis Abb. 58) Schwermetallkonzentrationen liegen deutlich darunter und zeigen ebenfalls einen kontinuierlichen Rückgang über die Zeit.

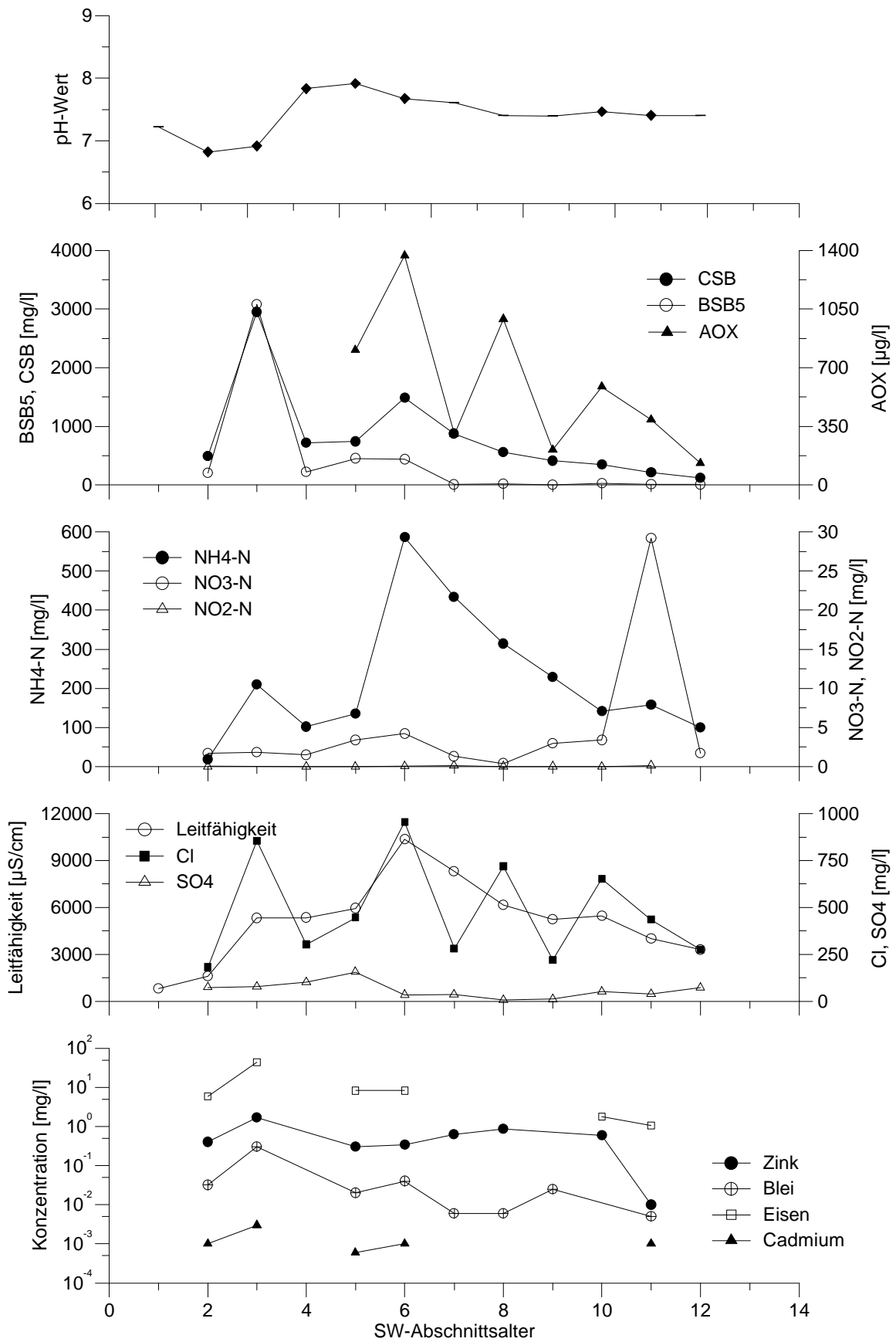


Abb. 9: Darstellung der Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie D7

3.1.1.2 D1 (Gruppe 2)

Bei der Deponie D1 handelt es sich um einen Altabschnitt einer noch betriebenen Deponie, der insgesamt über 11 Jahre verfüllt wurde. Der Verfüllungszeitraum erstreckt sich größtenteils über die siebziger Jahre, so daß der zur Ablagerung gelangte Abfall, typisch für die damalige Zeit, zumeist aus Hausmüll, Gewerbeabfall, Bauschutt, Boden und Sperrmüll besteht. Hinzu kommen große Mengen an Inertmaterialien zur Oberflächenabdeckung. Die Besonderheit dieser Deponie besteht darin, daß ein extremer Dünnschichteinbau mit 15 cm Lagen durchgeführt wurde. Hierbei wurde nach Untersuchungen von WIEMER [1982] nach Abzug der Inertmaterialien eine Abfalldichte von $1,18 \text{ t/m}^3$ erzielt. Für den damaligen Stand der Technik stellt dies eine extrem hohe Verdichtung dar. Zudem wurde im Rahmen der von Wiemer begleiteten Bohrungen Abfallproben entnommen, die beweisen, daß die Dichte über die Deponiehöhe gesehen im Gegensatz zu anderen Deponien relativ konstant ist. Der Grund hierfür liegt in der Überfahrhäufigkeit durch den Kompaktor. Diese betrug 30-40 Überfahrten.

Bei den dargestellten Sickerwasserkonzentrationen handelt es sich um Mittelwerte der einzelnen Abschnitte. Aus den Graphiken der Abb. 10 geht hervor, daß die CSB- und BSB₅-Konzentrationen anfangs unerwartet gering sind und erst im 9. Jahr ansteigen. Zu diesem Zeitpunkt wurden die bereits oben erwähnten Bohrungen durchgeführt. Die Folge war ein deutlich erhöhtes Auftreten von Sickerwasser, wobei die Mengen bis heute sehr gering sind. Möglicherweise infiltriert ein Teil des Sickerwassers über die nicht gedichtete Basis in den Untergrund. Die Untersuchung der Bohrprofile durch WIEMER [1982] erbrachte eine zusätzliche Information, die Temperatur der abgelagerten Abfälle lag im Bereich zwischen 10-30 °C. Vergleicht man die auf der Deponie D1 erhaltenen Werte mit Messungen anderer Deponien [WIRTZ ET AL., 1997; DERNBACH, 1982], so wird ersichtlich, daß die Temperatur schon ein deutliches Indiz für die geringere mikrobiologische Aktivität im Abfallkörper der Deponie D1 ist. In den übrigen Deponien liegen die Temperaturen zwischen 18 und 55 °C. Temperaturen zwischen 20 und 30 °C wurden von DERNBACH [1982] lediglich in den oberflächennahen Schichten ermittelt. Diese Aussage trifft auch auf die Ergebnisse von WIRTZ ET AL. [1997] zu, wobei hier das Alter der Proben eine zusätzliche Rolle spielte. Hingegen wurden Temperaturen unter 20 °C bei der Deponie D1 noch in 15 m Tiefe dokumentiert. Bei chemischen Prozessen wird davon ausgegangen, daß eine Temperaturerhöhung um 10 °C eine Verdopplung der Reaktionsgeschwindigkeit herbeiführt.

Parallel zum Eintrag von Niederschlagswasser steigen die Konzentrationen verschiedener Parameter um ein Mehrfaches an und der pH-Wert sinkt in den sauren Bereich (siehe Abb. 10). Erst ab dem 9. Jahr zeigen die Konzentrationsverläufe der Parameter einen für Deponien typischen Verlauf. Die Konzentrationen nehmen über das nächste Jahrzehnt deutlich ab. Hierbei stellt der Stickstoffhaushalt eine Ausnahme dar, da hier die Konzentrationen aus den bereits genannten Gründen zeitlich verzögert ansteigen und erst später abnehmen.

Die geschilderte Situation der Deponie D1 läßt möglicherweise Rückschlüsse auf das Deponieverhalten von abgedichteten Deponien nach Leckage zu. Allerdings muß bei einem Vergleich berücksichtigt werden, daß bei D1 bis zum Niederbringen der Bohrungen im 8. bzw. 9. Jahr wahrscheinlich noch kaum biologische Abbaureaktionen stattgefunden haben und die Stoffkonzentrationen deshalb besonders hoch sind. Diese Größenordnung ist für Deponien, die nach 20 Jahren abgedichtet werden und bei denen es dann zu Rissen in der Abdichtung kommt, eher unwahrscheinlich. Auf diesen Punkt wird in den Kapiteln 3.2, 5 und 6 nochmals eingegangen werden.

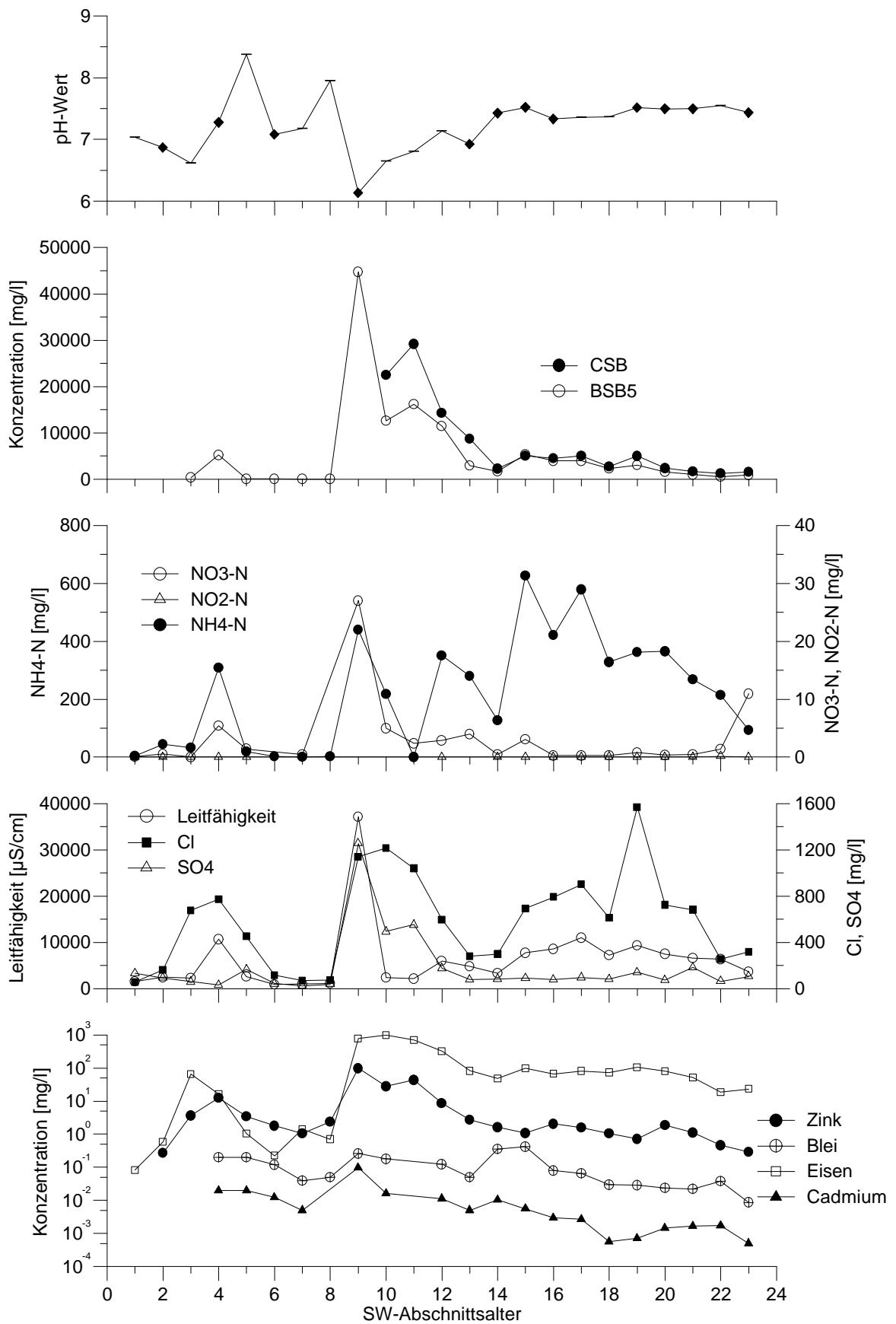


Abb. 10: Darstellung der Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie D1

3.1.1.3 NRW-Deponie A (Gruppe 2)

Die Deponie A ist ein Beispiel für das Verhalten der älteren Deponien, die in den siebziger Jahren begonnen und bis in die achtziger verfüllt wurden. Genaue Aufzeichnungen über die Abfallzusammensetzung liegen nicht vor. Der Hausmüllanteil wird auf 45 % und der Bauschutt und Gewerbeabfallanteil zusammen auf 55 % geschätzt. Die Basis besteht aus einer mineralischen Dichtung. Wie aus Abb. 11 zu ersehen ist, sind die Jahresmittelwerte der Anfangskonzentrationen des Summenparameters CSB relativ hoch. Ähnliche bzw. noch höhere Konzentrationen werden lediglich von den Deponien D1 nach Wasserzutritt und von den einzelnen Abschnitten I-IV der ebenfalls bereits in den siebziger Jahren begonnenen Deponie D5 erzielt.

Anhand des pH-Wertes ist zu ersehen, daß die saure Phase der Deponie A insgesamt 5 Jahre anhält. Die Stickstoffverbindungen weisen keine Besonderheiten in ihrem Verhalten auf. Die Leitfähigkeit ist anfangs erhöht. Worauf diese Erhöhung zurückzuführen ist, kann anhand der vorliegenden Daten nicht geklärt werden.

Die Schwermetallkonzentrationen sind vergleichsweise hoch. Insbesondere in den ersten Jahren kommt es zu hohen Zink- und Eisenkonzentrationen. Dies ist auf das lang anhaltende saure Milieu und die damit verbundene bessere Löslichkeit der Schwermetallionen zurückzuführen.

Diese Beispiele zeigen, daß die damalige Deponietechnik mit Raupeneinbau oder Leichtkompaktoren und zumeist hohen Schütthöhen zu einer langanhaltenden sauren Phase mit hohen organischen Belastungen im Sickerwasser führt. Allerdings kommt es bei der Deponie D1 ebenfalls zu einer ausgeprägten sauren Phase, da hier auf Grund des extremen Dünnschichteinbaus mit hoher Überfahrhäufigkeit und dem nachträglichen künstlich herbeigeführten Wasserdurchfluß die biologischen Umsetzungsprozesse erst verzögert in Gang kommen. Möglicherweise hätte die Deponie D1 ohne den künstlichen Eingriff bis heute geringste Sickerwasserbelastungen. Allerdings wäre das vorhandene Schadstoffpotential im Deponiekörper dann immer noch so hoch wie zum Zeitpunkt der Schließung dieses Abschnitts, denn es hätte keine signifikante Entfrachtung, weder über den Sickerwasser- noch über den Gaspfad, stattgefunden.

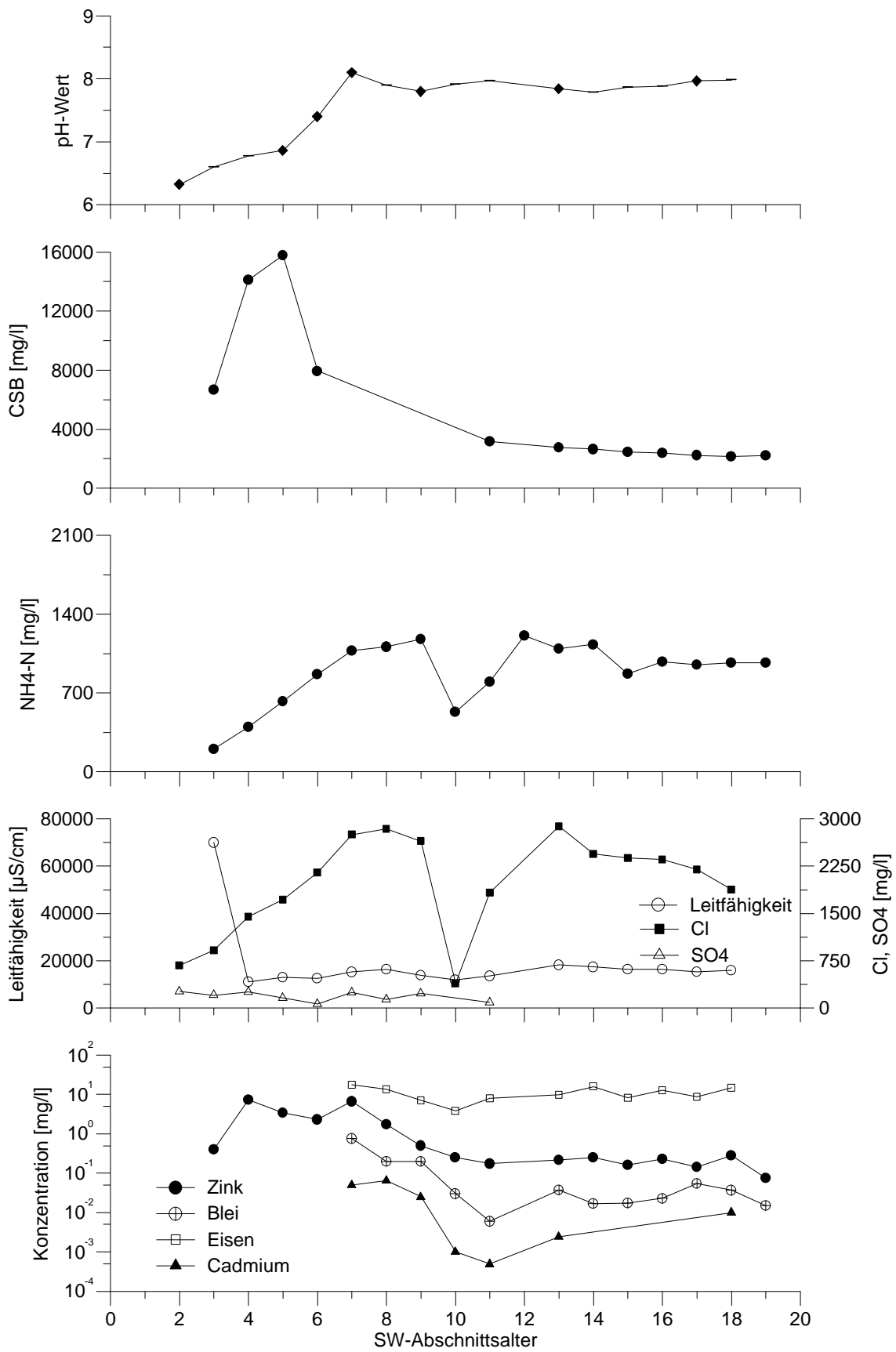


Abb. 11: Darstellung der Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie A

3.1.1.4 D34 (Gruppe 3)

Die Deponie D34 wurde größtenteils während der achtziger Jahre verfüllt. Die genaue Abfallzusammensetzung ist nicht bekannt, aber der Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle bilden den größten Anteil. Die Basis besteht aus einer dreilagigen mineralischen Dichtung. Die Oberflächenabdichtung ist ebenfalls mineralisch mit einem k_f -Wert von 10^{-9} m/s. D34 ist ein Beispiel für die Gruppe der Deponien auf denen eine diskontinuierliche Sickerwasserrückführung praktiziert wird.

Die qualitative Sickerwasserzusammensetzung der Deponie D34 zeichnet sich durch einen über eine Zeitspanne von 5 Jahren hohen CSB-Wert aus (Abb. 12). Während dieses Zeitraumes sind auch höhere Konzentrationen bei den Schwermetallen nachweisbar. Im Verlaufe der Zeit nehmen die Schwermetallkonzentrationen nahezu kontinuierlich ab. In letzten Jahren verharren sie fast auf dem erreichten Konzentrationsniveau. Der Konzentrationsrückgang ist auf die geringere Löslichkeit der Schwermetallionen im alkalischen Milieu zurückzuführen. Der pH-Wert befindet sich bereits seit dem 3. Jahr im leicht alkalischen Bereich.

Der überwiegende Teil der übrigen Parameter zeigt keine Konzentrationsabnahme wie bei den anderen Deponien, sondern verharrt z. T. auf dem hohen Anfangsniveau oder nimmt noch zu. Dies trifft insbesondere für die Parameter Leitfähigkeit, Chlorid, Natrium, Bor und die Stickstoffverbindungen zu. Leichte Abnahmen sind bei einigen Kationen (Calcium, Mangan, Magnesium) zu beobachten.

Die Konzentrationen der Summenparameter BSB₅, CSB und AOX hingegen weisen einen deutlichen Rückgang ihrer Konzentrationen auf, wobei dies für den BSB₅ und den CSB nur bis zum 10. Jahr zutrifft. Danach verharren beide Konzentrationen mit einer gewissen Schwankungsbreite auf ihrem erreichten Niveau.

Die ab dem 13. Jahr zu beobachtende Erhöhung der Nitratkonzentrationen ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf das Ansaugen von Luftsauerstoff durch Übersaugung des Deponiekörpers und die damit ermöglichte Nitrifikation zurückzuführen. Teile der Deponie wurden zwar bereits früher entgast, aber die umfassende Entgasung des Deponiekörpers begann erst nach Aufbringen der Oberflächenabdichtung. Möglicherweise erfolgte auch eine Erhöhung des Unterdruckes und eine damit einhergehende Luftansaugung von außen.

Insgesamt ist zu ersehen, daß die der Auswaschung unterliegenden Parameter durch die diskontinuierliche Sickerwasserrückführung auf ihrem Konzentrationsniveau verbleiben, bzw. sogar noch leicht aufkonzentriert werden. Die Parameter, die die biologischen Umsetzungsprozesse kennzeichnen, zeigen hingegen einen deutlichen Konzentrationsrückgang, scheinen sich dann allerdings auch zu stabilisieren. Die gestiegene Nitratkonzentration und die abnehmende Eisenkonzentration weisen ebenfalls auf eine zunehmende Stabilisierung hin. Langfristige Perspektiven können noch nicht aufgezeigt werden, da bis vor 5 Jahren die Deponie noch aktiv verfüllt wurde und somit noch ständig frischer Müll hinzugekommen ist.

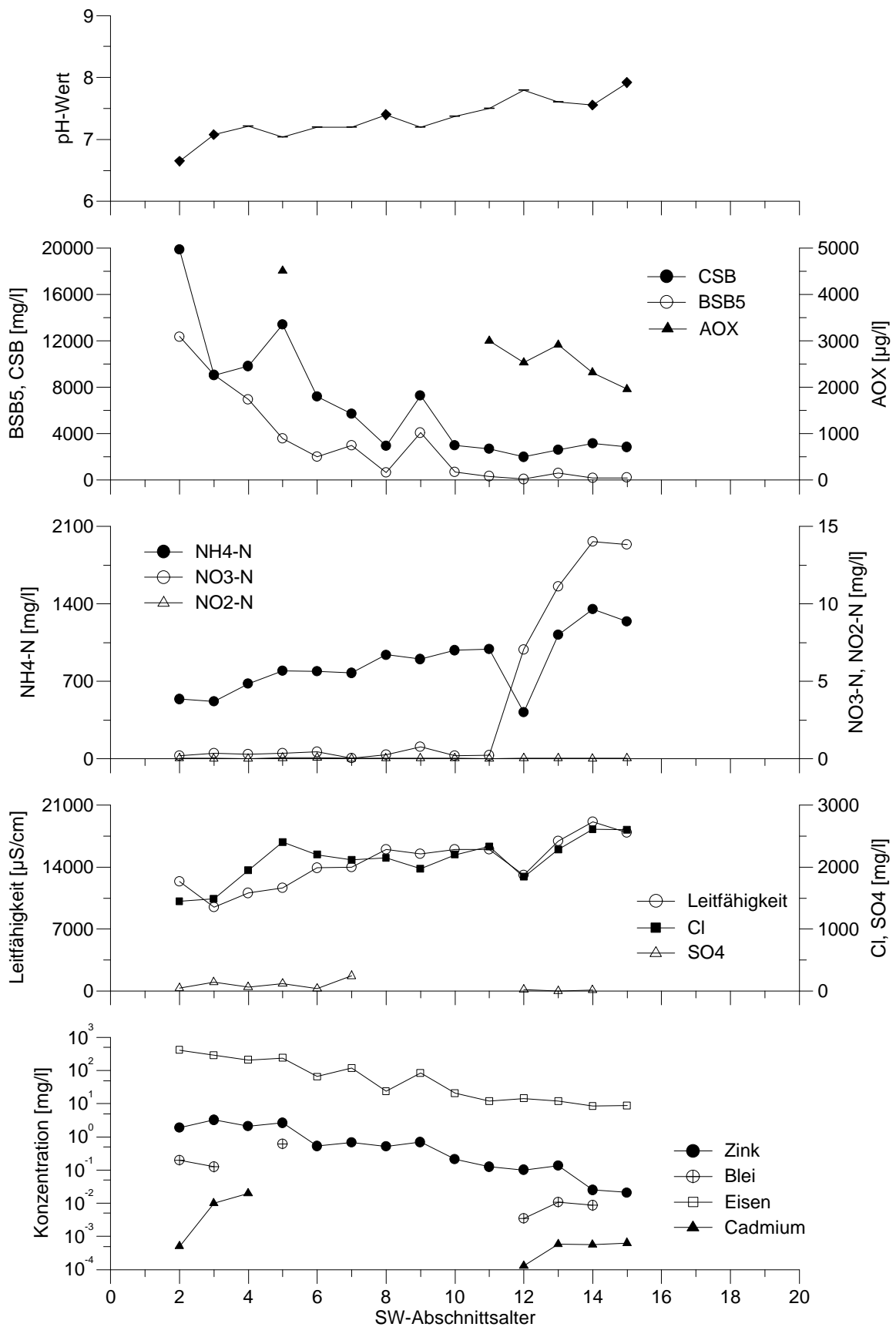


Abb. 12: Darstellung der Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie D34

3.1.1.5 D35 (Gruppe 4)

Bei der Deponie D35 handelt es sich um eine Deponie aus dem ländlich geprägten Raum. Der Abfall setzt sich wie folgt zusammen: 50 % Bauschutt, 20 % Hausmüll, 10 % Bodenaushub und jeweils 10 % Klärschlamm und Gewerbeabfall. Die Basis verfügt über keinerlei technische Barriere. Zudem wurde die Oberfläche noch nicht qualifiziert abgedichtet, sondern bisher lediglich mit einem Boden-Bauschutt-Gemisch temporär abgedeckt und z. T. noch mit einer Lage Ton versehen. Oberflächenwasser kann sich auf einem großen Teil der Deponie anstauen. Außerdem kann nicht ausgeschlossen werden, daß Oberflächenwasser in den Sickerwassersammler gelangt. Aus diesen Gründen gehört die Deponie zu der Gruppe der Deponien, bei denen eine Sickerwasserbeeinflussung vermutet wird. Dieser Aspekt wird anhand der stark schwankenden Konzentrationen der Sickerwasserparameter deutlich. Hier macht sich der jeweilige Einfluß des letzten Regenereignisses bemerkbar. Bei Trockenwetterlagen liegen die Konzentrationen höher als nach stärkeren Regenereignissen.

Anhand des pH-Wertes ist zu ersehen, daß sich die Deponie nicht mehr in der sauren Phase befindet, die starken Konzentrationsschwankungen (z. B. 21. und 22. Jahr) also weniger mit dem Milieu im Deponiekörper als vielmehr mit Auswaschungs- und Verdünnungsprozessen zu tun haben (Abb. 13).

Außerdem zeigt die Deponie in ihrem Sickerwasserverhalten eine weitere Besonderheit. Die Konzentration der Sulfationen ist ungewöhnlich hoch. Dies ist zum einen auf den hohen Bauschuttanteil zurückzuführen, zum anderen wird dieser Effekt durch die Boden-Bauschutt-Abdeckung noch verstärkt. Die Belastung des Sickerwassers mit Sulfat ist erst in den letzten Jahren stark zurückgegangen. Zuvor wurden Konzentrationen > 3000 mg/l gemessen. Zudem wurde im 25. Jahr eine hohe Konzentration an Nitrat-Stickstoff gemessen. Möglicherweise ist dies auf den Standort der Deponie in einem landwirtschaftlich genutztem Umfeld zurückzuführen und könnte mit der Beeinflussung des Sickerwassers durch Oberflächenwasser zusammenhängen.

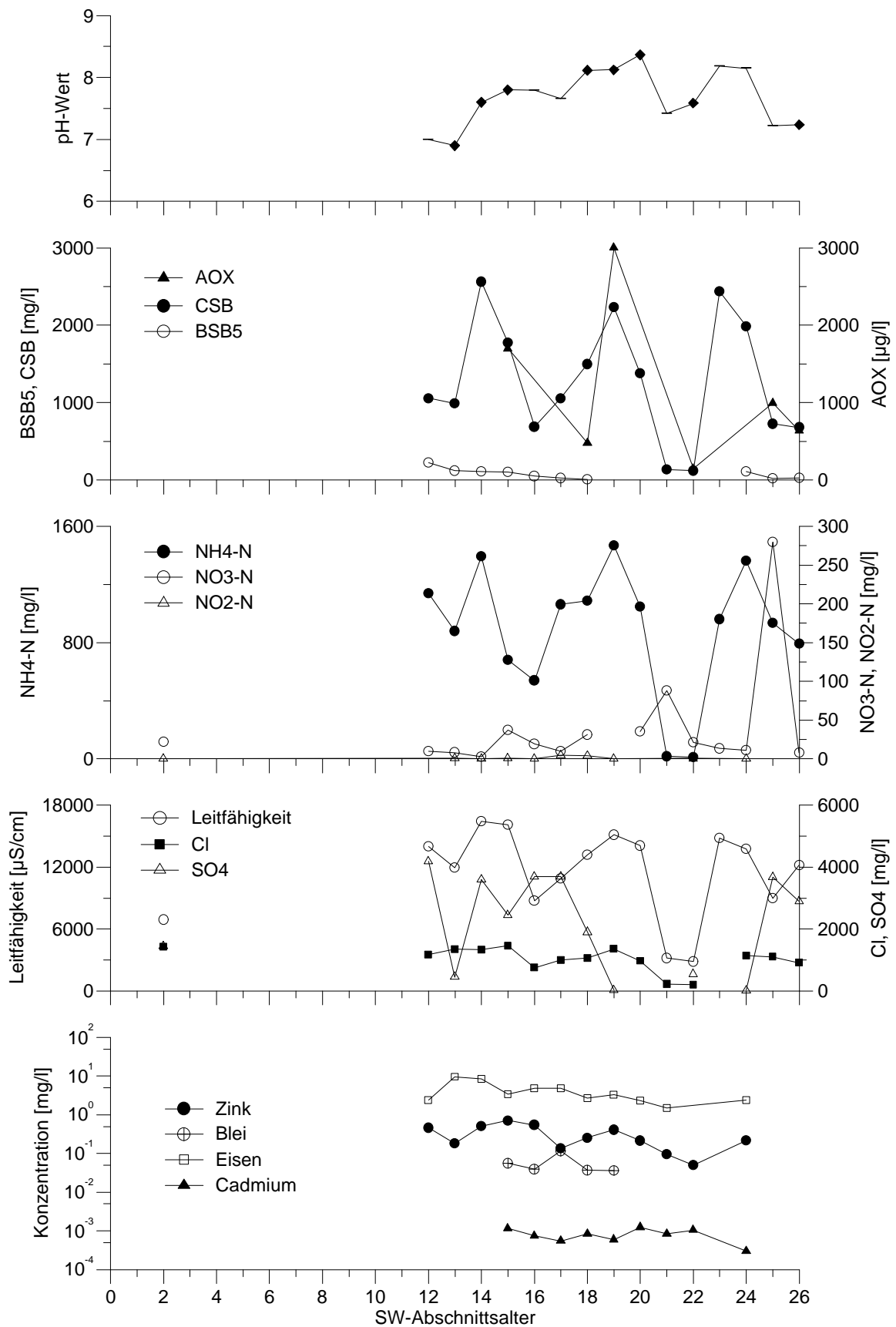


Abb. 13: Darstellung der Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie D35

3.1.1.6 D8II (Gruppe 5)

Bei D8II handelt es sich um einen einzelnen älteren Abschnitt einer Deponie, der hier näher betrachtet wird. Der Bereich ist Mitte der achtziger Jahre über einen Zeitraum von lediglich zwei Jahren verfüllt worden. 40 % der Abfälle sind Rückstände aus der Müllverbrennung, so daß das gefaßte Sickerwasser dadurch deutlich geprägt wird. Vom übrigen Abfall bildet Hausmüll den größten Anteil. Über die Basis liegen keine näheren Angaben vor. Wahrscheinlich besteht sie aus einer mineralischen Abdichtung. In Abb. 14 sind die Sickerwasserverläufe dargestellt. Statt der Schwermetallgehalte wurden die Kationenkonzentrationen der Nicht-Schwermetalle dargestellt, die deutlich erhöht sind. Insbesondere der Wert der Calciumkonzentration ist gegenüber den ermittelten Mittelwerten (Tab. 6 und 7) stark erhöht. Möglicherweise war die Karbonatisierung (Calcitbildung) in den Müllverbrennungsrückständen noch nicht vollständig abgeschlossen. Hierfür spricht auch der relativ niedrige pH-Wert. Er befindet sich auch im 13. Jahr noch im leicht sauren Bereich. Die CSB- und BSB₅-Konzentrationen verhalten sich, anders als bei anderen Deponien, hierzu konträr. Sie befinden sich auf einem sehr niedrigen Niveau. Dies liegt vor allen Dingen in der Art des Abfalls begründet. Die im Abfall enthaltenen Stoffe können obendrein eine mikrobiologische Umsetzung erschweren bzw. behindern. MC CARTY ET AL. [1961] (zitiert nach [SPENDLIN, 1991]) konnte eine toxische Wirkung von hohen Salzfrachten auf die Methangärung beobachten (aufsteigend nimmt die Toxizität zu: Ca → Mg → Na → K → NH₄).

Die z. T. ungewöhnlich hohen Ionenkonzentrationen spiegeln sich auch in der elektrischen Leitfähigkeit wider. Die Chloridkonzentration ist stark erhöht. Sie befindet sich in einem bis zu 7-fach höheren Konzentrationsbereich als der ermittelte Durchschnittswert (Tab. 7). Diese Effekte lassen sich eindeutig auf die Einlagerung der Schlacke zurückführen.

Die Schwermetallgehalte (siehe Anhang 1 Abb.70) entsprechen hingegen dem Konzentrationsniveau anderer Deponien. Ein nicht unbedeutender Anteil der Schwermetalle wird als schwerlösliche Karbonate gebunden vorliegen und dementsprechend nicht in Lösung gehen. Mit einer umweltrelevanten Freisetzung von Schwermetallen muß erst ab einem pH-Wert < 6,5 gerechnet werden. Einige Schwermetalle sind sogar erst ab pH 4 als mobil zu betrachten. Die Gefahr einer durch sauren Niederschlag bedingten Absenkung des pH-Wertes wird in der Literatur als äußerst gering eingeschätzt. Mit einer dadurch ausgelösten vermehrten Schwermetallmobilisierung wird, zumindest bei einer Monodeponie, erst in einigen tausend Jahren gerechnet [HUBER ET AL., 1998].

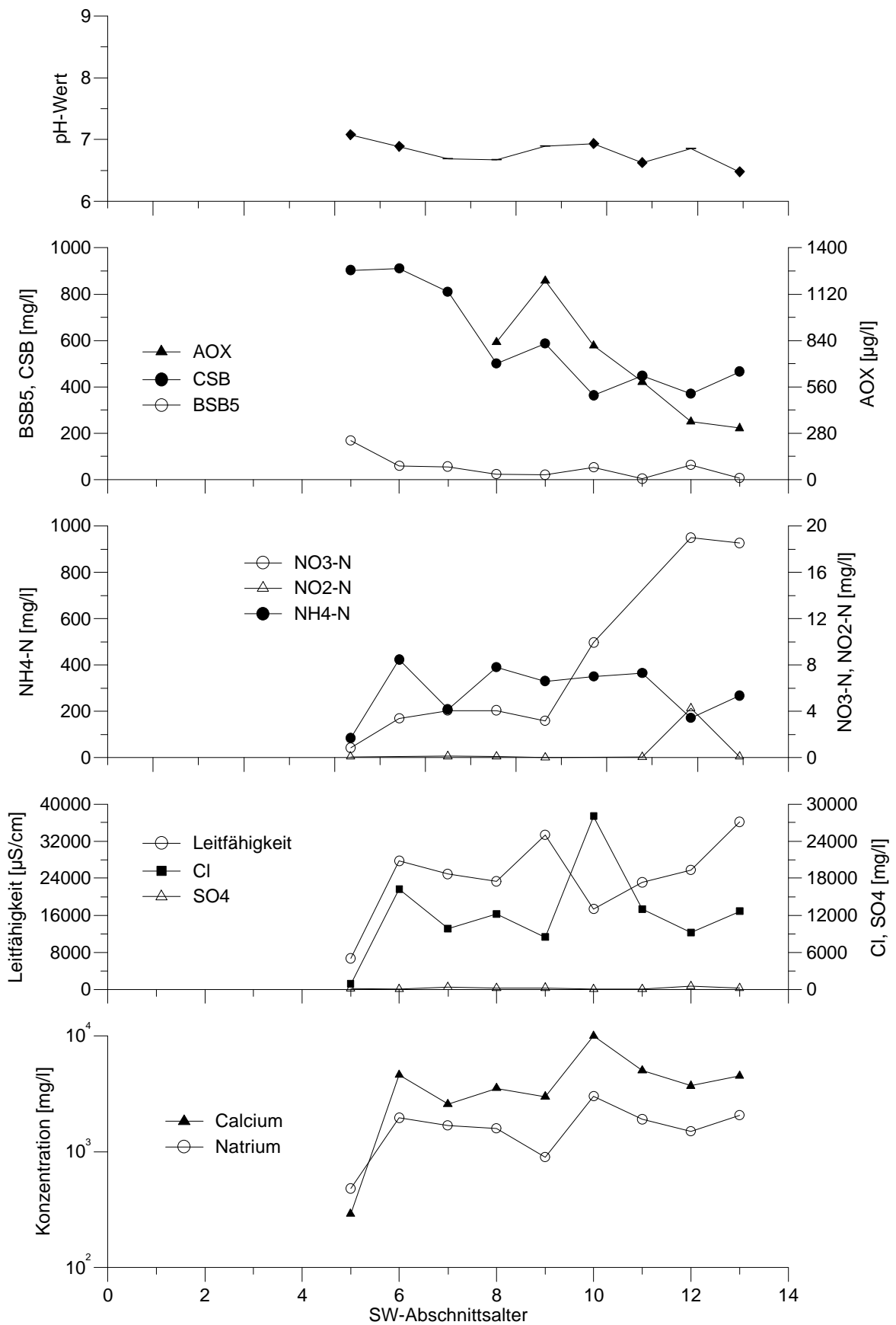


Abb. 14: Sickerwasserkonzentrationsverläufe der Deponie D8,II

3.1.1.7 Gegenüberstellung der vorgestellten Gruppen

Die Einzelbeispiele der 5 Gruppen geben einen Überblick über das Sickerwasseremissionsverhalten der Deponien aus den alten Bundesländern, die mit unvorbehandeltem Abfall und in Einzelfällen mit Rückständen aus der Müllverbrennung verfüllt wurden. Die Konzentrationsverläufe zeigen, daß in Abhängigkeit von den Standortfaktoren der überwiegende Teil der Emissionen über die Zeit rückläufig ist. Die Dauer der jeweiligen Nachsorgephase hinsichtlich der Emissionsquelle Sickerwasser hängt hierbei jeweils von den individuellen Voraussetzungen einer Deponie ab. Die zur Zeit gängige Praxis der Deponiebetreiber zur Kostenkalkulation von einer dreißigjährigen Nachsorgephase auszugehen, kann bereits anhand der hier dargestellten Daten als unzureichend widerlegt werden. Eine solch kurze Nachsorge wird bei der bisherigen Deponiepraxis die Ausnahme darstellen.

In Abb. 15 die CSB-Konzentrationsverläufe der einzelnen Gruppen nochmals gegenübergestellt worden. An den einzelnen Verläufen lassen sich die spezifischen Merkmale der Gruppen gut nachvollziehen. Zugleich werden aber auch die Grenzen der Eingruppierung sichtbar.

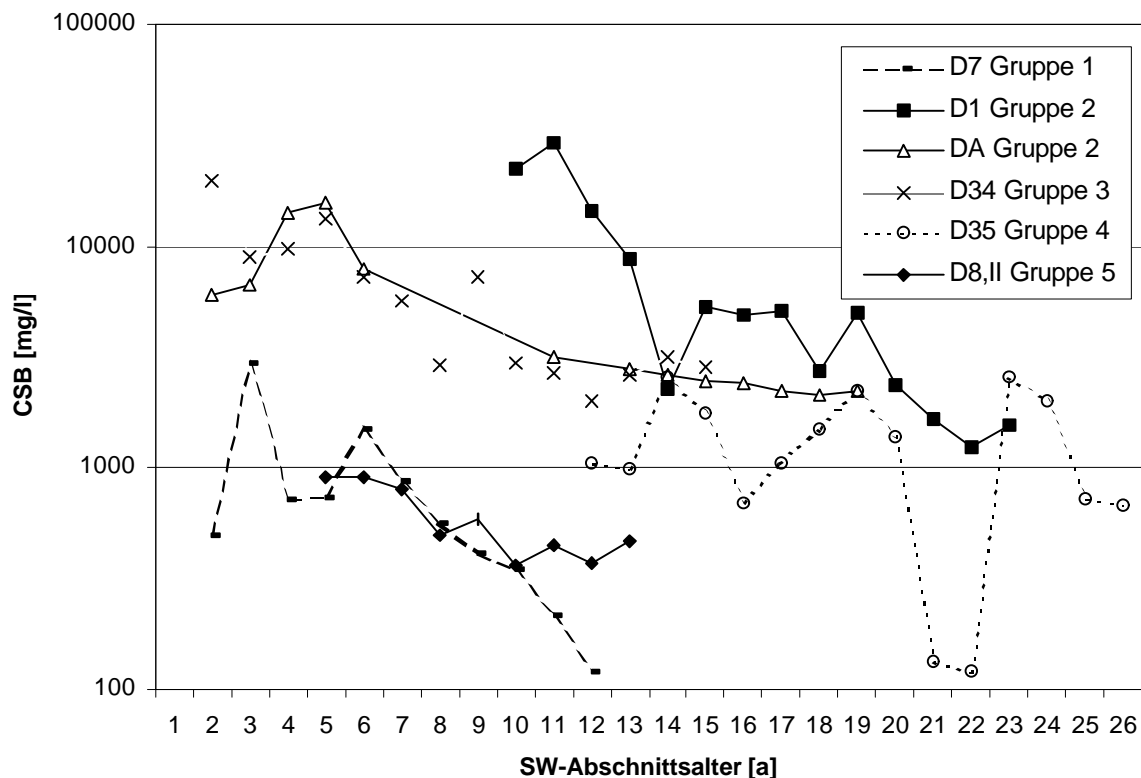


Abb. 15: Gegenüberstellung der CSB-Konzentrationsverläufe der einzelnen Gruppen

3.1.2 Sickerwasserparameter Arsen, PAK und PCB

Die Parameter Arsen, PAK (Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe) und PCB (Polychlorierte Biphenyle) stehen im begründeten Verdacht, sowohl kanzerogen als auch mutagen bei Mensch und Tier zu wirken. Ihr Auftreten ist nahezu ubiquitär. Arsen wurde früher sogar als Therapeutikum gegen die Syphilis oder Leukämie eingesetzt. Heute gibt es immer noch zahlreiche Anwendungen in der Industrie (Legierungsbestandteil, Elektroindustrie, Veterinärmedizin, Glasherstellung, Holzschutzmittel). PAK's kommen in organischen Brennstoffen und deren Verarbeitungsprodukten vor. PCB's findet man z. B. in Transformatorölen von Kondensatoren.

Der Gebrauch dieser Stoffe bzw. Stoffgemische wurde bereits in der Vergangenheit eingeschränkt. Trotzdem gelangen weiterhin belastete Stoffe im Rahmen der Abfallbeseitigung auf die Deponien. Daten zur Größenordnung dieser Substanzen im Abfall wurden im Rahmen des durch das BMBF geförderten Verbundvorhabens "Deponiekörper" erhoben [WIRTZ ET AL., 1997; BRINKMANN ET AL., 1997]. Zudem liegen Daten über die natürliche Verbreitung dieser Substanzen vor (siehe Tab. 11).

Tab. 11: Übersicht zur Verbreitung der Stoffe Arsen, PAK und PCB

Literaturstelle	Arsen	PAK	PCB
WIRTZ ET AL., 1997	0,0002-0,037 mg/l in Bohrloch- und Sickerwasser; < 0,01 mg/l im Feststoffeluat	-	-
BRINKMANN ET AL., 1997	-	Ca. 0,5-15,3 mg/kg (TVO) im Abfall	< 2 mg/kg im Abfall
WAHRENDORF, 1990	<0,01 mg/l im Trinkwasser	-	-
KOCH, 1989	0,2-40 mg/kg im Boden		
KRUSE, 1994	0,0053-0,110 mg/l im Sickerwasser	-	-
BAHADIR (HRSG) Umweltlexikon, 1995			1-10 ppb im Boden
TRINKWV	0,04 mg/l	0,0002 mg/l	0,0005 mg/l

Insgesamt gibt es nur sehr wenig Aussagen zur Konzentration dieser Stoffe und Stoffgemische in Sickerwässern von Siedlungsabfalldeponien. In der Abb. 16 sind die jeweiligen Jahresmittelwerte der Arsenkonzentrationen und in Abb. 17 die PAK- und PCB-Konzentrationen dargestellt. Auffällig ist, daß die PAK- und PCB-Werte außerhalb NRW's nur in 3 Analysen mitbestimmt wurden, hingegen im Rahmen der Studie in NRW 75 PAK- und 88 PCB-Analysen vorliegen.

Die Häufigkeit der Analysen ist vermutlich auf die industrielle Vorgeschichte des Bundeslandes NRW und der damit verbundenen Erwartung einer überdurchschnittlichen Verbreitung dieser Stoffe zurückzuführen. Diese Hypothes hat sich für die hier vorliegenden Analysen jedoch als unbegründet erwiesen.

Arsen wurde im Rahmen der NRW-Studie nicht mit erfaßt, deshalb liegen hier nur Werte aus den übrigen alten Bundesländern vor. Die Arsenkonzentrationen befinden sich in einem Konzentrationsbereich von 0,0015 mg/l und 0,3 mg/l (Abb. 16). Zum Großteil liegen die Werte hierbei unter dem Grenzwert der Trinkwasser-Verordnung (TrinkwV) von 0,04 mg/l. Allerdings ist über die Beobachtungsdauer der untersuchten Deponien oder der Deponieabschnitte keinerlei Abnahme der Konzentrationen zu erkennen. Diese Beobachtung wird durch Datenauswertungen von KRUSE [1994] an niedersächsischen Hausmülldeponien bestätigt. Im Rahmen dieser Auswertungen ergab sich ebenfalls keine Veränderung über die Zeit.

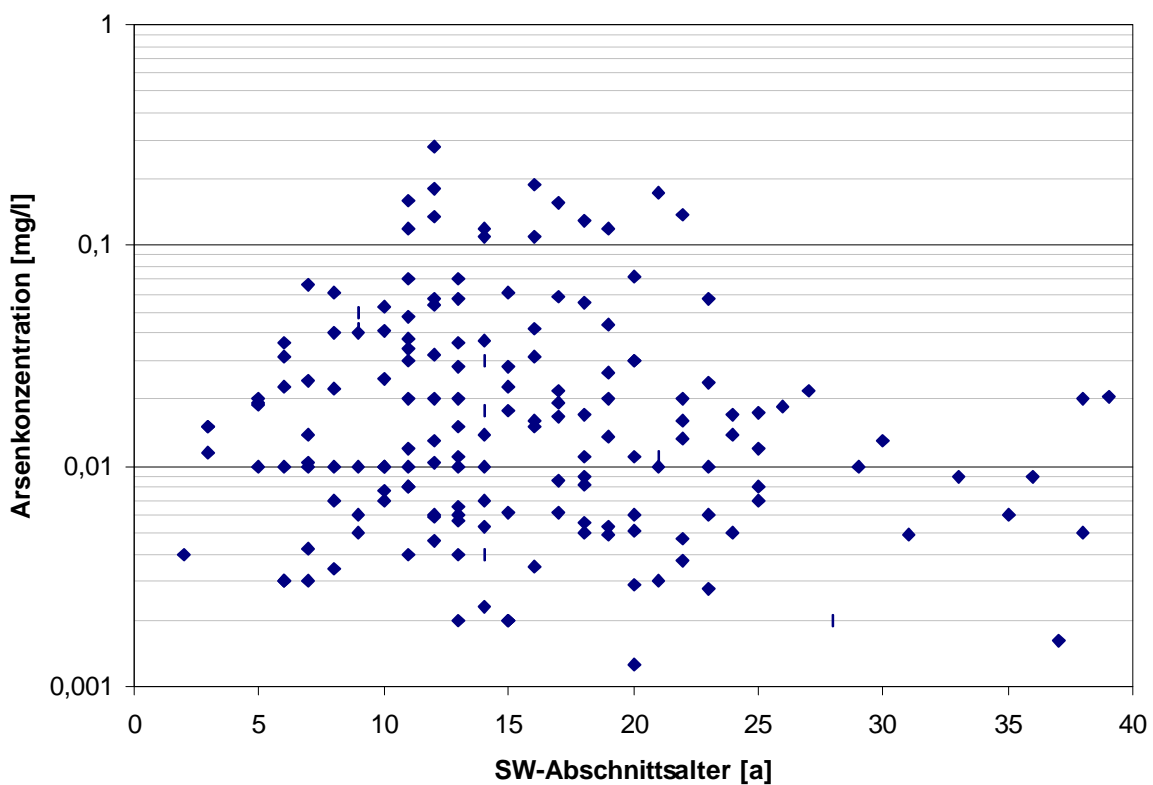


Abb. 16: Darstellung der Jahresmittelwerte der Arsenkonzentrationen im Sickerwasser (ohne NRW)

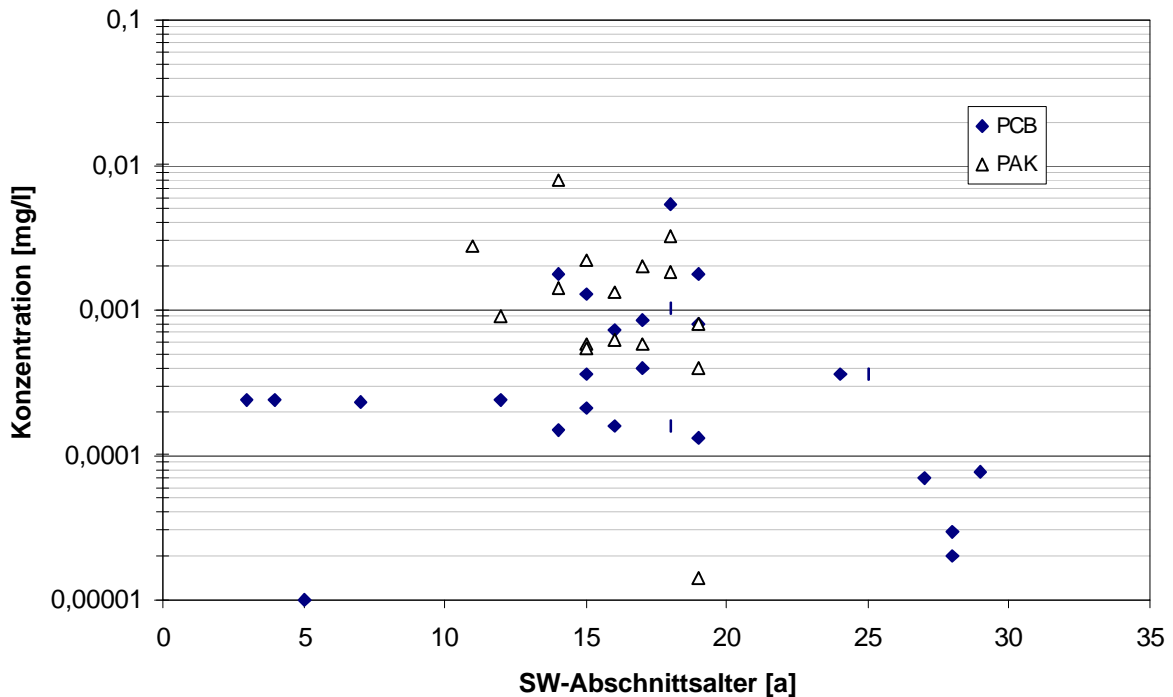


Abb. 17: Darstellung der Jahresmittelwerte der PAK- und PCB-Konzentrationen im Sickerwasser der NRW-Deponien

Die PAK- und PCB-Konzentrationen liegen alle unter 0,1 mg/l (Abb. 17). Allerdings befinden sich die meisten Werte deutlich über dem Grenzwert der TrinkwV von 0,0002 mg/l (PAK) bzw. 0,0005 mg/l (PCB). Analog zum Arsen ist auch beim PAK und beim PCB keine Konzentrationsänderung mit zunehmendem Deponiealter zu erkennen, sondern es herrscht eine gleichmäßige Konzentrationsverteilung über die Zeit vor. Allerdings ist die Schwankungsbreite der Parameter PAK und PCB höher als die von Arsen.

3.2 Sickerwasserquantität und Oberflächenabdeckung

Sickerwasser ist im Deponiekörper gebildetes Grundwasser. Die Sickerwassermenge wird nach Beendigung des aktiven Deponiebetriebes weitestgehend von der Art der Oberflächengestaltung einer Deponie bestimmt. Je nach Art und Qualität der Oberflächenabdeckung ist mit einem geringen oder hohen Sickerwasseraufkommen prozentual zum Niederschlag zu rechnen. Die Arbeiten von MELCHIOR [1993] auf der Deponie Georgswerder haben gezeigt, daß es auf den dortigen Testfeldern mit mineralischer Abdichtung infolge starker Austrocknungserscheinungen zu einer hohen Durchwurzelungsrate kam und im Zeitraum der beobachteten Jahre immer mehr Sickerwasser angefallen ist. Somit mußte die langfristige Haltbarkeit dieser Abdichtungen stark

in Frage gestellt werden. HÄMMERLE UND LOTTNER [1997] führten Aufgrabungen an bayerischen Deponien mit mineralischer Abdichtung durch. Dort konnten keine erheblichen Mängel festgestellt werden. Insbesondere die in Hamburg aufgetretenen Austrocknungsphänomene, die letztendlich zur Rißbildung in der Abdichtung führen, wurden nicht nachgewiesen. Allerdings wurde im Rahmen der Arbeiten an bayerischen Deponien auf die Bedeutung des Aufbaus und die Stärke der jeweiligen Rekultivierungsschicht hingewiesen. Möglicherweise war diese auf den Testfeldern der Deponie Georgswerder mit einer Mächtigkeit von ungefähr 1 m zu gering.

Für das Sickerwasseraufkommen während des Betriebes ist die gewählte Einbautechnik von ausschlaggebender Bedeutung. So wurden von EHRIG [1980] Abschätzungen veröffentlicht, bei der durch Raupeneinbau ca. 40% des Niederschlages als Sickerwasser anfällt und bei Kompaktoreinbau ca. 25 %. Bereits seit Mitte der achtziger Jahre ist der Kompaktor als Einbaugerät technischer Standard. Hinzu kommt, daß die Retentionsfähigkeit des Abfalls in den siebziger und achtziger Jahren möglicherweise auf Grund der Abfallstruktur und der zumeist geringen Abfalldichte höher war als beim heutigen Restabfall. Nur bei älteren Deponien kann ein deutliches Retentionsvermögen in den ersten Jahren der Verfüllung nachgewiesen werden, z. B. Deponie D31. Bei jüngeren Deponien ist dieser Effekt nicht mehr dokumentierbar.

Die Abb. 18 zeigt die Sickerwassermengenverläufe der einzelnen Deponien im Überblick. Insgesamt stehen die Sickerwassermengendaten von 23 Deponien der alten Bundesländer zur Verfügung. Zum Vergleich kommen noch die Auswertungen von 19 Deponien bzw. Abschnitten aus NRW hinzu. Die Schwankungsbreite der Sickerwassermengen nach Abschluß der Deponien bzw. nach Abschluß der betreffenden Abschnitte, auf denen das Sickerwasser erfaßt wurde, reicht von 0,5 - 20 m³/(ha*d). Die NRW-Deponien (ohne Abbildung) weisen sogar einen noch höheren Schwankungsbereich von bis zu über 30 m³/(ha*d) auf. Zurückzuführen ist dies auf eine einzelne Altdeponie, die einen enormen Zufluß von Fremdwasser verzeichnet. Aber auch in einigen anderen Fällen sind Fremdwasserzuflüsse nicht auszuschließen. Aber insgesamt sind Fremdwasserzuflüsse schwer verifizierbar.

In der Abb. 18 ist unverkennbar die im Vergleich zu den übrigen Deponien erhöhte Sickerwassermenge der Deponien D38 und D51 zu erkennen. Die hohen Sickerwassermengen sind bei D38 wahrscheinlich auf die Vermischung von Oberflächen- und Sickerwasser zurückzuführen. Auf der Deponie D51 wurde hingegen innerhalb der Jahre 1 und 2 im Deponiekörper anstehendes Sickerwasser aus der Deponie abgepumpt, so daß es dadurch zu ungewöhnlich hohen Men-

gen pro Zeitabschnitt kommt.

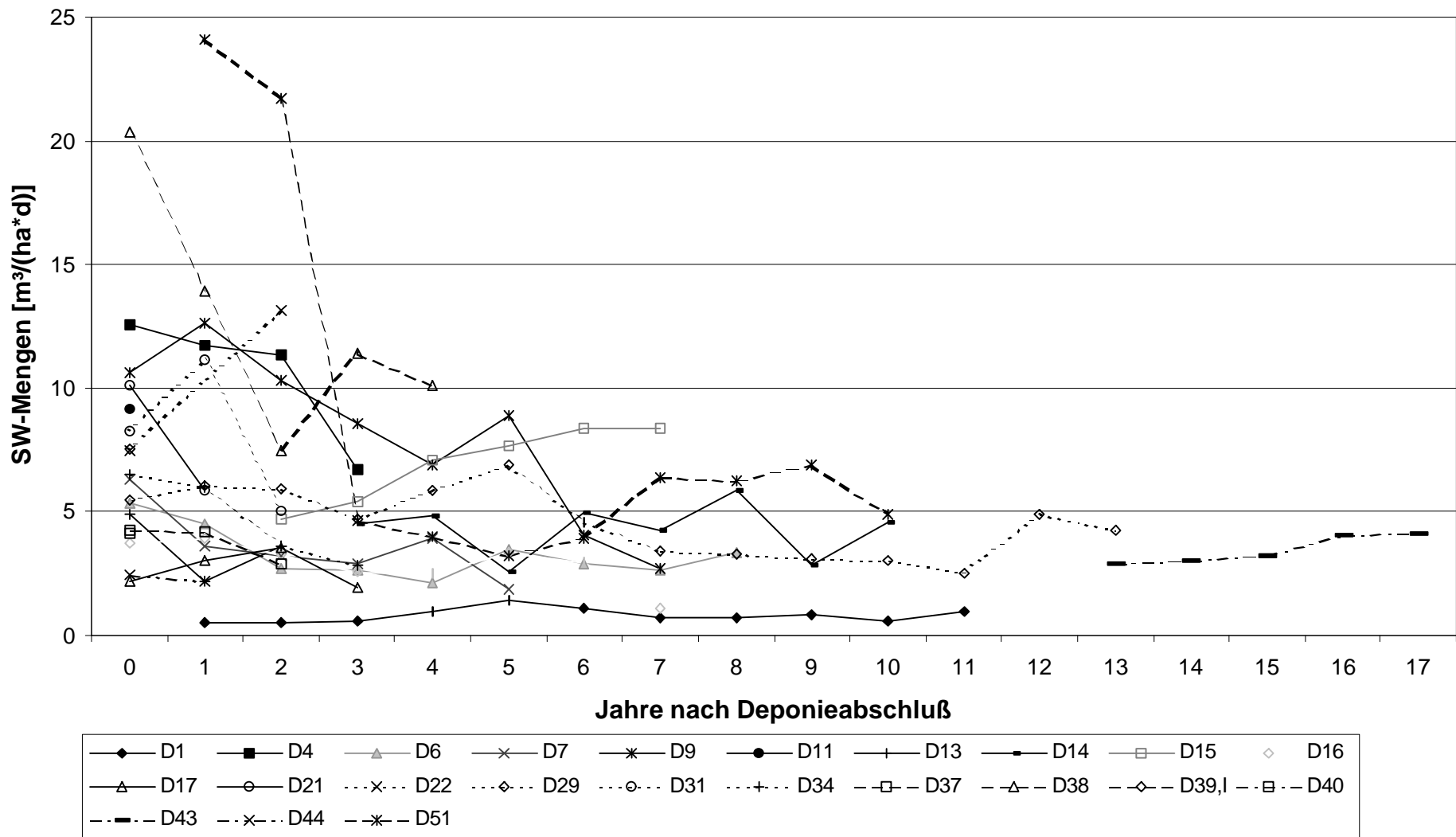


Abb. 18: Darstellung der Sickerwassermengenverläufe der einzelnen Deponien nach Deponieabschluß

Im Gegensatz dazu verfügt die Deponie D1 über sehr geringe Sickerwassermengen. Die Mengen schwanken zwischen 0,5 und 2 m³/(ha*d). Dies ist einerseits auf die Art der Abfallablagerung - auf der Deponie D1 wurde ein extremer Dünnschichteinbau vollzogen (Schichten à 15 cm) - und auf die hohe Überfahrhäufigkeit und die damit verknüpfte hohe Einbaudichte über die gesamte Abfallhöhe [WIEMER, 1983] zurückzuführen. Andererseits verfügt die Deponie über eine 2,80 - 3,40 m starke Bodenabdeckung. Allerdings ist das Sickerwasseraufkommen ungewöhnlich niedrig im Vergleich zu den anderen Deponien, so daß eine Infiltration von Teilen des Sickerwassers in den Untergrund nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Insgesamt läßt die nicht immer vorhandene oder nicht mehr funktionstüchtige Basisabdichtung bei einigen Objekten eine Sickerwasserinfiltration in den Untergrund als nicht unwahrscheinlich erscheinen. Allerdings ist diese These häufig nicht belegbar. Die einzige Möglichkeit zur Kontrolle bilden Grundwasserüberwachungsbrunnen im An- und Abstrom der Deponie. Auf Grund der vielfach sehr schwierigen Fließverhältnisse unterhalb und/oder in der unmittelbaren Umgebung von Deponien kann aber auch hierdurch keine hundertprozentige Sicherheit erlangt werden, da der Nachweis des Übertritts von Sickerwasser in den Untergrund nur in wenigen Fällen eindeutig geführt werden kann.

Die Mehrheit der in Abb. 18 dargestellten Deponien besitzt ein durchschnittliches Sickerwasseraufkommen von ca. 5 ± 2 m³/(ha*d). In den ersten Jahren nach Deponierungsende einer Deponie oder eines Abschnitts liegen die Mengen häufig noch deutlich über diesem Wert. Es kommt zu Schwankungen der Sickerwassermengen parallel zur Niederschlagsmenge. Der Grund ist eine noch nicht vorhandene Oberflächenabdeckung bzw. der noch fehlende Bewuchs der Rekultivierungsschicht. Dadurch können große Mengen des Niederschlages in den Abfallkörper versickern statt zu verdunsten bzw. von den Pflanzen aufgenommen zu werden.

In Tab. 12 sind die Deponien unterschiedlichen Arten von Oberflächenabdeckungen zugeordnet worden. Es wird deutlich, daß die Mehrzahl der Deponien über eine mineralische Abdichtung bzw. Abdeckung verfügen, die allerdings in ihrer Qualität deutliche Unterschiede aufweisen können. Die hier dargestellte prozentuale Verteilung der verschiedenen Oberflächenabschlüsse erscheint den Autoren als durchaus repräsentativ für die Lage der Altdeponien in den alten Bundesländern. Der Anteil der zu geringmächtigen Bodenabdeckungen als relativ hochwertig angenommenen mineralischen Abdichtungen ist möglicherweise sogar noch zu hoch.

Das Problem des Vergleichs der unterschiedlichen Abdeckungen und Abdichtungen miteinander liegt darin begründet, daß Oberflächenabdichtungen, wie z. B. die Kombinationsabdichtung oder Folienabdichtung, häufig bei Objekten aufgebracht werden, die über keinerlei Sickerwasserfassung verfügen, d. h. durch diese Maßnahme wird versucht, die Umweltbeeinträchtigungen des Untergrunds und des Grundwassers weitestgehend zu minimieren. Dadurch können auf Grund der vorliegenden Daten keine Aussagen zum Sickerwasserverhalten unterhalb einer solchen Dichtung getroffen werden. Hier muß auf Werte aus der Literatur zurückgegriffen werden [MELCHIOR, 1993]

Tab. 12: Zuordnung der Deponien zu unterschiedlichen Oberflächenabdeckungen (Doppelnennungen möglich)

Oberflächenabdeckung	Anzahl der Deponien / Deponieabschnitte	
	Alte Bundesländer ohne NRW	NRW
Geringmächtige Bodenabdeckung	12/2	9
Bodenabdeckung mit stärkerer Mächtigkeit	18/3	10
Mineralische Oberflächenabdichtung	13	4
Kunststoffdichtungsbahn	3/3	1
Bentonitmatte	3/1	-

Oberflächenabdichtungen, aus Kunststoffdichtungsbahnen oder auch als Kombinationsabdichtung ausgeführt, befinden sich zur Zeit bei einigen Deponien im Bau oder in der Planungsphase, so daß einige für die Untersuchung in Frage kommende Deponien hinsichtlich dieses Kriteriums ebenfalls nicht verwendet werden konnten. Dies führt dazu, daß sich unter den erfaßten Deponien keine Deponie befindet, die eine Sickerwasserfassung besitzt und gleichzeitig bereits seit einigen Jahren über eine Kombinations-, Kunststoffdichtungsbahn- oder Bentonitmattenabdichtung verfügt. Eine Aussage über das langfristig möglicherweise andersartige Verhalten des Abfalls unterhalb einer weitgehend dichten Oberflächenabdichtung - hinsichtlich der Reaktionsprozesse auf Grund der ausbleibenden Wasserbewegung - ist deshalb zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur begrenzt möglich. Aber die grundsätzlichen Einflüsse reduzierter Wassergehalte können als nachgewiesen angesehen werden.

Ein realistisches Szenario ist einerseits die Erhöhung der Gaserfassungsrate durch die dichtere Oberflächenabdichtung, andererseits der sich im Ergebnis möglicherweise stärker auswirkende Rückgang der Gasmengen auf Grund von Wassermangel bzw. Mangel an Wasserbewegung im Abfallkörper. Über den Einbruch der Gasmengen wurde in der Literatur bereits berichtet [BAUER

ET AL., 1997; KRÜMPELBECK, EHRIG, 1998]. Eine Möglichkeit, diesem Rückgang entgegen zu wirken, ist die Reinfiltration von Wasser in den Deponiekörper unterhalb einer Dichtung. Die Deponie D11 kann mehrjährige Erfahrungen mit der Reinfiltration und der damit verbundenen Erhöhung der Gasmengen vorweisen. Die Deponie verfügt zwar "nur" über eine mineralische Dichtung, aber in diesem Fall wurde der Wasserhaushalt und dadurch bedingt auch der Gashaushalt soweit beeinträchtigt, daß eine Rückführung sinnvoll erschien. Im nachhinein hat sich gezeigt, daß diese Maßnahme langfristig zur Entfrachtung der Deponie und nach dem Verständnis der Autoren demnach zur Verkürzung der Nachsorgephase beiträgt.

Eine Bestätigung der These, daß bei sehr geringem Wasserzutritt die Reaktionsprozesse im Deponiekörper zum Erliegen kommen, bietet die Deponie D1, die auf Grund ihres für die damalige Zeit ungewöhnlichen Deponieaufbaus bereits früh sehr große Abfalldichten und geringe Sickerwassermengen erzielt hat. Nach vermehrtem Zutritt von Wasser bzw. Befeuchtung des Abfalls durch Niederschlagswasser im Rahmen des Erstellens von Gasbrunnen hat sich gezeigt (siehe Abb.10), daß die Umsetzungsprozesse erneut aktiviert bzw. intensiviert wurden, so daß der Schadstoffausstoß durch diese Art der Deponierungspraxis lediglich verzögert und nicht verhindert wurde. Das bedeutet, daß bei einer "Trockenstabilisierung" des Abfallkörpers die Nicht-Reaktivität der im Abfall enthaltenen Bakterien nur für die Zeitdauer garantiert werden kann, in der die Oberflächenabdichtung funktionstüchtig ist. Wird die Abdichtung erst zu einem sehr späten Zeitpunkt aufgebracht, stellt sich erneut die Frage nach der Reaktionsträgheit der Mikroorganismen, wobei dann davon ausgegangen werden kann, daß das Schadstoffpotential bereits zuvor stark verringert wurde und bei einer Beschädigung der Oberflächenabdichtung nicht mehr mit solch hohen organischen Belastungen gerechnet werden muß, wie dies bei der Deponie D1 der Fall ist.

3.2.1 Beispiele für die Oberflächenabdeckungen und -dichtungen der Deponien

Anhand ihrer Oberflächenabdeckungen und -dichtungen sind die Deponien in die in Tab. 11 aufgeführten unterschiedlichen Kategorien eingeteilt worden. Für die Gruppe der Deponien mit geringmächtiger Bodenabdeckung sind die Deponien D31 und die nordrhein-westfälische Deponie C in den Abb. 19 und 20 dargestellt. Da es sich bei beiden Objekten, um Altdeponien aus der Gruppe 2, der Deponien mit relativ langer saurer Phase und hohem Retentionsvermögen handelt und auch in der Historie der beiden viele Übereinstimmungen vorliegen, sind im Verlauf der Kurven große Analogien zu erkennen. Beide weisen nach Deponierungsende eine große Sickerwassermenge prozentual zum Niederschlag auf. Diese liegt ca. zwischen 28 und 55 % des Nie-

derschlages. Deutlich ist die um etwa 1-2 Jahre zeitverzögerte niederschlagsabhängige Menge des Sickerwassers zu sehen. Die Oberflächenabdeckung zusammen mit der Rekultivierungsschicht bietet in beiden Fällen keine hinreichende Barriere zur nachweisbaren Verminderung des eindringenden Wassers. Das Retentionsvermögen zu Anfang der Verfüllung ist bei beiden nach etwa 6 Jahren erschöpft. Insgesamt ist ein kontinuierlicher Anstieg der Sickerwassermengen auf bis zu 50 % des Niederschlages zu erkennen.

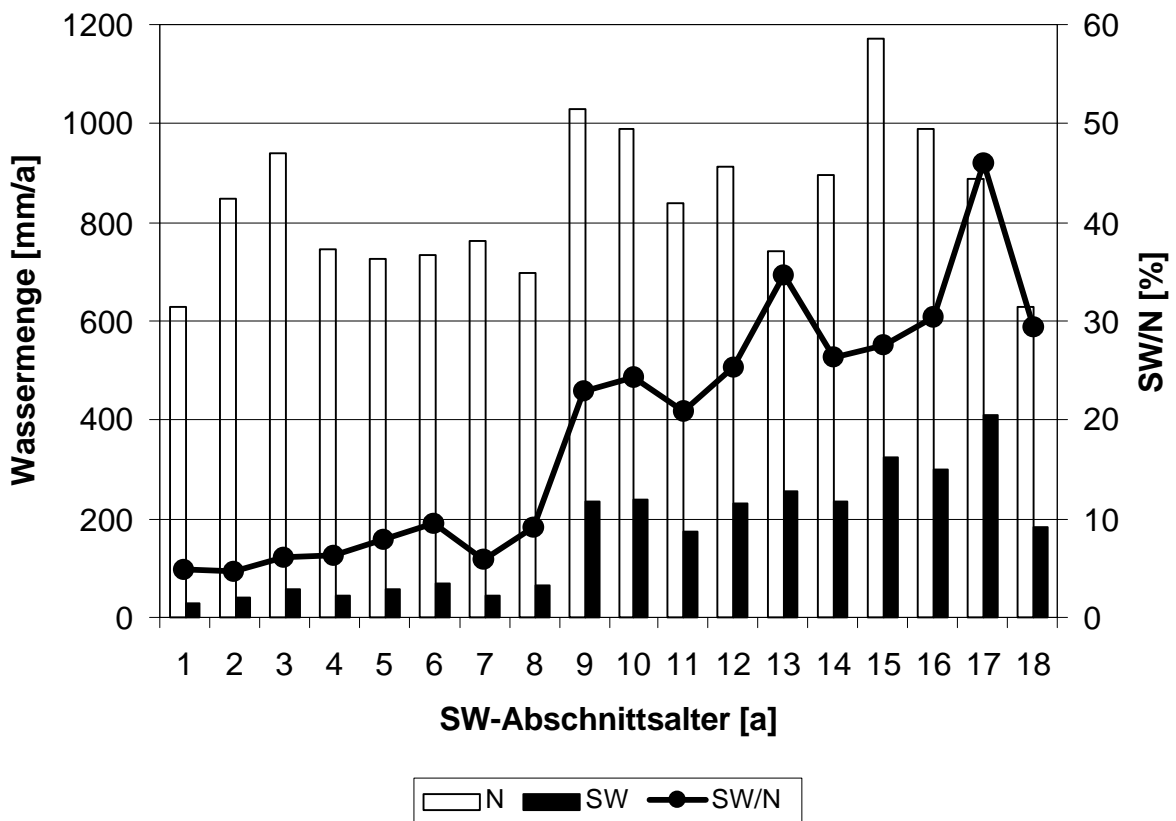


Abb. 19: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Altdeponie D31 (geringfügige Bodenabdeckung); 16. Jahr ist letztes Betriebsjahr².

² Als letztes Betriebsjahr wird hier das Jahr definiert, in dem der letzte frische Abfall auf die Deponie gelangt ist. In den darauffolgenden Jahren erfolgt dann der Oberflächenabschluß und die Rekultivierung.

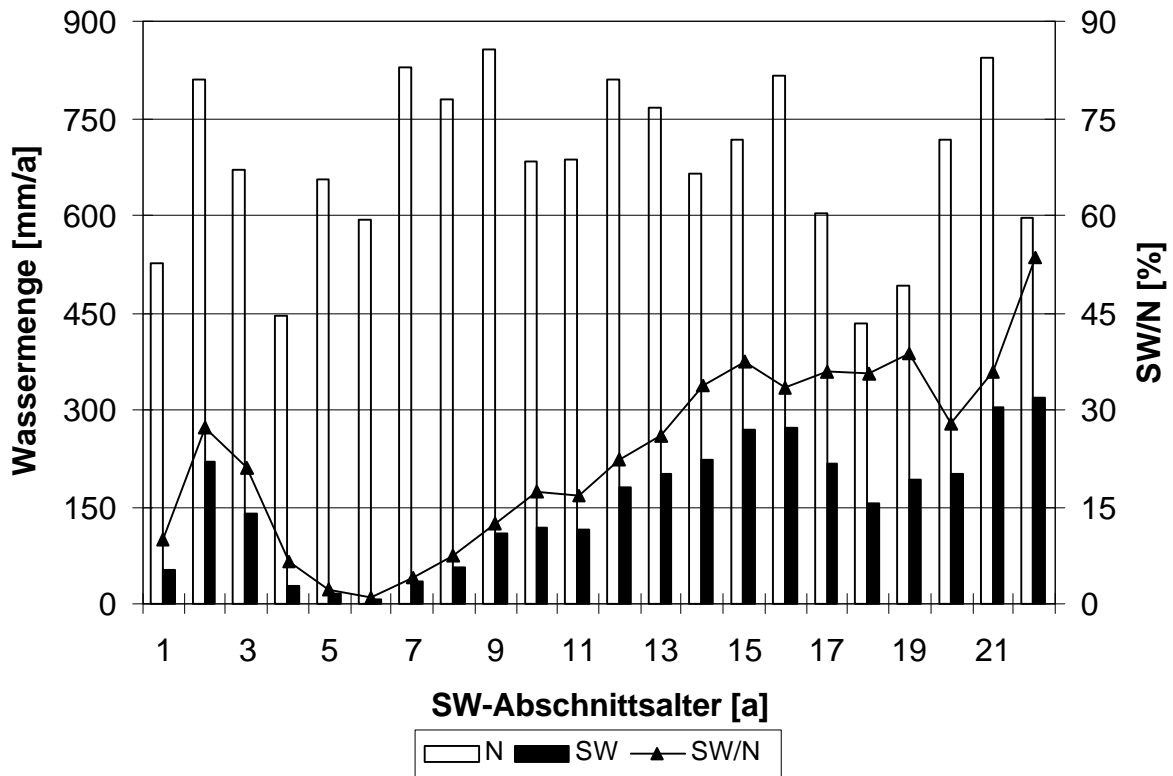


Abb. 20: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der nordrhein-westfälischen Deponie C (geringfügige Bodenabdeckung); 20. Jahr ist letztes Betriebsjahr.

In Abb. 21 und Abb. 22 sind zwei Vertreter der Kategorie Bodenabdeckung > 1m abgebildet. An diesen beiden Objekten können zwei Entwicklungen verdeutlicht werden. Die Deponie D44 schwankt in ihren Sickerwassermengen zwischen 20 und 27 % des Niederschlages, wobei ein leichter, kontinuierlicher Anstieg über die Zeit zu verzeichnen ist. Die Deponie M hingegen weist anfangs Sickerwassermengen von bis zu 90 % des Niederschlages auf. Der Grund für diesen Sickerwassermengenverlauf liegt in der zu Beginn nur geringfügigen Abdeckung der Oberfläche sowie in der anschließenden sukzessiv aufgetragenen mehrere Meter mächtigen Oberflächenabdeckung. Es handelt sich hier nicht um eine Deponie mit einer kappenförmigen Oberflächenform, sondern zur Anpassung an das Landschaftsbild wurde hier eine teilweise hügelige Form der Oberfläche ausgeführt, so daß ohne Dichtung und Bepflanzung das Wasser weder abfließt noch in größerem Umfang verdunstet, sondern vornehmlich in den Abfallkörper infiltriert. Probleme mit Fremdwasser aus Deponieabschnitten, die über keinerlei Sickerwasserfassung verfügen, kommen ebenfalls noch hinzu. Nach der vollständigen Oberflächenrehabilitierung der gesamten Deponie, verbunden mit dem Aufbringen mehrerer Meter Boden, sind die Sickerwassermengen auf unter 20 % des Niederschlages abgesunken. Das Beispiel der Deponie M zeigt auf besonders eindrucksvolle Weise, daß bereits mächtige Bodenabdeckungen zu einer deutlichen Minimierung des Sickerwassers führen können.

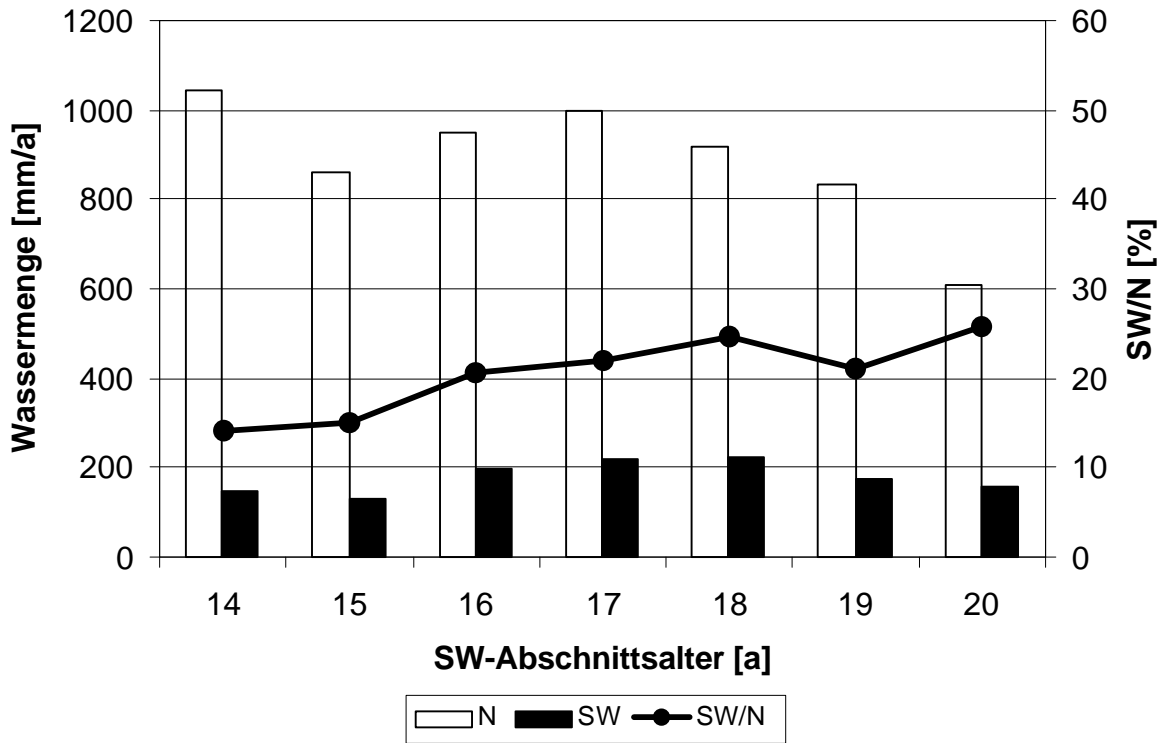


Abb. 21: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Deponie D44 (Bodenabdeckung >1m); 19. Jahr ist letztes Betriebsjahr.

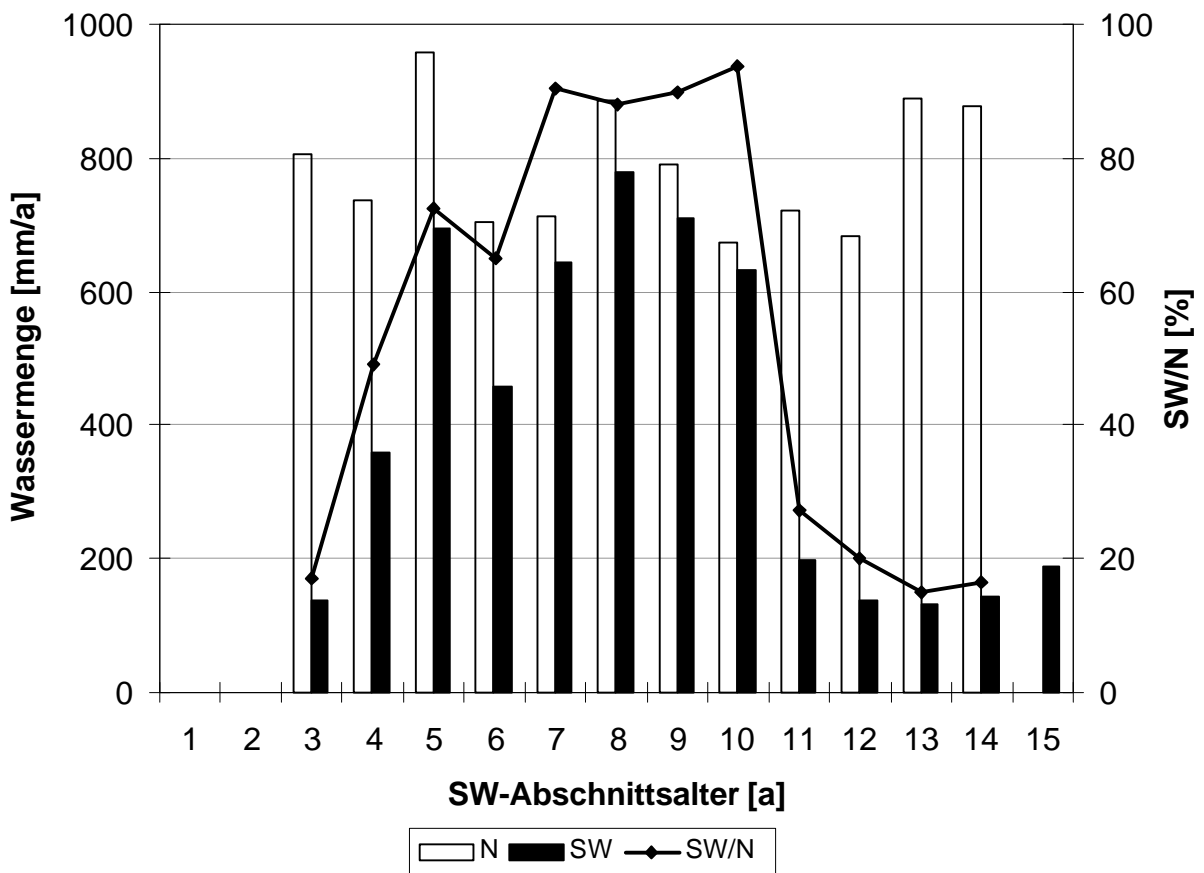


Abb. 22: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der nordrhein-westfälischen Altdeponie M (Bodenabdeckung >1 m); 4. Jahr ist letztes Betriebsjahr.

Die Abb. 23 und Abb. 24 dokumentieren den Sickerwasserverlauf von Altdeponien mit einer mineralischen Dichtung. Die Deponie D9 wird seit 7 Jahren nicht mehr aktiv betrieben. Hier sieht man nach der Aufbringung einer mineralischen Dichtung im Jahre 8 einen stetigen Rückgang der Sickerwassermengen. Während des Betriebes liegen die Sickerwassermengen in einem ähnlich hohen Bereich wie die der Deponien mit geringmächtiger Bodenabdeckung. Nach Abdichtung nehmen die Mengen bis auf einen Ausreißer kontinuierlich ab. Sie erreichen ein Minimum von < 15 % des Niederschlages.

Die Deponie D15 ist bereits über die gesamte dargestellte Zeit geschlossen und verfügt über eine mineralische Dichtung. Bei ihr dringen noch zwischen 18 und 24 % des Niederschlages durch die Oberfläche in den Deponiekörper ein. In diesem Zusammenhang müssen allerdings auch die extrem hohen Niederschlagsmengen betrachtet werden. Sie erreichen Spitzenwerte von über 1400 mm/a. Beim Vergleich der absoluten Werte der Sickerwassermengen der Deponie D9 und D15 sind die Unterschiede nach Aufbringung des Oberflächenabschlusses nur noch gering. Sie liegen bei beiden zwischen 100 und 300 mm/a.

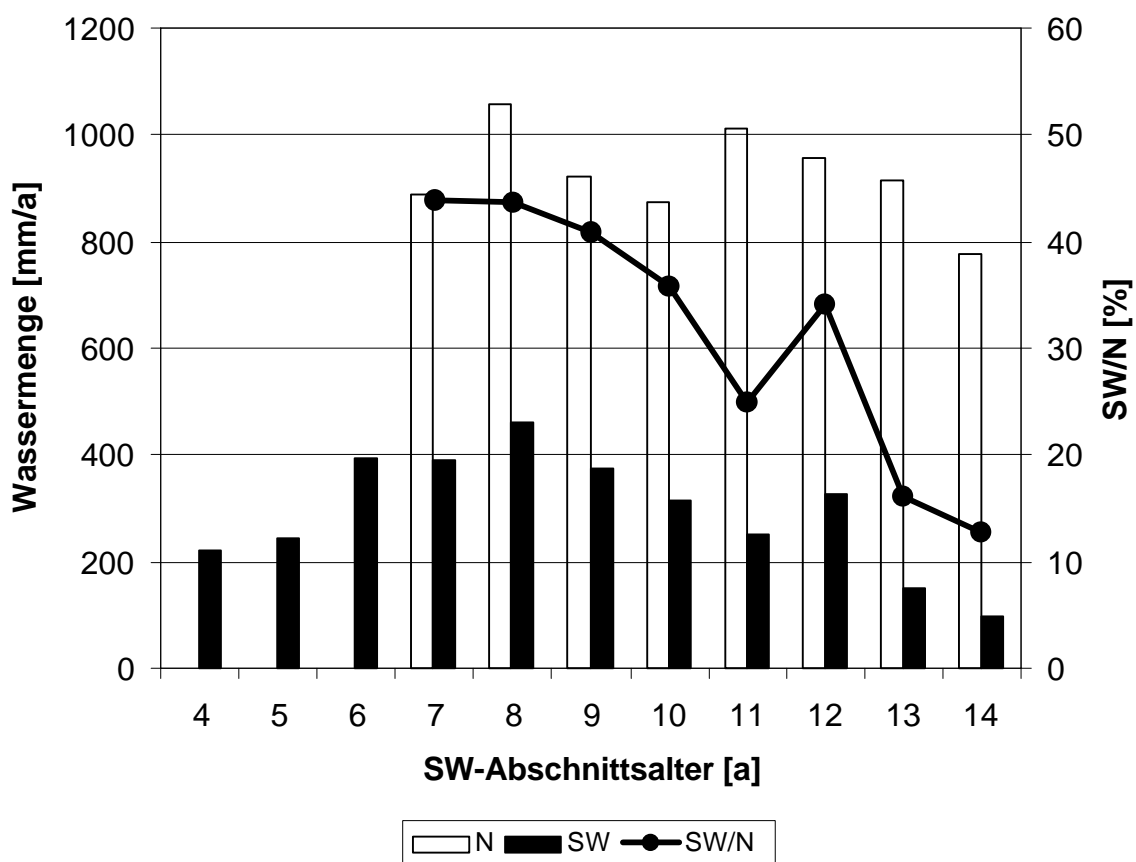


Abb. 23: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Altdeponie D9 (mineralische Abdichtung); 7. Jahr ist letztes Betriebsjahr.

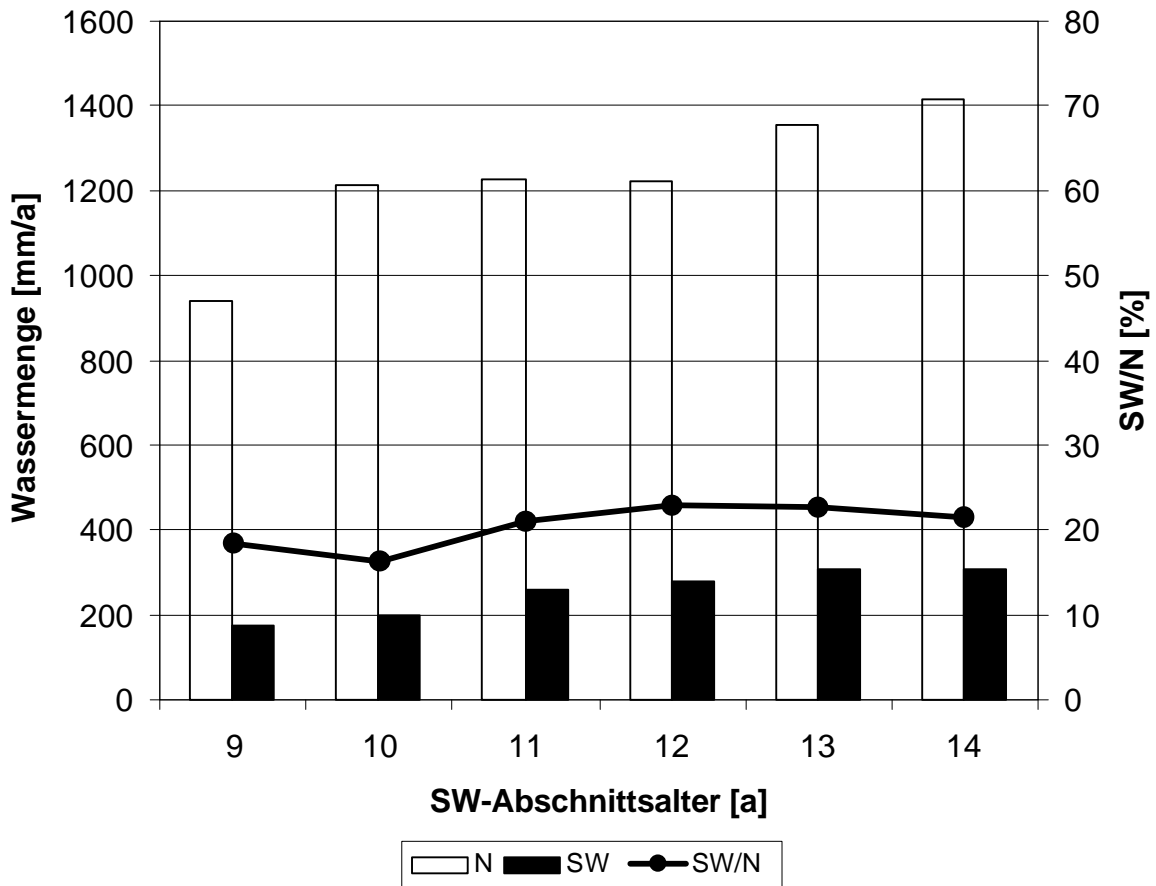


Abb. 24: Darstellung der Sickerwasser- und Niederschlagsmengen der Deponie D15 (mineralische Abdichtung); 7. Jahr ist letztes Betriebsjahr.

Insgesamt ist das Aufbringen einer Oberflächenabdeckung, hinsichtlich der Reduzierung der Sickerwassermengen, als positiv zu betrachten. Allerdings muß an jedem Standort die Frage nach dem langfristigen Rekultivierungsziel gestellt werden. Ein vollkommen wasserundurchlässiger Oberflächenabschluß kann zwar für den Zeitraum seiner Funktionstüchtigkeit, z. B. 100 Jahre, eine umfassende Emissionsminderung in Bezug auf Sickerwasser und Deponiegas mit sich bringen, trägt aber nicht dazu bei, die Inertisierung des Abfalls voranzutreiben. Somit müssen für jeden einzelnen Standort die Vor- und Nachteile des jeweiligen Oberflächenabschlusses abgewogen werden. Hierbei sollte auch bedacht werden, daß zum Zeitpunkt der Rekultivierung oder Sanierung zumeist die größten Emissionen pro Zeiteinheit über dem Sickerwasser- und Gaspfad bereits produziert worden sind (siehe u. a. Abb.15 , 18 und 33) und in vielen Fällen demnach auch in die Umwelt gelangt sind.

Für die Aufrechterhaltung der biologischen Umsetzungsprozesse ist eine Mindestmenge an Wasser von 3 bis 4 % des Niederschlages [RAMKE, 1991] notwendig. ZUHSE [1997] hält auf

Grund der Inhomogenitäten des Abfallkörpers die zwei- bis dreifache Menge an Wasser (6-12 % des Niederschlages) für erforderlich. Nach BAUMANN UND SCHNEIDER [1998] muß zudem damit gerechnet werden, daß zwischen 1/3 - 3/8 des eindringenden Niederschlagwassers über bevorzugte Wasserwege sehr schnell der Basisdrainage zugeführt werden, so daß die Wassermenge, die den Abbauprozessen zugute kommen deutlich geringer ist als die absolute Sickerwassermenge.

Möglicherweise wäre eine teilweise Sickerwasserrückführung unterhalb eines wasserundurchlässigen Oberflächenabschlusses eine Alternative zur Oberflächenabdichtung ohne Rückführung. Durch diese Maßnahme könnten die biologischen Umsetzungsprozesse weitgehend aufrecht erhalten werden und gleichzeitig die Sickerwassermengen und damit auch die Reinigungskosten minimiert werden. Außerdem würde eine hohe Gaserfassungsrate sichergestellt. Allerdings scheitert dieser Vorschlag häufig an der Kostenintensität des Systems, wobei die zu erwartende individuelle Verkürzung der Nachsorgedauer einer Deponie durch die Intensivierung der anaeroben Umsetzungsprozesse hierbei außer acht bleibt. Bei der herkömmlichen Regelabdichtung, bestehend aus Kunststoffdichtungsbahn und mineralischer Dichtung, muß hingegen von der langfristigen Mumifizierung ohne Schadstoffentfrachtung ausgegangen werden. Durch dieses Vorgehen werden die gegenwärtigen Probleme der Deponien, die mit unbehandeltem Abfall verfüllt wurden, nur in die Zukunft und damit auf die nächste Generation verlagert, da auch nach Abschluß der Deponie noch ein umweltrelevantes Schadstoffpotential im Deponiekörper enthalten ist.

In der Literatur wird die Notwendigkeit des Aufbringen einer Oberflächenabdichtung in Form einer Kombinationsabdichtung, wie sie von der TASI gefordert wird, bereits seit Jahren kontrovers diskutiert. Schrieb NUBBAUM 1986 noch, daß das weitestgehende Vermeiden einer Durchfeuchtung eine technisch mögliche und wirksame Maßnahme darstelle, die beträchtlich zur Steigerung der Gesamtsicherheit einer Deponie beitragen könne, so mehren sich die Stimmen in jüngerer Zeit, die einen wasserundurchlässigen Oberflächenabschluß nicht in jedem Fall für die geeignetste Maßnahme halten. WIRTZ ET AL. [1997] kamen im Rahmen des Teilberichtes für das vom BMBF geförderte Verbundvorhaben "Deponiekörper" zu dem Schluß, daß eine Unterbrechung der Kontaminationspfade durch technische Barrieren auf solche Standorte begrenzt werden sollte, bei denen aufgrund der Randbedingungen eine akute Beeinträchtigung oder Gefährdung der Umwelt zu befürchten sei. HOINS [1998] argumentiert schließlich, daß das Multibarrierenkonzept und das Vorsorgeprinzip der TASI auf die Altdeponien nicht angewendet

werden können, statt dessen solle das Prinzip der Gefahrenabwehr in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Altablagerungen Anwendung finden.

3.3 Sickerwasserfrachten

Sickerwasserfrachten berechnen sich aus der Menge an Sickerwasser und der Sickerwasserkonzentration des betreffenden Parameters in Relation zur Trockenmasse des Abfalls. Sie sind ein exakteres Instrument zur Bestimmung der Emission in Bezug auf die Größe und den Abfall einer Deponie als die Sickerwasserkonzentrationen. Gegenwärtig gibt es keine gesetzlichen Regelungen, die bei Deponien Bezug auf die Sickerwasserfracht nehmen. Der Anhang 51 der Rahmen-AbwasserVwV [N. N., 1998] gibt lediglich Grenzwerte für die Konzentration an.

Die Gegenüberstellung von Frachten würde einerseits bedeuten, daß die Emissionen verschiedener Deponien untereinander besser verglichen werden könnten, andererseits könnten aber auch Verursacher, wie z. B. Kläranlagen, die Frachten in die Vorflut geben und die Landwirtschaft, die durch Aufbringen von Flüssigdüngung und anderen Düngemitteln zur Verschmutzung des Grundwassers beitragen, mit in den Vergleich einbezogen werden können.

In Abb. 25 ist exemplarisch der Verlauf der Sickerwasserfrachten der Deponie D7 dargestellt. Im Laufe der Zeit ist eine deutliche Abnahme der Frachten zu beobachten. Die höchsten Frachten werden vom CSB erreicht. Im 3. Jahr wird eine CSB-Fracht von 428 g/t TS erzielt. In diesem Zeitraum befindet sich die Deponie in der sauren Phase. Danach nehmen die Frachten nahezu kontinuierlich ab. Geringe Abweichungen sind zum überwiegenden Teil auf Schwankungen der Sickerwassermenge zurückzuführen. Steigen diese stark an, erhöht sich auch die Gesamtfracht. Es wird deutlich, daß die Menge des durchsickernden Wassers einen entscheidenden Einfluß auf die Emissionen und die langfristige Entfrachtung des Abfalls besitzt.

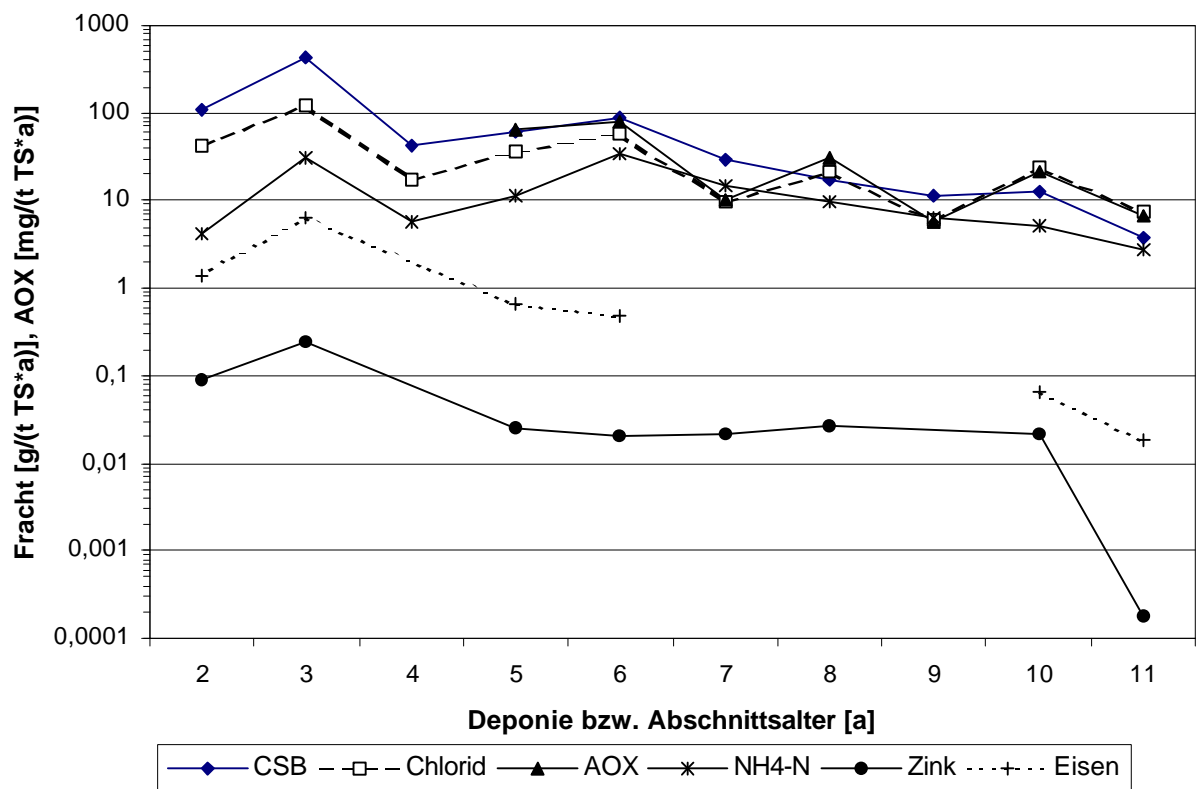


Abb. 25: Sickerwasserfrachtenverlauf der Deponie D7 (mineralische Abdichtung, 6. Jahr ist letztes Betriebsjahr).

Im Anhang 3 sind weitere Frachtenverläufe einzelner Deponien dokumentiert. Die errechneten Jahresfrachten variieren sehr stark. Dies liegt einerseits am jeweiligen Beginn der Dokumentation und andererseits an der Abfallzusammensetzung und der Sickerwassermenge. Zudem war es bei einigen Deponien schwierig die Abfallmasse zu ermitteln. Hier mußten z. T. Schätzwerte angenommen werden. Der Wassergehalt wurde in Anlehnung an Werte aus der Literatur [WIRTZ ET AL., 1997; WIEMER, 1982] mit i. d. R. 30 % der Feuchtesubstanz beziffert. Der allgemeine Trend liegt bei anfänglich höheren Frachten. Daran schließt sich eine kontinuierliche Abnahme der Jahresfrachten im Laufe der Zeit, parallel zu den Sickerwasserkonzentrationen und den rückläufigen Sickerwassermengen, an.

Im Gegensatz zu den Konzentrationen können die Jahresfrachten einzelner Deponien auch trotz möglicher Fremdwasserbeeinflussung verglichen werden, da die Fracht unabhängig davon ist. Somit relativieren sich auch die vorher gemachten Beobachtungen von extrem hohen oder geringen Belastungen im Sickerwasser, da hier nur noch die tatsächlich eluierte Stoffmenge erfaßt wird. Bei Deponien mit Sickerwasserrückführung ist diese Bilanzierung nicht möglich.

Mit Hilfe der Frachtenberechnung für die einzelnen Deponien und deren Kurvenverlauf wurden Extrapolationen basierend auf den individuellen Exponentialfunktionen durchgeführt, die für verschiedene Parameter in einem Zeitraum von 100 Jahren die Maximal- und Minimalverläufe darstellen. Stellvertretend wurden in Abb. 26 und 27 die Frachtenverläufe der zu Grunde gelegten Deponien für die Parameter CSB und $\text{NH}_4\text{-N}$ dargestellt.

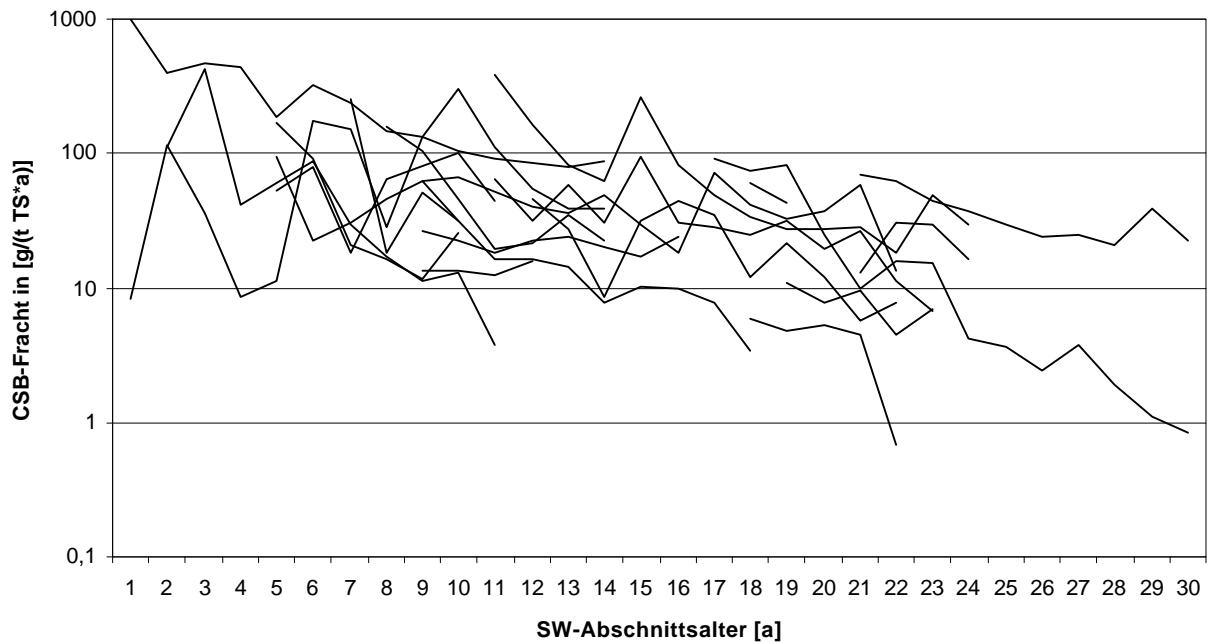


Abb. 26: CSB-Frachtenentwicklung über die Zeit bei den untersuchten Deponien

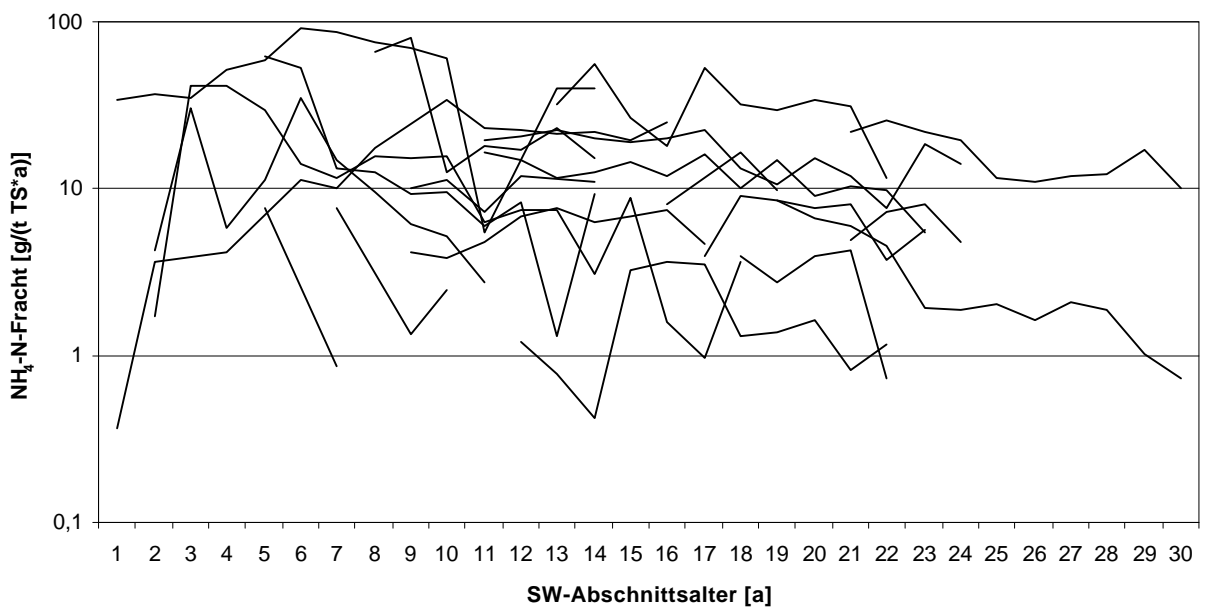


Abb. 27: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachtenentwicklung über die Zeit bei den untersuchten Deponien

Beim Parameter CSB ist anhand der Abb. 26 eine relativ konstante Abnahme über die Zeit zu ersehen. Beim Parameter $\text{NH}_4\text{-N}$ (Abb. 27) hingegen ist im selben Zeitraum nur eine geringe Abnahme zu beobachten. Basierend auf den einzelnen extrapolierten Kurven des jeweiligen Parameters wurden die Kurven integriert, so daß anhand der berechneten Gleichungen die maximal und minimal eluierbare Fracht innerhalb dieses Zeitraums ermittelt werden konnte. Auf Grund der bisher dargestellten Ergebnisse muß davon ausgegangen werden, daß die Abnahme der Frachten und somit auch der Konzentrationen im Laufe der Zeit geringer wird, so daß nur noch eine sehr geringe Mindestfracht innerhalb eines Jahres anfällt, die sich aber über einen längeren Zeitraum hinweg nicht mehr wesentlich verringert. Dieses Verhalten wird u. a. auf die Heterogenität der Abfälle, dem jeweiligen Einbau und dem unterschiedlichen Grad der Befeuchtung zurückgeführt. Letzteres findet im Rahmen der Prognosen keine Berücksichtigung, da es sich hier um exponentielle Funktionen handelt, die sich nach kürzerer Zeit der x-Achse asymptotisch annähern. Um die langfristig noch zu erwartenden Frachten nicht unberücksichtigt zu lassen, wurden die minimalen und maximalen Frachten aus den ersten 100 Jahren für das rechnerisch zu ermittelnde langfristige Emissionspotential verdoppelt. Damit wird sichergestellt, daß das prognostizierte gesamte Emissionspotential nicht als zu gering angenommen wird. Allerdings können in Abhängigkeit der individuellen Voraussetzungen, Abweichungen auftreten. Es muß mit dem Austrag von ca. der Hälfte des Emissionspotentials innerhalb der ersten 100 Jahre und der übrigen Schadstoffe im Verlaufe der sich anschließenden Jahrhunderte und Jahrtausende gerechnet werden.

In Tab. 13 sind die Emissionspotentiale der Parameter C_{org} bzw. CSB, N bzw. TKN bzw. $\text{NH}_4\text{-N}$, Chlorid und Cadmium gegenübergestellt. Die Aufzählung der jeweils ermittelten Parameter zeigt bereits die Schwierigkeit auf, alle gewonnenen Daten miteinander zu vergleichen. Durch die DIN-Vorschriften sind einheitliche Regelungen zur Analyse von Stoffen vorhanden [DIN]. Trotzdem werden von unterschiedlichen Laboren unterschiedliche Parameter bei der Analyse 'bevorzugt', so daß nur eine bedingt vergleichbare Datengrundlage geschaffen wird. Ein weiteres Problem stellt die jeweilige Herkunft und das eingesetzte Behandlungsverfahren der Probe vor der Analyse dar.

BELEVI UND BACCINI [1989] führten Elutionsversuche durch und leiteten anhand ihrer Resultate die genannten Emissionspotentiale ab. KRUSE [1994] und LEIKAM ET AL. (1996 zitiert in HEYER ET AL.[1997]) analysierten hingegen die Ergebnisse von Lysimeterversuchen. Im Rahmen der Elution können keine mikrobiologischen Prozesse Einfluß auf das Ergebnis nehmen, da die

Versuchsdurchführung dies nicht zuläßt. Hier prägen reine Auswaschungsprozesse verbunden mit den jeweiligen Milieubedingungen das Ergebnis. Bei den Lysimeterversuchen kommen sowohl mikrobiologische Prozesse zum Tragen als auch - auf Grund der hohen Austauschrate bei der Sickerwasserkreislaufführung - Auswaschungsprozesse.

Tab. 13: Prognose der Emissionspotentiale für den Sickerwasserpfad

	BELEVI, BACCINI, 1989 [mg/kg TS]	KRUSE, 1994 [mg/kg TS]	LEIKAM ET AL., 1996 zitiert in HEYER ET AL., 1997 [mg/kg TS]	BMBF-Vorhaben³ [mg/kg TS]
C_{org} CSB	2100-7100	3000	25000-40000	2500-11200
N TKN NH₄-N	200-310	2200	2000-4000	1400-3400
Chlorid	1000-1500	2500	2500-4000	900-3800
Cadmium	0,007-0,024	-		0,0016-0,0062

Die Daten der Deponien werden am stärksten durch die mikrobiologischen Prozesse bestimmt, da hier die Elution nur sehr bedingt Auswirkungen auf die Güte des Sickerwassers hat. Ausnahmen bilden eine massive Wasserbeaufschlagung auf den Deponiekörper oder eine Sickerwasserrückführung mit großen Mengen. Zudem ist bei den Deponien noch die hohe Heterogenität der einzelnen Ablagerungen zu berücksichtigen. Im Gegensatz zur Deponie werden in den Laborversuchen größtenteils reine Siedlungsabfälle untersucht, das Verhalten von Abfällen unterschiedlicher Herkunft (Bauschutt, gewerbliche Abfälle etc.) und dessen wechselseitige Beeinflussung wird außer acht gelassen. Dadurch ergibt sich rechnerisch eine höhere Fracht als bei der realen Deponie.

Beim direkten Vergleich wird deutlich, daß BELEVI UND BACCINI (1989) im Rahmen ihrer Arbeiten für den organischen Kohlenstoff die höchsten Emissionspotentiale erzielen, wohingegen der Stickstoff nur sehr geringe Emissionspotentiale erreicht. Für die Untersuchungen von KRUSE [1994], LEIKAM ET AL. (1996 zitiert in HEYER ET AL.[1997]) und die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Studien trifft dieses Ergebnis nicht zu. Hier erzielt der TKN bzw. der NH₄-N ebenfalls hohe Potentiale. Das Chlorid weist demgegenüber kaum große Abweichungen auf. Im Rahmen des BMBF-Vorhabens wurde auch das maximale Chloridemissionspotential auf den Deponien ermittelt, die bereits auf Grund ihrer eingebrachten Abfälle als chloridbelastet

³ "Abschätzung der Restemissionen von Deponien in der Betriebs- und Nachsorgephase auf der Basis realer Überwachungsdaten"

galten. Bei diesen Deponien muß ca. von einem dreimal höheren Chloridpotetnial als in Tab. 13 angegeben ausgegangen werden. Beim Chlorid handelt es sich um einen der Elution unterliegenden Parameter, da es zu keinen Adsorptionsreaktionen im Abfallkörper kommt. Demzufolge kann das Emissionspotential auch durch eine reine Elution, wie sie von BELEVI UND BACCINI durchgeführt wurde, näherungsweise ermittelt werden.

Für den Parameter Cadmium liegen nur wenige Werte vor. Hier sind die Emissionspotentiale von BELEVI UND BACCINI um ein bis zwei Zehnerpotenzen höher als die des BMBF-Untersuchungsvorhabens. Bei den Schwermetallen ist dieser Unterschied größtenteils auf das unterschiedliche Löslichkeitsverhalten in Abhängigkeit vom pH-Wert zurückzuführen. Unter realen Deponiebedingungen kommen weitere Faktoren, wie z. B. die Komplexbildung mit Huminstoffen als Einflußfaktoren auf die Schwermetallkonzentration im Sickerwasser hinzu.

3.4 Gasanalysen

Bei den vorliegenden Gasanalysen handelt es sich jeweils um Rohgasanalysen einer Mischprobe unterschiedlicher Gassammelstränge der jeweiligen Deponie, d. h. es werden keine Analysen von Einzelsträngen dargestellt. In den meisten Fällen sind die vorgefundenen Daten nicht sehr umfangreich. Gaskonzentrationen sind im Regelfall nur in Verbindung mit dem jeweiligen Volumenstrom umfassend dokumentiert und demnach interpretierbar. Änderungen des Volumenstroms bewirken Veränderungen bei der Gaszusammensetzung. Häufig liegen Analysen nur aus einzelnen Jahren vor, so daß bei den meisten Deponien keine aussagekräftigen Konzentrationsverläufe über die Zeit dokumentiert werden können. Hinzu kommt, daß die jeweiligen Rahmenbedingungen zum Zeitpunkt der Probenahme auf den einzelnen Deponien stark variiert, so daß ein Vergleich der Konzentrationen nur bedingt sinnvoll erscheint. Die Darstellungen können nur einen Hinweis auf die generell zu erwartenden Gaskonzentrationen geben.

Auf Grund dieser Situation werden beispielhaft die Konzentrationsverläufe verschiedener Parameter der Deponie D1 dargestellt, deren Dokumentation relativ umfassend ist. Die übrigen Daten werden als Jahresmittelwerte pro Parameter in den jeweiligen Abbildungen im Anhang 4 dargestellt. Innerhalb der Darstellungen finden sowohl die Deponiedaten des durch das BMBF geförderten Vorhabens "Abschätzung der Restemissionen von Deponien in der Betriebs- und Nachsorgephase auf der Basis realer Überwachungsdaten" als auch die Daten der Studie des Landesumweltamtes NRW Berücksichtigung. Lediglich die Summenparameter CKW (Chlorierte Kohlenwasserstoffe) und FCKW (Fluorierte chlorierte Kohlenwasserstoffe) werden innerhalb des Berichtsteils dargestellt, um einen Eindruck über die Höhe der Konzentrationen der jeweiligen Schadstoffgruppen zu vermitteln. Der gemeinsame zeitliche Anknüpfungspunkt zur übergreifenden Darstellung ist das Ende der aktiven Ablagerung auf den Deponien bzw. den bereits verfüllten Deponieabschnitten.

3.4.1 Gasanalysen der Deponie D1

In Abb. 28 sind die Konzentrationsverläufe der Gasparameter der Deponie D1 dargestellt. Durch die weitgehende Technisierung der Entgasung können für die Parameter Methan, Kohlendioxid, Stickstoff und Sauerstoff nur bedingt aussagekräftige Werte angegeben werden. Sie stellen nicht die durchschnittliche Konzentration dieser Stoffe im Abfall dar, sondern der Methangehalt wird darauf ausgerichtet, daß das angeschlossene Blockheizkraftwerk oder die Fackel möglichst optimal ausgelastet werden, so daß ein maximaler Energiegewinn erfolgt. Systeme, die eine

konsequente Unterscheidung zwischen Gut- und Schlechtgas vornehmen, finden kaum Anwendung, da sie höhere Betriebskosten verursachen.

Bei der Deponie D1 nimmt im Laufe der Zeit die Methan- und Kohlendioxidkonzentration zu. Diese Entwicklung könnte auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Auf Grund der hohen Verdichtung und der damit verbundenen geringen Wasserbewegung und des geringen Wassergehaltes im Abfall bildet sich im Gegensatz zu anderen Deponien erst zeitverzögert ein stabiles Milieu aus, so daß die stabile Methanphase erst ab dem 10. Jahr erreicht wird. In der Literatur wird üblicherweise von einem Zeitraum von 1-2 Jahren ausgegangen [POLLER, 1990; RETTENBERGER ET AL. 1995]. Eine andere Erklärung wäre eine Veränderung der Entgasungstechnik. Möglicherweise wurde der Unterdruck verringert, so daß weniger Außenluft angesaugt wird und die relativen Methananteile im Gas ansteigen. Eine Verifizierung einer der Annahmen ist auf Grund von fehlenden Gasmengendaten nicht möglich.

Die Beurteilung und Interpretation des Verhaltens der Spurenstoffe erweist sich ebenfalls als schwierig. Die Konzentrationen der Parameter Chlor gesamt, Fluor gesamt, FCKW und CKW sind deutlich rückläufig. Zurückzuführen ist dies auf den leicht flüchtigen Charakter vieler unter diesen Oberbegriffen zusammengefaßter Substanzen. Nach Beendigung der aktiven Ablagerung von frischem Abfall steigen die Konzentrationen des Schwefelwasserstoffs und der aromatischen Verbindungen Benzol, Ethylbenzol, Toluol und Xylol hingegen an. Möglicherweise werden diese leicht flüchtigen Stoffe im Rahmen der Umsetzungsprozesse vermehrt freigesetzt oder dies ist lediglich ein Nebeneffekt der verringerten Ansaugung von Außenluft, so daß die vorher gemessenen Konzentrationen als zu niedrig anzusehen sind.

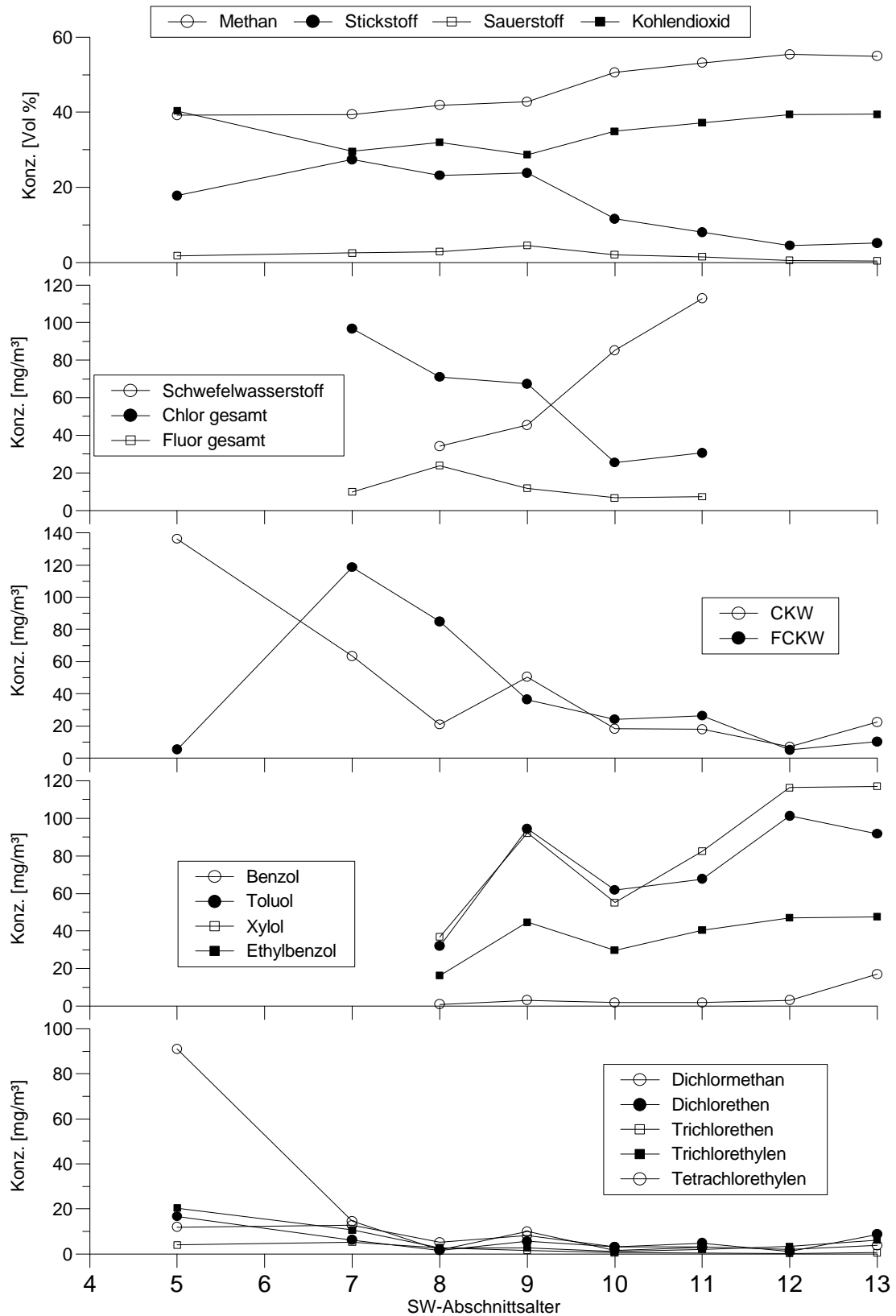


Abb. 28: Verlauf der Konzentrationen im Deponiegas der Deponie D1

3.4.2 Hauptbestandteile des Deponiegases

Die Gasinhaltsstoffe Methan und Kohlendioxid sind die Hauptkomponenten im Deponiegas (Abb. 29). Sie stellen die Endprodukte des anaeroben Stoffwechsels dar. Weitere Komponenten sind der Stickstoff und der Sauerstoff, wobei letztere durch Übersaugung des jeweiligen Deponiekörpers oder durch Diffusion in das Deponiegas gelangen und nicht durch die im Abfall stattfindenden Stoffwechselprozesse der Mikroorganismen. Die im Verhältnis zur Luftzusammensetzung nur geringen Sauerstoffkonzentrationen sind einerseits durch die Steuerung der Entgasungsanlage (Explosionsschutz), andererseits auf den Verbrauch (Veratmung) des möglicherweise in höherem Maße eingedrungenen Sauerstoffs im Abfall bedingt. Der elementare Stickstoff kann nur durch spezialisierte Bakterien gebunden werden, die ihn in dieser Form in den allermeisten Fällen nur aufnehmen, wenn keine anderen Stickstoffquellen in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen [SCHLEGEL, 1992].

Anhand der in Abb. 29 dargestellten Gaskomponenten lassen sich folgende Tendenzen ablesen. Der Methanvolumenanteil am Deponiegas nimmt im Laufe der Zeit erst leicht zu und entwickelt sich dann wieder rückläufig. Der Kohlendioxidanteil verhält sich hierzu nahezu analog. Auf lange Sicht ist ebenfalls eine Abnahme zu beobachten. Die Gaskomponenten Stickstoff und Sauerstoff hingegen zeigen demgegenüber eher eine Zunahme ihrer Volumenanteile. Dieses Verhalten kann in den meisten Fällen auf eine Übersaugung des Deponiekörpers zurückgeführt werden, denn die Deponien werden sich in der Regel noch nicht in der Lufteindringphase befinden [RETTENBERGER ET AL., 1992].

LOCK CONSULTANTS [1994] kamen im Rahmen ihrer Untersuchungen zu vergleichbaren Ergebnissen. Auf der Grundlage ihrer Auswertungen von Deponiedaten errechneten sie folgende Mittelwerte für die Gaskomponenten Methan, Kohlendioxid, Stickstoff und Sauerstoff:

Tab. 14: Vol.-%-Anteile der Hauptbestandteile des Deponiegases

GASBESTANDTEIL	VOL.-%
CH₄	43
CO₂	30,5
N₂	17,9
O₂	2,2

Die Aussagekraft der gemessenen Daten wird beim Deponiegas durch wesentlich mehr Faktoren beeinflusst und verändert als dies bei Sickerwasseranalysen möglich ist. Diese Konstellation ist auf folgende Ursachen zurückzuführen:

- Automatische Steuerung des Entgasungsgeschehens, um einen maximalen Methangehalt zu gewährleisten;
- automatische Abschaltung beim Erreichen eines zu niedrigen Volumenanteils.
- Darstellung von Einzelwerten verschiedener Deponien aus unterschiedlichen Zeiträumen und mit unterschiedlichen Ausgangsvoraussetzungen

Die dokumentierten Konzentrationen sind insgesamt nur bedingt repräsentativ, da z. B. der Methangehalt so gesteuert wird, daß Teile einer Deponie zeitweilig nicht entgast werden, wenn der Methangehalt für eine Nutzung zu gering ist. Hier besteht ein Interessenskonflikt zwischen der Notwendigkeit zur Auslastung des angeschafften Maschinenparks seitens des Betreibers und der Gewährleistung gegenüber der Allgemeinheit, daß keine Emissionen aus dem Abfallkörper entweichen. Um ein genaues Bild der Entgasungsanlage einer Deponie zu erhalten, muß zudem ein umfangreiches Meßprogramm aufgestellt werden. Hierzu reichen die gegenwärtig durchgeführten Stichproben ein- bis zweimal im Jahr nicht aus. Diese Maßnahme ist im Vorfeld der Planung einer Entgasungsanlage notwendig oder wenn beim Betrieb Probleme auftreten.

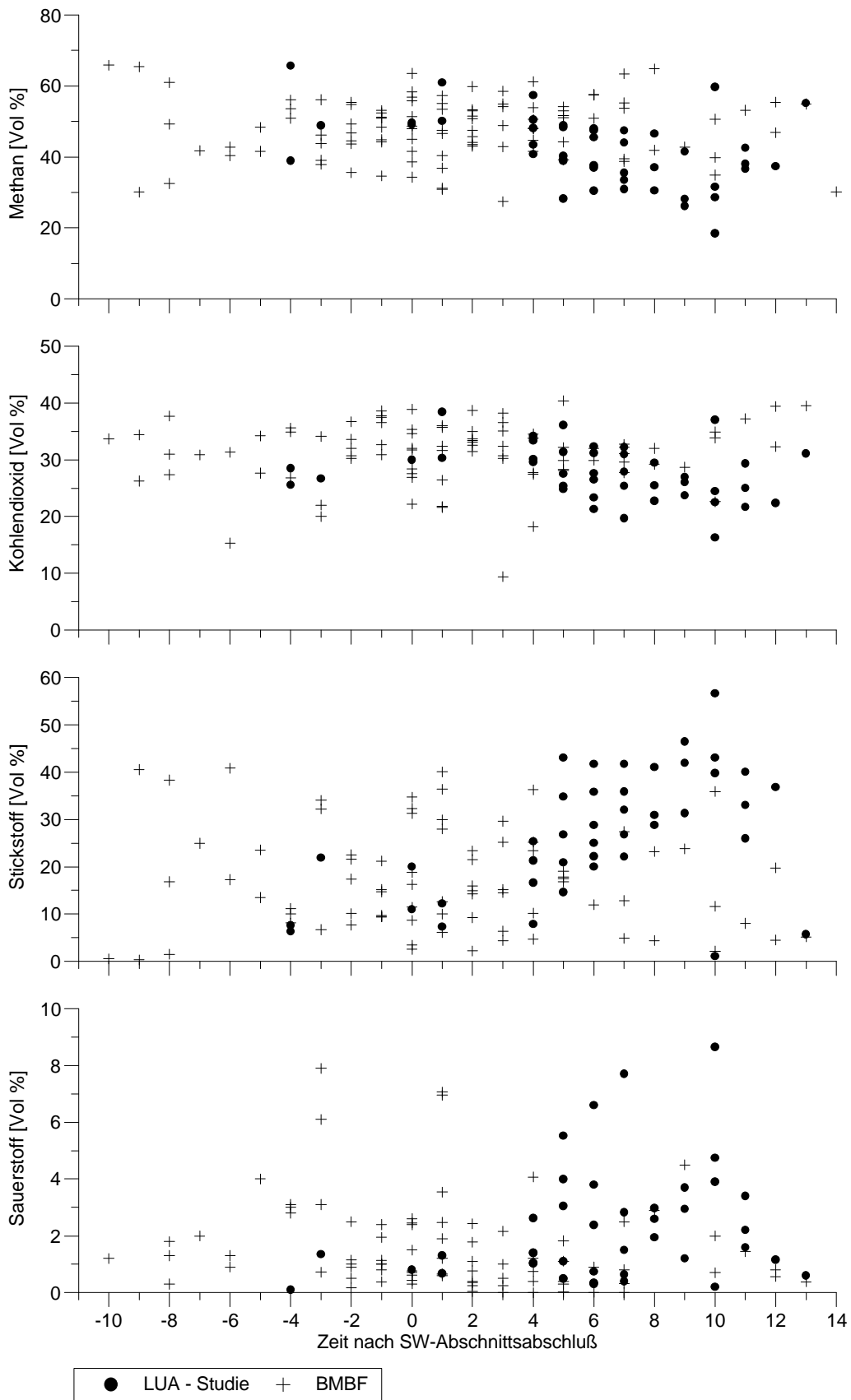


Abb. 29: Jahresmittelwerte der Methan-, Kohlendioxid-, Stickstoff- und Sauerstoffkonzentrationen im Deponiegas der im Rahmen des BMBF-Vorhabens untersuchten Deponien und NRW-Deponien aus der Studie des Landesumweltamtes NRW

RETTENBERGER ET AL. haben 1992 das langfristige Deponiegeschehen in 6 Phasen eingeteilt. In Abb. 30 ist das Schema des 6-Phasenmodells dargestellt. Demnach deuten viele Analysen darauf hin, daß sich ein Großteil der untersuchten Deponien bereits in der Lufteindringphase befindet. Bei dieser Annahme würde die Übersaugung des Abfallkörpers allerdings unberücksichtigt bleiben, so daß in den meisten Fällen von der Langzeitphase ausgegangen werden sollte (Stickstoffkonzentration als Indikator im Gas). Die Eingruppierung der Deponien auf Grund der nur in geringem Umfang vorliegenden und schwierig zu bewertenden Gasanalysedaten ist generell nur in begrenztem Maße möglich. Um hier gesicherte Aussagen treffen zu können, wären Messungen an einer Deponie unter immer gleichen Randbedingungen notwendig. Ansonsten verfälschen die unterschiedlichen Standortbedingungen die Messungen zu sehr.

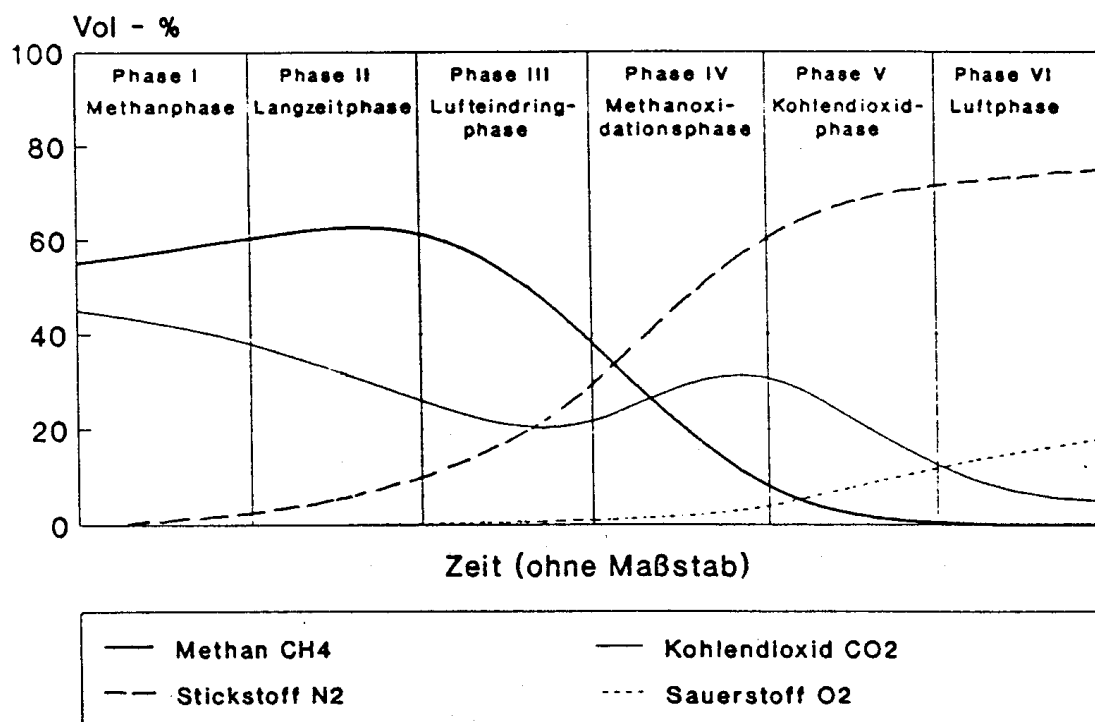


Abb. 30: Langzeitmodell Rettenberger [RETTENBERGER ET AL., 1992]

3.4.3 Vergleich der Konzentrationen von Spurenstoffen im Deponiegas

In Tab. 15 wird die jeweilige Bandbreite der Konzentrationen der hier untersuchten Spurenkomponenten im Deponiegas den Ergebnissen anderer Autoren gegenübergestellt. Anhand der Tab. 15 ist zu erkennen, daß jeder der analysierten Spurenstoffe im Deponiegas eine sehr hohe Schwankungsbreite aufweist. Diese sind bei allen Autoren zu finden. Die hohen Schwankungsbreiten lassen sich einerseits auf die unterschiedlichen Standortbedingungen

(z. B. eingelagerte Abfälle) und andererseits auch auf die Durchführung der Messung (BHKW unter Vollast, längere Stillstandzeiten der Entgasungsanlage vor Entnahme der Gasprobe, Luftansaugung etc.) zurückführen.

Tab. 15: Gegenüberstellung der Konzentrationsmaxima und -minima verschiedener Spurenstoffe im Deponiegas und in der Abluft einer MBA

Parameter	BMBF-Vorhaben/NRW [mg/m ³]	POLLER, 1990 [mg/m ³]	LOCK CONSULTANT [1994] [mg/m ³]	Deponie Döbeln ⁴ [mg/m ³]	Deponierisikostudie, Bayern ⁵ [mg/m ³]
Schwefelwasserstoff	0,038-1278	-	0,01-850	<1-106,5	5-20
Chlor gesamt	0,5-229,7	-	n. n. - 410	6,6-1205,8	-
Fluor gesamt	0,017-104	-	n. n. - 40	1,9-12,1	-
Schwefel gesamt	0,3-506,2	-	n. n. - 224	-	2-90
Benzol	0,01-95	-	-	<0,5	0,03-15
Ethylbenzol	0,01-112	-	-	<0,5-1	-
Toluol	0,02-160	-	-	3,7-4,6	0,2-600
Xylol	0,04-257,2	-	-	<0,5	0-400
Dichlormethan	0,02-250	<0,5-19,2	-	0,5-132,7	0-700
Chloroform	0,002-15,15	<0,1-2,1	-	<0,5-478,3	0-3
Trichlorethan	0,001-27,5	<0,1-4,1	-	1,2-763,4	-
1,2-Dichlorethen	0,087-43	<0,1-53	-	<0,5-2,4	0-300
Trichlorethen	0,002-22,55	0,2-30,3	-	<0,5-1,7	0-300
Tetrachlorethen	0,001-41,9	0,3-38	-	<0,5-0,8	0-250
Summe KW	1,83-165,6	-	n. n. - 810	-	-
Summe CKW	0,002-171,2	-	n. n. - 160	-	-
Summe FCKW	0,064-118,6	-	n. n. - 31	-	-

Die Resultate der ostdeutschen Deponie Döbeln-Hohenlaufft weichen auf Grund ihrer sehr hohen Chlorbelastungen im Gas von den übrigen Deponien ab. Dies wird im Forschungsbericht der IFK

⁴ Ifk Dresden GmbH, Analyse der Deponieemission im Zusammenhang mit der qualitativ veränderten Abfallzusammensetzung in den neuen Bundesländern am Beispiel der Deponie Döbeln-Hohenlaufft, 1993

⁵ Deponierisikostudie, Kurzfassung, Umwelt & Entwicklung Materialien Bayern, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, erstellt durch Dr. Ing. Steffen Ingenieurgesellschaft mbH, Essen und Colenco Power Consulting AG, Schweiz, 1994

DRESDEN [1993] mit nach der Wiedervereinigung abgelagerten chlorhaltigen Abfällen in Verbindung gebracht. Eine nähere Erläuterung dieser Abfälle bzw. deren Zusammensetzung erfolgt nicht.

Bei den übrigen Parametern bewegen sich die Konzentrationen der Deponie Döbeln-Hohenlaufft eher im unteren Konzentrationsbereich. Ansonsten ist kein Unterschied zwischen den Schadstoffemissionen des Deponiegases von Ost- und West-Deponien zu erkennen.

Insgesamt muß davon ausgegangen werden, daß ein Großteil der leicht flüchtigen Substanzen bereits während der Ablagerung aus dem Abfall entweicht. Somit sind die ermittelten Konzentrationen, bezogen auf die zu erwartende Gesamtemission, mit hoher Wahrscheinlichkeit als zu gering einzustufen. Möglicherweise muß zu Anfang der Ablagerung mit einem mehrfach höheren Schadstoffausstoß gerechnet werden. Der Zeitpunkt der Messung spielt demzufolge eine wichtige Rolle.

3.4.4 CKW- und FCKW-Konzentrationen

In den Abb. 31 und Abb. 32 sind die Konzentrationen der Summenparameter CKW und FCKW als jeweilige Jahresmittelwerte der einzelnen Deponien dargestellt. Im Anhang 4 ist ein Großteil der jeweiligen Einzelstoffe und deren Konzentrationen aufgeführt. Insgesamt geben die Darstellungen eine Übersicht der zu erwartenden Konzentrationsbandbreiten der Einzelkomponenten.

Bis auf wenige Werte liegen die Konzentrationen der CKW und FCKW mehrheitlich unter 40 mg/m³. Eine zeitliche Entwicklung der Konzentrationen ist nicht zu beobachten. Auf Grund der unterschiedlichen Standortbedingungen und Historien der Deponien ist dies aber auch nicht zu erwarten. Die Verteilung der Konzentrationen ist auch im zuletzt erfaßten Jahr ähnlich wie zu Beginn der Beprobung. Aus den Anfangsjahren der Abfallablagerungen liegen kaum Werte vor, da zu diesem Zeitpunkt zumeist noch keine Möglichkeit zur Entgasung bestand. Möglicherweise ändert sich dies in Zukunft im Rahmen der Umsetzung der Vorgaben der TASI. Ein Problem stellt weiterhin der hohe Dampfdruck dieser Verbindungen dar, so daß vermutet werden kann, daß sich ein Großteil der Mengen bereits während der Ablagerung verflüchtigt und für die Analytik nicht mehr verfügbar ist.

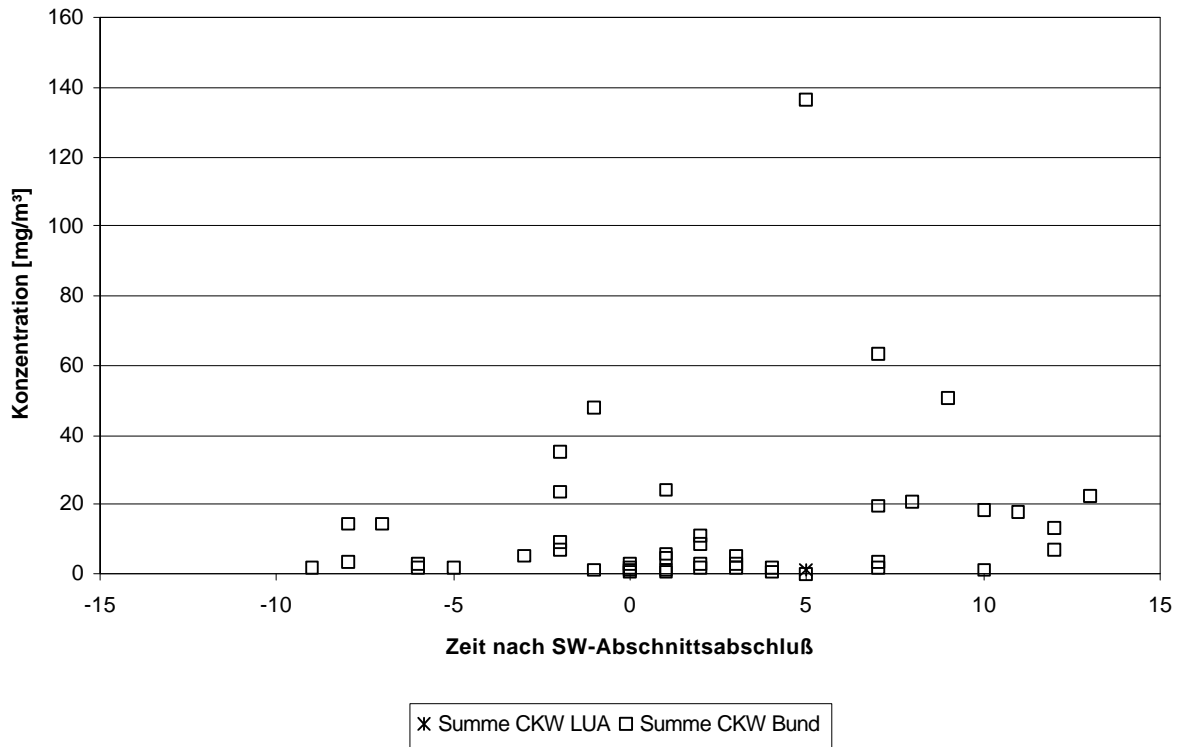


Abb. 31: Jahresmittelwerte der CKW-Konzentrationen der Deponien

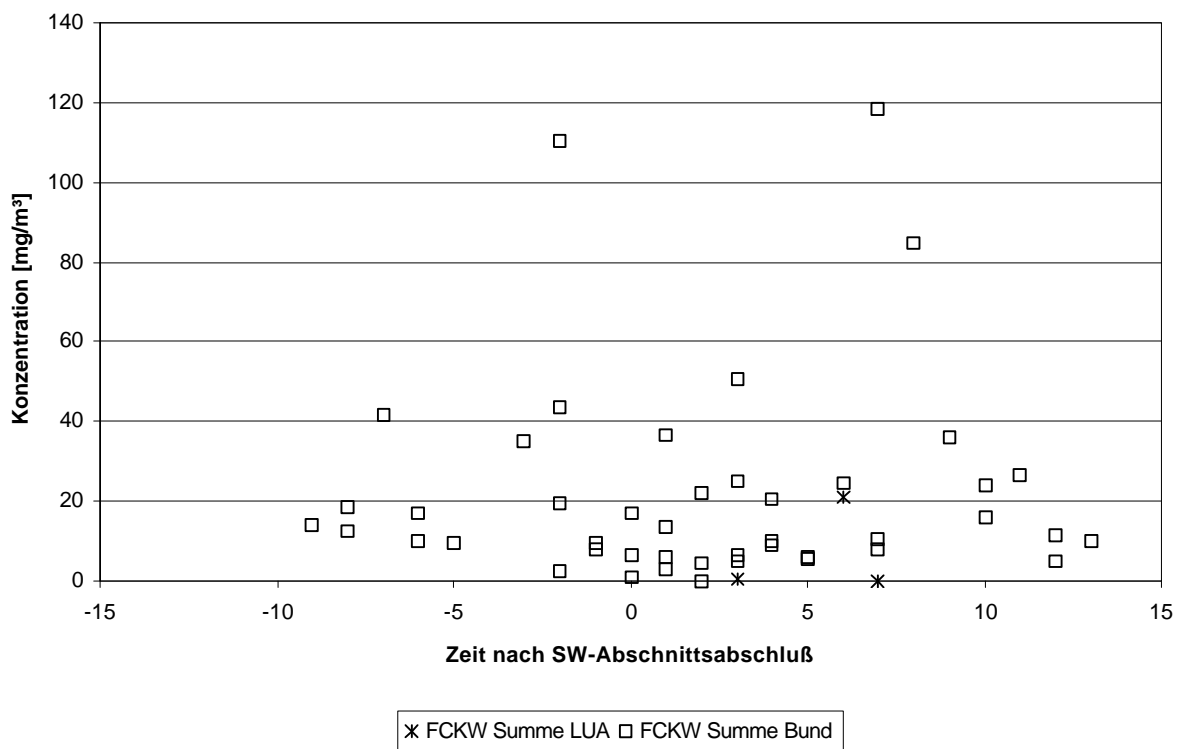


Abb. 32: Jahresmittelwerte der FCKW-Konzentrationen der Deponien

3.5 Gasmenge

Das im Deponiekörper entstehende Deponiegas enthält als Hauptbestandteile Methan und Kohlendioxid. Neben der akuten Gefährdung des Deponiepersonals und der Anwohnerschaft durch Brand und Explosion tritt in der öffentlichen Diskussion zunehmend die Beteiligung des Deponiegases am anthropogenen Treibhauseffekt in den Vordergrund der Betrachtungen.

Mit Hilfe vertikaler Gasbrunnen wird das Deponiegas umweltschonend aus dem Deponiekörper entfernt und anschließend der Entsorgung zugeführt. Bei älteren Anlagen mit schlechter Gasqualität oder nur noch geringen Gasmengen pro Zeiteinheit wird das Gas mit Hilfe einer Hochtemperaturfackel verbrannt. Bei größeren Gasmengen guter Qualität wird ein Blockheizkraftwerk betrieben und das Gas als Energielieferant genutzt.

Bei der Gegenüberstellung von Gasmengen unterschiedlicher Deponien sind mehrere Faktoren zu beachten:

- Abfallzusammensetzung
- Stand der Umsetzungsprozesse im Deponiekörper
- Beginn der Entgasung
- Art der Entgasungsanlage
- Erfassungsrate
- Anschluß von Teilbereichen zu unterschiedlichen Zeitpunkten
- Art und Zeitpunkt der Oberflächenabdichtung
- Rekultivierung der Oberfläche

Im Rahmen dieser Auswertungen wird versucht, einigen dieser Faktoren Rechnung zu tragen. Es wird i. d. R. ein einheitlicher Wassergehalt von 30 % für den Abfall der Deponien angenommen. Die als Bezugs- und Vergleichspunkt angesetzte Abfallmenge setzt sich lediglich aus dem Abfall zusammen, der für die anaeroben Mikroorganismen als verstoffwechselbar gilt, d. h., daß z. B. Bauschutt, der von Mikroorganismen nicht zu CH_4 und CO_2 abgebaut werden kann, im Gegensatz zur Berechnung der Sickerwasserfrachten nicht in die Rechnung mit einbezogen wird. Hierdurch besteht zudem die Möglichkeit des Vergleichs mit anderen Werten aus der Literatur, da diese zumeist im Rahmen von Lysimeterversuchen erhalten wurden und darin kaum Stoffe, wie z. B. Bauschutt oder Sperrmüll, vorkommen. Die hemmenden Effekte weiterer Abfälle in der Deponie bleiben hier unberücksichtigt. Als das Jahr 0 und damit zeitlichen Bezugspunkt wird das Jahr des aktiven Ablagerungsendes definiert. Gasmengen, die vor diesem Zeitpunkt

abgesaugt wurden, sind als nicht aussagekräftig anzusehen, da häufig nur Teilflächen an die Gassammelleitung angeschlossen waren. Während des Betriebes gibt es in der Regel noch große offene Flächen, so daß die Entgasungsanlage zumeist mit einem geringeren Unterdruck betrieben wird als nach der Rekultivierung. Mit dem Aufbringen einer Abdeckung wird in den meisten Fällen eine Erhöhung der Erfassungsrate einhergehen.

In Abb. 33 sind die erfassbaren Gasmengen der Deponien über die Zeit nach dem Abschluß der Deponie dargestellt worden. Anhand dieser Abbildung werden zwei Aussagen ermöglicht. Erstens die erfassbaren Gasvolumina der unterschiedlichen Deponien nähern sich nach ca. 15 Jahren einem gemeinsamen Bereich an. Sie gehen bereits 10-20 Jahre nach Deponierungsende auf Mengen $\leq 2 \text{ m}^3/(\text{t TS} \cdot \text{a})$ zurück. Zweitens ist zu beobachten, daß die Höhe der Gasmengen kurz nach Abschluß der Deponie und dem Aufbringen einer Oberflächenabdeckung oder -dichtung noch sehr unterschiedlich ist. Auf die Unterschiede und deren möglichen Ursachen wird im folgenden näher eingegangen.

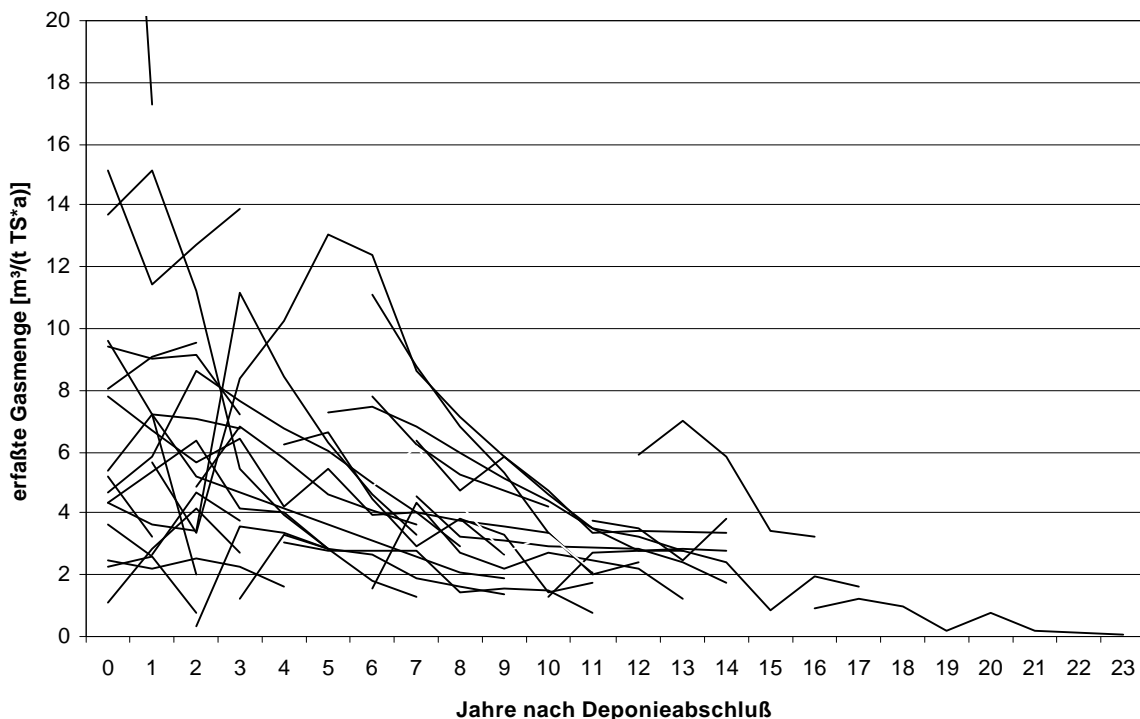


Abb. 33: erfaßte Gasmengen der Deponien nach Deponieabschluß

In Abb. 34 sind die Gasmengenverläufe von 8 Deponien dargestellt, anhand derer einige Aussagen zum unterschiedlichen Verhalten der Deponien erläutert werden.

Die Art der Oberflächenabdichtung, der davon direkt abhängige Wasserzutritt und die Wasserbewegung im Abfallkörper sind Faktoren, die die Gasproduktion nach Abschluß der Deponie oder eines Abschnitts mit beeinflussen können. Die Deponien mit einer mineralischen Abdichtung haben in Bezug auf ihre Gasmengenverläufe (Abb. 34) im Durchschnitt eine kürzere Halbwertszeit als die Deponien mit einer geringmächtigen Bodenabdeckung. Die Halbwertszeit der Gasproduktion nach dem Deponierungsende liegt bei den mineralischen Abdichtungen im Mittel bei etwa 3 bis 4 Jahren. Eine Ausnahme bildet die Deponie D15. Hier konnte zuerst nach Aufbringung der zweilagigen, 40 cm starken mineralischen Abdichtung eine Steigerung der Gasmengen erzielt werden. Dies ist wahrscheinlich auf die leicht erhöhte Erfassungsrate, hervorgerufen durch die Aufbringung der Abdichtungs- und Rekultivierungsschicht, nach Deponierungsende zurückzuführen. Danach zeigt die Gasmengenkurve eine ähnlich langsame Abnahme wie bei den Deponien mit Bodenabdeckung. Möglicherweise entspricht die relativ dünne Abdichtung (D15), die bereits Ende der achtziger Jahre aufgebracht wurde, in ihren Qualitätsmerkmalen eher einer Bodenabdeckung.

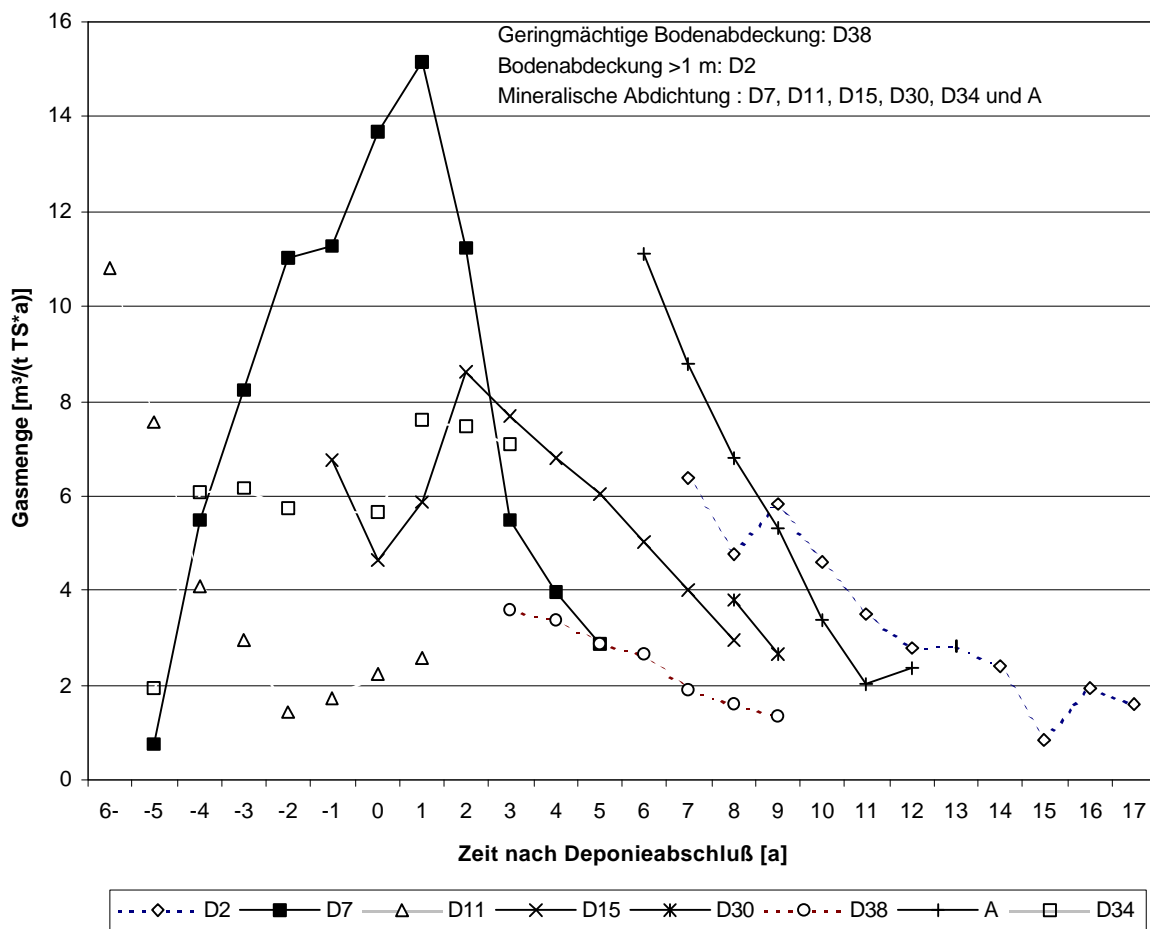


Abb. 34: Gasmengenverläufe von 8 Deponien mit unterschiedlichen Oberflächenabdichtungssystemen

Die Deponien D2 und D38 besitzen eine Bodenabdeckung, wobei D2 über eine mehrere Meter mächtige, mit Wald bewachsene Abdeckung verfügt und D38 nur über eine 80 cm mächtige Bodenabdeckung. Deutliche Unterschiede zwischen diesen beiden Deponien sind hier bei der Betrachtung der absoluten Gasmengen ersichtlich. Die geringmächtige Abdeckung bedingt eine nur geringe Erfassungsrate, wodurch die Gasmengen der Deponie D38 bereits zu Beginn der Entgasung bei $< 4 \text{ m}^3/(\text{t TS} \cdot \text{a})$ liegen. Bei D2 befinden sie sich hingegen noch einige Jahre später bei über $6 \text{ m}^3/(\text{t TS} \cdot \text{a})$. Die Halbwertszeit liegt bei beiden bei ungefähr 4 Jahren. Generell befinden sich die Halbwertszeiten der Gasmengenverläufe der Deponien mit Bodenabdeckung nach Deponierungsende bei durchschnittlich 4 bis 6 Jahren.

Die Deponien D11 und D34 zeigen demgegenüber ein anderes Verhalten. Die Gasmengen von D11 steigen nach Reinfiltration auf einem Teilbereich der Deponie wieder leicht an, d. h. das Emissionspotential für eine höhere Gasproduktion ist noch vorhanden. Bei der Deponie D34 wird bereits über einen relativ langen Zeitraum eine Sickerwasserteilrückführung durchgeführt. Hier ist nur ein sehr verlangsamter Rückgang der Gasmengen zu erkennen, was auf ein noch relativ hohes Gasbildungspotential schließen läßt. Im 4. Jahr sind nach Auskunft des Betreibers die Gasmengen sogar wieder angestiegen. Dies ist einerseits auf die Zufuhr von Wasser und die dadurch guten Milieubedingungen für den biologischen Abbau im Abfallkörper zurückzuführen, andererseits können aber auch Faktoren, wie eine deutlich verbesserte Erfassungsrate oder ein niedriger Methangehalt im Deponiegas, hierfür mit verantwortlich sein.

Insgesamt ist anhand der vorgestellten Daten ersichtlich, daß die Gasproduktion bei Deponien mit mineralischer Abdichtung tendentiell schneller abnimmt, als etwa bei Deponien mit einer geringmächtigen Bodenabdeckung. Der durch die Abdichtung veränderte Wasserhaushalt wirkt sich möglicherweise negativ auf die Gasproduktion aus (siehe Kapitel 3.2). Inwieweit dieser Effekt durch die erhöhte Erfassungsrate ausgeglichen werden kann, bleibt offen. Auf Grund der möglichen Überlagerung unterschiedlicher Einflußfaktoren ist es allerdings schwierig, eindeutige Aussagen für die Deponien allgemein zu treffen. In jedem Fall werden noch über einen langen Zeitraum geringe, technisch nicht mehr erfaßbare Gasmengen aus dem Deponiekörper emittieren.

Bei den Deponien mit Bodenabdeckung wirkt sich hingegen die niedrigere Erfassungsrate auf Grund der weniger dichten Oberflächenabdeckung reduzierend auf die gefaßten Gasmengen aus. Hier muß auch während des Entgasungszeitraums mit höheren Emissionen in die Umwelt

gerechnet werden als bei einer mineralischen Abdichtung. RETTENBERGER ET AL. [1995] führen aus, daß Restemissionen im Bereich von 4 bis 6 l/(m²*h) zu keinerlei wahrnehmbaren Geruchsemissionen führen. An anderer Stelle nennt RETTENBER [1998] einen tolerierbaren Wert von 2 bis 4 l/(m²*h). Allerdings bleiben die nachteiligen Wirkungen des Methans auf die Erwärmung der Erdatmosphäre innerhalb dieser Überlegungen unberücksichtigt. Eine Möglichkeit zur Reduzierung von migrierendem Gas stellt die Methanoxidation dar. Allerdings ist hier noch relativ unklar, wieviel Methan unter Deponiebedingungen mit optimiertem Boden wirklich oxidiert werden kann.

Welche Maßnahmen für den jeweiligen Deponiestandort optimal sind, muß in jedem Einzelfall abgewogen werden. Die hier dargestellten Gasmengenverläufe der Deponien mit Sickerwasserkreislaufführung (D34) oder Reinfiltration (D11) geben positive Beispiele für die nachträgliche Erhöhung der Gasmengen bei bereits mehrere Jahre abgeschlossenen Deponien. Auch die Erfahrungen auf der Deponie Hessheim zeigen, daß eine Reinfiltration von Wasser unterhalb einer temporären Folienabdichtung einen positiven, in diesem Fall stabilisierenden Einfluß auf die Gasproduktion besitzt. Allerdings läßt sich hieraus nicht schließen, daß bei Reinfiltration immer mit einer Steigerung oder Stabilisierung der Gasproduktion zu rechnen ist. Dies hängt von den deponiespezifischen Gegebenheiten ab. Wenn das Gaspotential bereits erschöpft ist, ist eine weitere Durchfeuchtung des Abfallkörpers nicht zielführend.

3.6 Setzungen

Daten zum Setzungsverhalten gibt es bei den untersuchten Deponien nur vereinzelt. In der TASI werden Setzungsmessungen unter Nr. 10.6.6.2 als ein Teil der Überwachungsmessungen gefordert. Bei vielen älteren Deponien werden aber keinerlei Setzungsmessungen durchgeführt,

- da die Hauptsetzungen bereits abgeklungen sind oder
- Setzungsmessungen nicht in den Auflagen der Deponiebetreiber gefordert werden.

Gegenwärtig ist es schwierig, aussagekräftige Setzungsmessungen zu erhalten. Ein weiteres Problem ist der jeweilige Zeitraum, in dem Daten auf den Deponien erfaßt wurden. Wenn Setzungsmessungen erst mehrere Jahre nach Deponierungsende begonnen werden und es sich beim dokumentierten Zeitraum um eine sehr kurze Zeitspanne handelt, sind daraus keinerlei Zukunftsprognosen ableitbar. Insgesamt konnten von nur 3 Deponien (D19,I+II; D45 und D46) belastbare Setzungsmessungen erhalten werden. Bei D45 und D46 besteht die Schwierigkeit, daß die genaue Abfallhöhe nicht bekannt ist, so daß hier keine prozentualen, mit anderen Deponien

direkt vergleichbaren Zahlen angegeben werden können, sondern nur die Absolutwerte der Setzungen. Deshalb werden im folgenden lediglich Daten der Deponie D19 vorgestellt. Die graphischen Auswertungen der Deponie D45 und D46 sind im Anhang 6 dargestellt. Zusätzlich werden Daten aus der Literatur und aus der Studie des Landesumweltamtes NRW mit in die Auswertungen einbezogen.

Die Setzungsmessungen der Deponie D19 beginnen zeitlich bereits vor Abschluß der jeweiligen Abschnitte I und II, da Teilbereiche bereits früher verfüllt worden sind und dort die Setzungsmessungen begonnen wurden. Deshalb ist die zeitliche Zuordnung zum jeweiligen Deponierungsende nicht exakt möglich. In Abb. 35 ist der Setzungsverlauf an 8 Setzungspunkten (D19,I) gegenüber der Zeit aufgetragen. Bis auf die Pegel 11 und 13 zeigen die übrigen nur eine sehr geringe Setzung von < 2 % der Abfallhöhe. Der gesamte Teilbereich wurde 1983 geschlossen. Die geringen Setzungen sind dadurch zu erklären, daß sich die Meßstelle in Bereichen mit sehr hohem Inertstoffanteil befinden (Unterlagen des Betreibers) und dadurch kaum Konsolidierungen im Deponiekörper stattfinden.

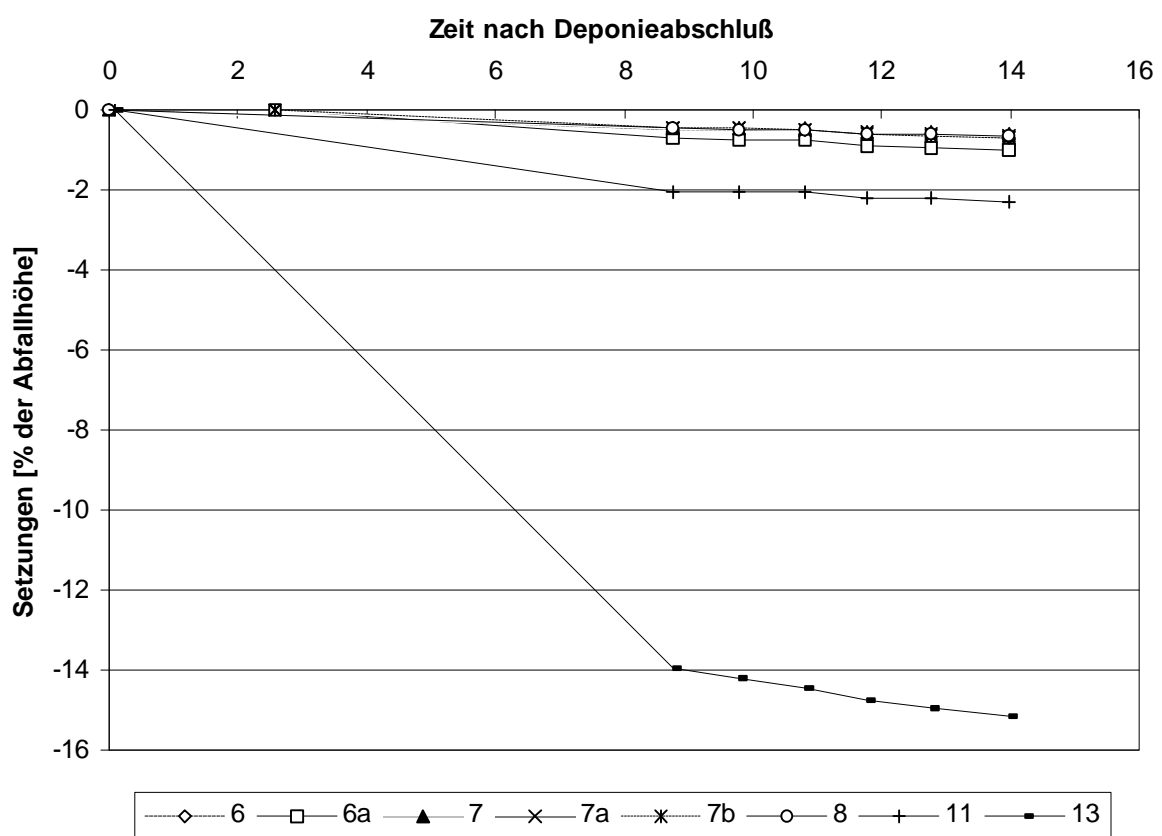


Abb. 35: Setzungsverläufe der Pegel der Deponie D19,I

Bei den Pegeln 11 und 13 ist im Gegensatz dazu davon auszugehen, daß sie sich in Bereichen mit organischem Abfall befinden und dort auf Grund der Volumenverluste durch die Umsetzungsprozesse stärkere Setzungen auftreten. Es handelt sich bei beiden um sogenannte Tiefpegel, d. h. der Pegel 11 befindet sich 5 m und Pegel 13 16 m unterhalb der Deponieoberkante. Die stärkeren Setzungen des Pegels 13 resultieren wahrscheinlich aus einem höheren Organikanteil im Abfall und aus einer größeren Auflast. Erst ab dem 8. bis 9. Jahr (1990/91) laufen die Setzungskurven für alle Pegel nahezu parallel zueinander.

Die Abb. 36 zeigt den Setzungsverlauf des Abschnitts D19,II. Hier sind bei allen Pegeln signifikant höhere Setzungen gemessen worden als bei D19,I.

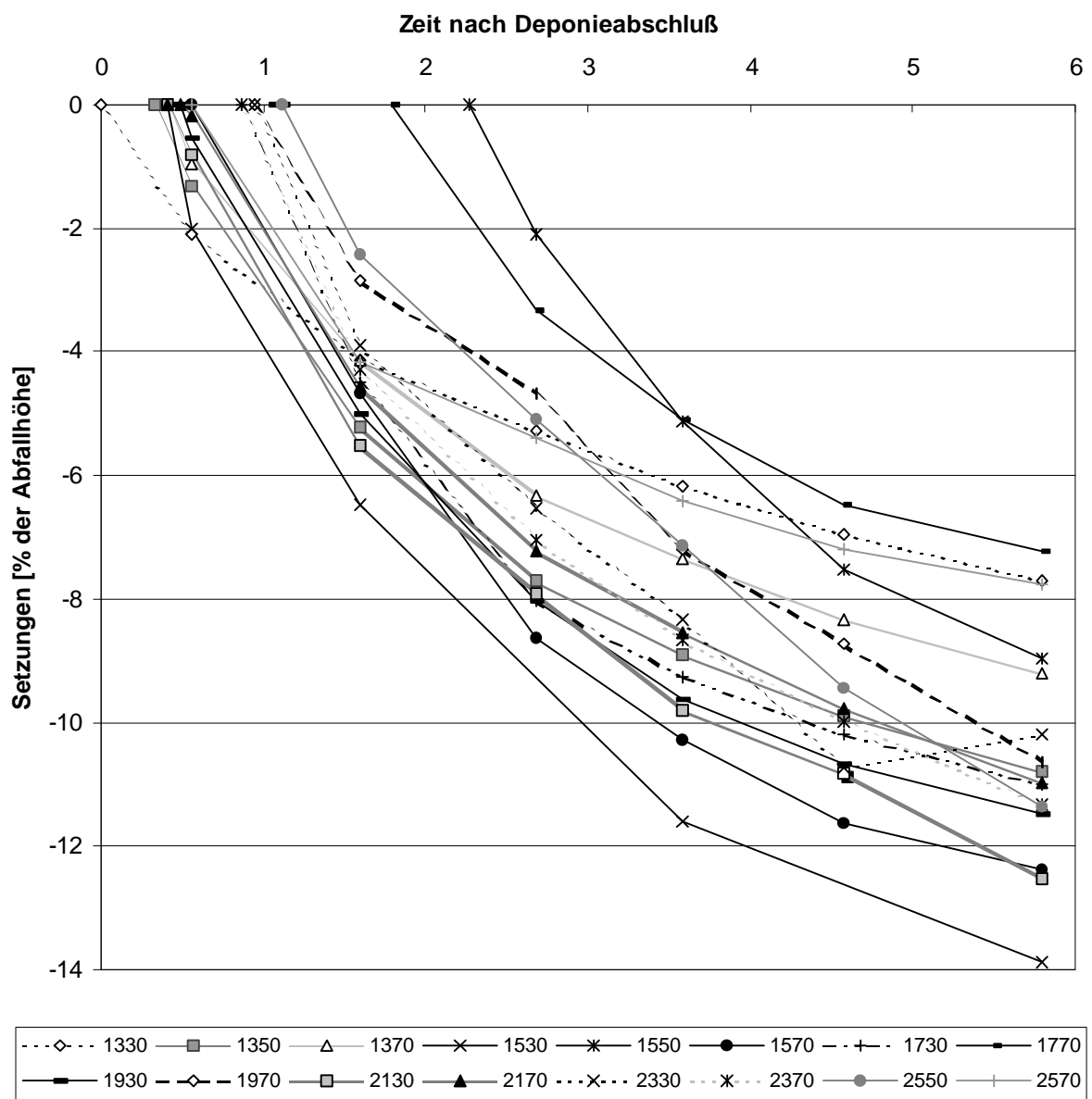


Abb. 36: Setzungsverläufe der Pegel der Deponie D19,II

Sowohl in ihrer Höhe als auch in ihrer mittelfristigen Setzungstendenz entsprechen die Pegel von D19,II in etwa den Setzungen des Pegels 13 des Deponieabschnitts D19,I. Das Setzungsverhalten ist bei beiden Abschnitten relativ einheitlich. Die Unterschiede der Setzungen des Abschnitts D19,II betragen bis zu 7 %, bei D19,I hingegen, abgesehen vom Pegel 13, nur ca. 1,5 %. Als Grund hierfür sind die unterschiedlichen Abfallzusammensetzungen an den untersuchten Meßstellen anzuführen.

In der Literatur sind bisher nur wenige Ergebnisse von Setzungsmessungen an Deponien veröffentlicht worden. Hierzu gehören u. a. die Daten der Deponie Leppe [SCHMIDT, 1993]. In Abb. 37 sind die Daten der Deponie Leppe bis ins Jahr 1997 graphisch dargestellt worden.

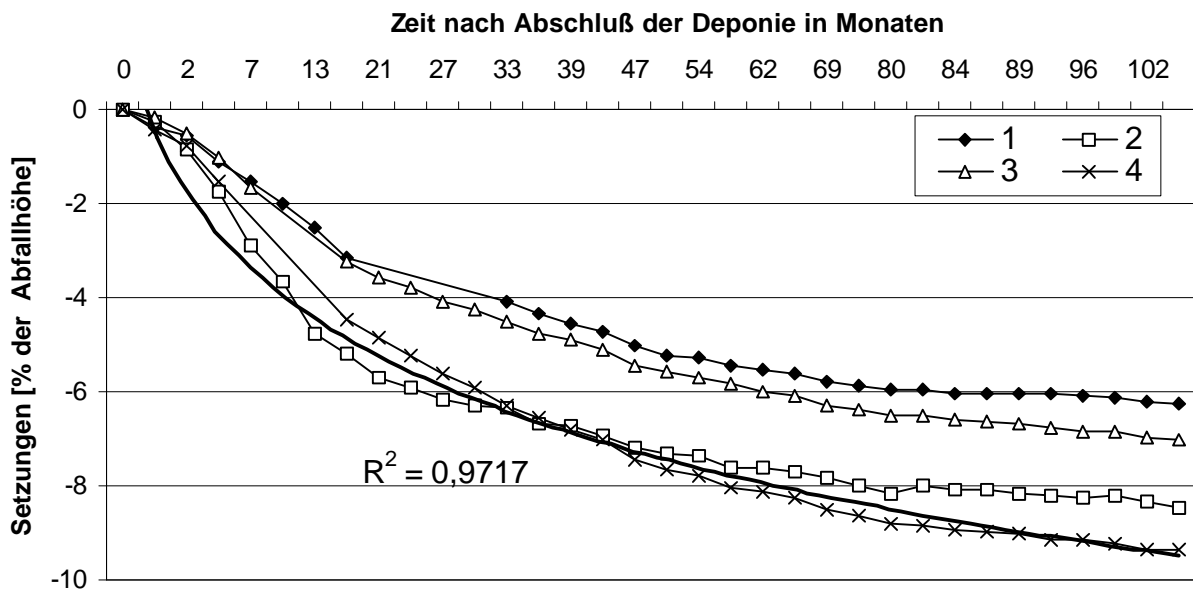


Abb. 37: Setzungsverläufe der Deponie Leppe aus SCHMIDT [1993], weitergeführt bis ins Jahr 1997

Auf der Deponie Leppe wurden insgesamt Setzungen von bis zu 9,4 % der Gesamtabfallhöhe in einem Zeitraum von 9 Jahren beobachtet. Die Extrapolation der Setzungen des Pegels 4 ergibt, daß nach 20 Jahren mit Gesamtsetzungen von bis zu 16 % der Abfallhöhe gerechnet werden muß. Als Ursachen für im Vergleich zur Deponie I (Abb. 38) geringeren Setzungen der Deponie Leppe sind der verzögerte Beginn der Setzungsmessungen (ca. 1 Jahr nach Verfüllende) und die Gestaltung der Oberflächenabdichtung zu nennen. Die temporäre Abdichtung der Deponie Leppe besteht aus einer Bentonitmatte und einer Rekultivierungsschicht. Die Mächtigkeit ist nicht bekannt. Die bisher betrachteten Deponien haben vor Beginn der Setzungsmessungen jeweils eine Bodenabdeckung bzw. mineralische Dichtung erhalten. Da eine 50 cm starke mineralische

Schicht schwerer ist als eine Bentonitmatte, könnte es zusätzlich zu den Setzungen, die auf Umsetzungsprozesse und den damit verbundenen Volumenverlusten basieren, bei den übrigen Deponien zu auflastbedingten Setzungen gekommen sein.

Mit Hilfe der Daten der nordrhein-westfälischen Deponie I wurde eine Extrapolation der Setzungskurven durchgeführt (Abb. 38). Nach 20 Jahren ist demnach mit Gesamtsetzungen von bis zu 28 % der Abfallhöhe zu rechnen. Nach weiteren 10 Jahren liegen diese bei 30 %. Dieses Resultat bedeutet, daß erst nach ca. 20 Jahren keine nennenswerten Setzungen mehr zu erwarten sind.

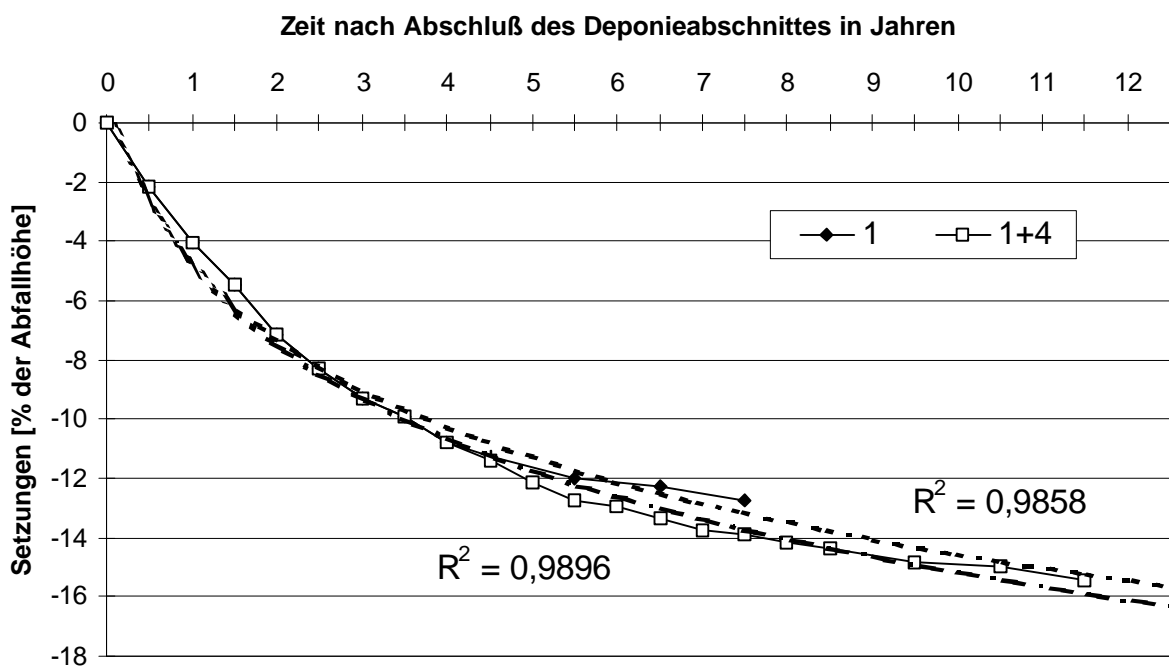


Abb. 38: Extrapolation der Setzungsverläufe der Deponie I (NRW)

Die extrapolierten Setzungswerte der verschiedenen Deponien geben lediglich Hinweise auf die maximal zu erwartenden Setzungen. Die hier ermittelten Setzungen stimmen mit Ergebnissen in der Literatur überein. JESSBERGER veröffentlichte 1992 einen Artikel, in dem er Setzungen prognostiziert, die zwischen 10-30 % relativ zur Abfallhöhe liegen.

4 Extrapolationen

Zur Abschätzung der Nachsorgedauer von Deponien sind Extrapolationen verschiedener Sickerwasserparameter- und Gasmengenverläufe durchgeführt worden. Bei der Prognose eines Nachsorgezeitraums geht es nicht um die Festlegung enger Grenzen, sondern um die Darstellung von Zeitintervallen, in denen ein Erzielen der Grenzwerte für realistisch erachtet wird. Als Grenzwerte für die Sickerwasserparameter werden die Direkteinleiterwerte des Anhangs 51 der Rahmen-AbwasserVwV zugrunde gelegt.

4.1 Sickerwasserparameter und Grenzwerte

Die ausschlaggebenden Parameter zur Bestimmung der Sickerwasserqualität sind die Summenparameter CSB, AOX, Stickstoff gesamt und die Schwermetalle. In der Tab. 16 sind die Grenzwerte des Anhangs 51 für die betreffenden Parameter aufgelistet.

Tab. 16: Grenzwerte des Anhang 51 der Rahmen-AbwasserVwV [N. N., 1996]

Parameter	Grenzwert	Einheit
CSB	200	mg/l
AOX	0,5	mg/l
Stickstoff gesamt	70	mg/l
Cadmium	100	µg/l
Chrom	500	µg/l
Nickel	1000	µg/l
Blei	500	µg/l
Kupfer	500	µg/l
Zink	2000	µg/l

In der TAsi werden keine Qualitätskriterien für das Ende der Nachsorge bzw. für das Entlassen des Betreibers aus der Nachsorge genannt. Grundvoraussetzung für die Entlassung aus der Nachsorge ist, daß kein umweltgefährdendes Deponiegas mehr aus dem Deponiekörper entweicht. Für den Emissionspfad Sickerwasser gilt das Ende der Nachsorgephase als erreicht, wenn die Sickerwasserkonzentrationen (ohne Verdünnung!) die Grenzwerte des Anhangs 51 einhalten und anhand der langjährigen Überwachungsdaten keine erneuten Erhöhungen über den Grenzwert erwartet werden können. Wenn dieses Ziel erreicht wird, ist eine Behandlung des Sickerwassers nicht mehr notwendig. Allerdings wird eine Hebung des Sickerwassers nach wie

vor auf den meisten der untersuchten Deponien notwendig sein, weil bei den Altdeponien i. d. R. kein freies Gefälle zum nächsten Vorfluter vorhanden ist.

Der jeweilige Zeitpunkt des Beginns der Direkteinleitung in ein Oberflächengewässer hängt zusätzlich von den einzelfallspezifischen Rahmenbedingungen ab, so muß z. B. der jeweilige Vorfluter, in den das immer noch leicht belastete Sickerwasser eingeleitet werden soll, über eine bestimmte Größe verfügen. Für eine eindeutige Definition des Endes der Nachsorge wäre es sinnvoll, daß der Gesetzgeber neben Grenzwerten für die Konzentrationen, Grenzwerte für die Frachten festlegen würde. Die Grenzwerte der Frachten müßten auf die jeweilige Deponiegröße und deponiespezifischen Gegebenheiten, wie z. B. die wasserrechtlichen Rahmenbedingungen Bezug nehmen bzw. auf unterschiedliche Standorte übertragbar sein. Falls dies nicht durchführbar ist, sind hier die jeweiligen Überwachungsbehörden gefordert, auf den Einzelfall abgestimmte Entscheidungen zu treffen. Durch dieses Verfahren würde es den Deponiebetreibern ermöglicht, sich auf die bisher ungewisse Dauer der Nachsorge betriebswirtschaftlich besser einzustellen.

4.1.1 Extrapolation des Parameters CSB

In Abb. 39 sind Extrapolationen für den Parameter CSB dargestellt. Die mittleren CSB-Konzentrationen wurden auf der Grundlage der Jahresmittelwerte der Einzeldeponien bestimmt. Deponien, die eine Sickerwasserbeeinflussung aufweisen, fanden bei der Berechnung der Extrapolationen keine Berücksichtigung.

Insgesamt wurden drei Ansätze gewählt:

- Maximaler potentieller Kurvenverlauf
- Minimaler potentieller Kurvenverlauf
- Exponentieller Kurvenverlauf

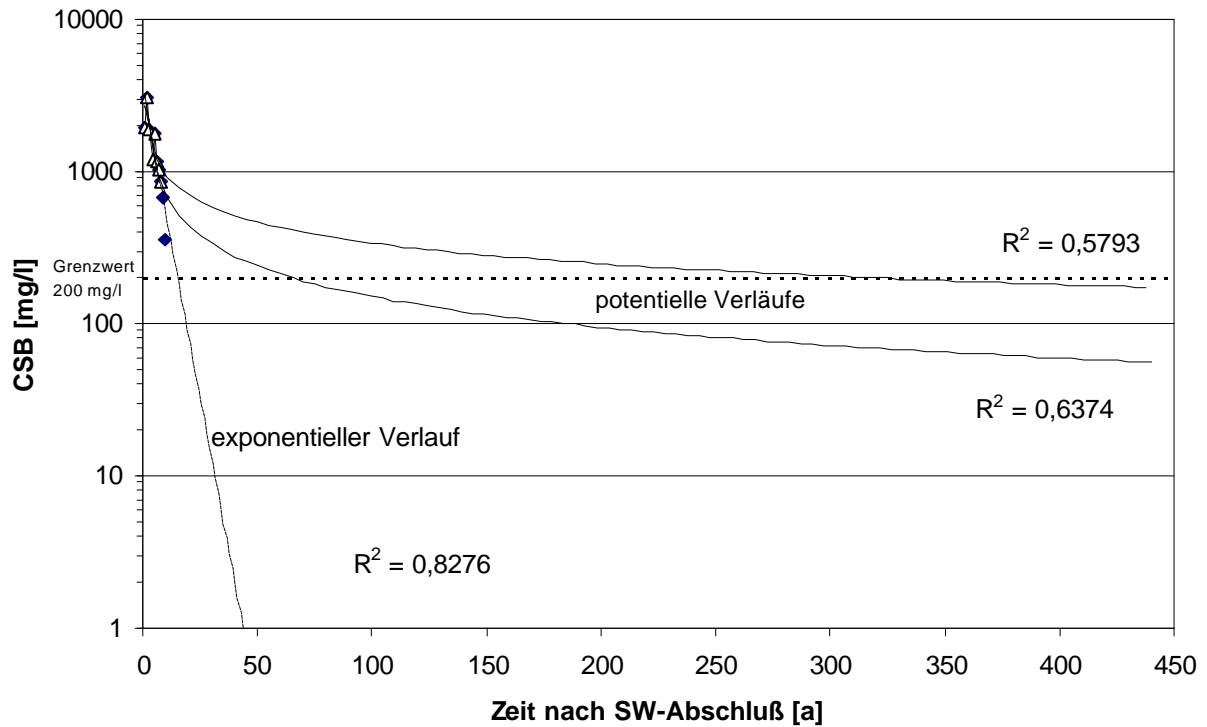


Abb. 39: Darstellung der Extrapolationen für den Parameter CSB

Anhand der Abb. 39 können unterschiedliche Aspekte eines typischen Sickerwasserkonzentrationsverlaufs des Parameters CSB veranschaulicht werden. Während der Verfüllphase einer Deponie und einer kurzen Zeitspanne nach dem Verfüllende verhält sich die CSB-Konzentrationskurve wie eine abfallende Exponentialfunktion. Nach dieser Phase findet eine nur noch geringe Konzentrationsabnahme pro Zeiteinheit statt. Dieser Rückgang verläuft immer langsamer, d. h. die Halbwertszeit nimmt zu. Die in Abb. 39 von den potentiellen Kurven eingeschlossene Fläche stellt das Konzentrationsintervall dar, in dem sich aller Voraussicht nach die CSB-Konzentrationen der Deponien in der Zeit nach dem Ablagerungsende befinden werden. Es zeigt sich, daß eine Konzentration von 800-1000 mg/l CSB in kürzester Zeit erzielt wird (Verlauf wird durch exponentielle Funktion hinreichend beschrieben). Eine darüber hinaus gehende Abnahme bis unterhalb des Grenzwertes 200 mg/l CSB erfordert hingegen, in Abhängigkeit von der jeweiligen Deponie, eine Zeitspanne von 65 bis 320 Jahren (Verlauf folgt eher einer potentiellen Funktion).

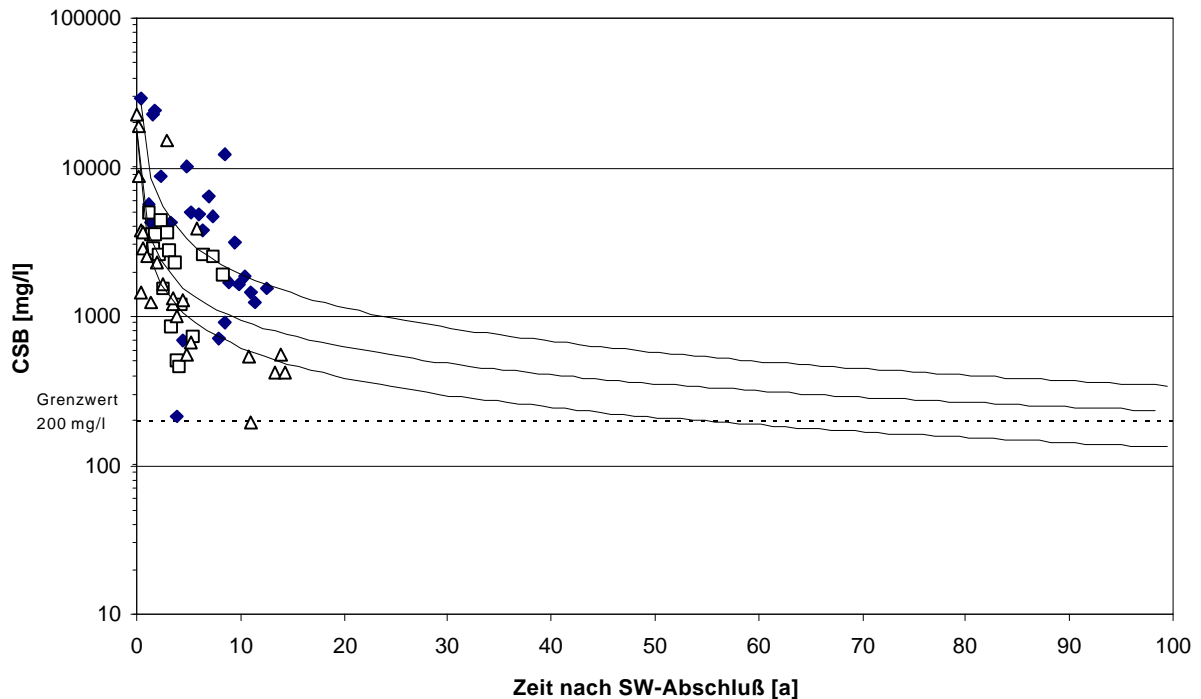


Abb. 40: Prognose der CSB-Konzentrationsverläufe der Deponien D1, D5,II und D9

Abb. 40 zeigt den prognostizierten CSB-Konzentrationsverlauf der Deponien D1, D5,II und D9. Anhand der Abbildung wird die Bandbreite einzelner Deponien hinsichtlich der CSB-Konzentrationen dargestellt. Das Sickerwasser der Deponie D1 wird den Grenzwert für den CSB des Anhangs 51 der Allgemeinen Rahmen-AbwasserVwV voraussichtlich bereits bis zum Jahre 55 nach dem Ablagerungsende erreichen. Das Sickerwasser des Deponieabschnitts D5,II erfüllt den Grenzwert für den Parameter CSB nach ca. 120 Jahren und die Deponie D9 nach ca. 200 Jahren. Die unterschiedlichen Zeiträume sind auf die eingebrachten Abfälle, den Deponieaufbau, die infiltrierende Wassermenge und die damit in Zusammenhang stehende mikrobiologische Aktivität im Abfallkörper zurückzuführen.

Generell basieren die rückläufigen CSB-Konzentrationen auf den Änderungen und der Art der im Abfallkörper stattfindenden Umsetzungsprozesse. Zu Beginn der Ablagerung kommt es auf Grund von aeroben Prozessen und der sich anschließenden sauren Phase zu einer hohen Konzentration an organischen Stoffen im Sickerwasser (hoher CSB). Hierbei handelt es sich um nahezu ausschließlich leicht abbaubare Substanzen. Im Zuge der fortschreitenden Verfüllung und der damit verbundenen Etablierung eines anaeroben Milieus verlagern sich die Emissionen ins Deponiegas. Der Anteil der schwer abbaubaren eluierbaren organischen Stoffe nimmt hingegen im Sickerwasser prozentual zu. Dies ist einerseits auf die fortschreitenden Reaktionen im

Abfallkörper (Bildung von Huminstoffen) und andererseits auf das Ausschwemmen von biologisch nicht bzw. nur schwer abbaubarer Substanz zurückzuführen. Das bedeutet für die CSB-Konzentrationen insgesamt einen stetigen Rückgang, wobei der schwer abbaubare CSB-Anteil im Sickerwasser immer größer wird. Für die langfristige Entsorgung des Sickerwassers innerhalb der Nachsorgephase muß mit einem gering belasteten Wasser gerechnet werden, dessen Inhaltsstoffe biologisch kaum noch abbaubar sind.

4.1.2 AOX-Extrapolationen

Die Extrapolation der AOX-Konzentrationen ist nur in einem bedingten Umfang möglich. Dies ist hauptsächlich auf die relativ geringe Datenanzahl zurückzuführen. Besonders aus den siebziger und achtziger Jahren gibt es nur sehr wenige Analysen. Häufig verlaufen die Konzentrationskurven des AOX sehr unstet, ohne das hierfür eine plausible Erklärung gefunden werden könnte. Eine langfristige Extrapolation der Konzentrationen einzelner Deponien wird als nicht zielführend erachtet.

In Abb. 41 ist auf der Grundlage der mittleren AOX-Jahreskonzentration fast aller Deponien eine Prognose erstellt worden, um einen Anhaltspunkt über das mögliche Verhalten dieses Parameters zu erhalten. Demnach würde dieser Sickerwasserparameter bis zum Erreichen des im Anhang 51 vorgegebenen AOX-Grenzwertes von 500 µg/l im Mittel ca. 90 Jahre benötigen.

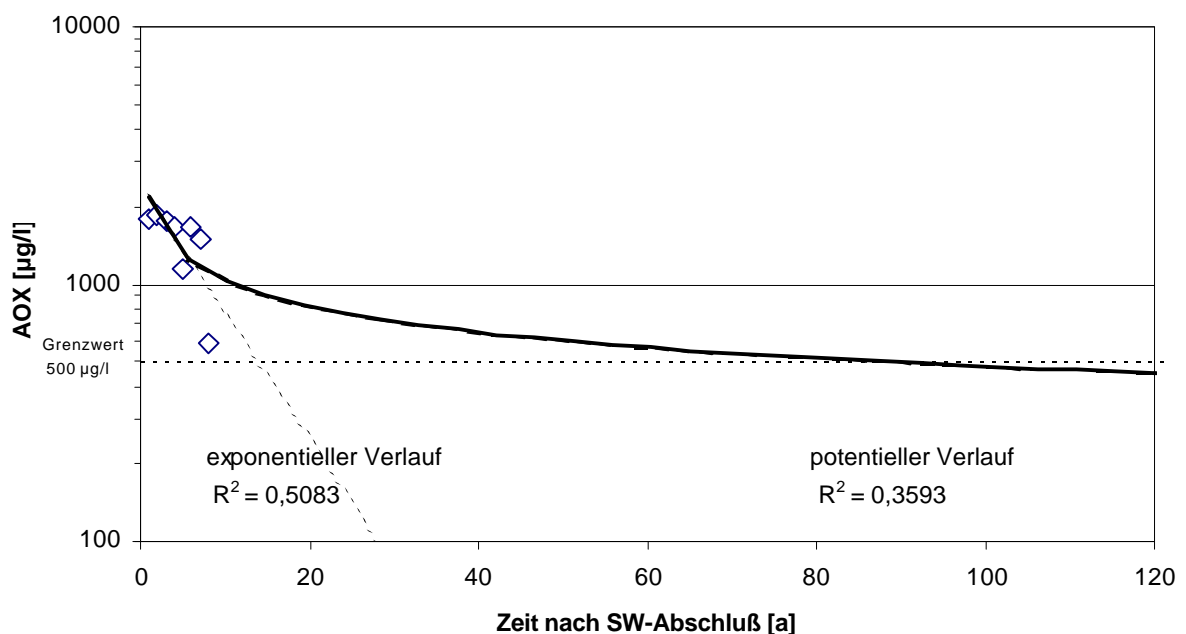


Abb. 41: Darstellung der Extrapolationen für den Parameter AOX

4.1.3 Extrapolation des Parameters Stickstoff gesamt

Die Extrapolation des Parameters Stickstoff gesamt ist nicht möglich. Die resultierenden Konzentrationskurven verlaufen zu unstet. Auf der Grundlage der vorliegenden Daten läßt sich nur eine qualitative Aussage treffen. Zu Beginn der Deponierung liegen die Konzentrationen in einem geringen Konzentrationsbereich. Mit zunehmendem Alter (siehe Tab. 5 bis 8) der Deponie steigen die Konzentrationen im Sickerwasser deutlich an, um im zuletzt beobachteten Zeitraum wieder leicht abzufallen. Hierbei handelt es sich in den seltensten Fällen um eine kontinuierliche Abnahme. Zumeist weisen die Konzentrationskurven starke Schwankungen auf. Langfristig wird mit einem Rückgang gerechnet, wobei die Einhaltung des im Anhang 51 der Rahmen-AbwasserVwV aufgestellten Grenzwertes für den Parameter Stickstoff gesamt von 70 mg/l mittelfristig beim überwiegenden Teil der Deponien als nicht realistisch angesehen wird. Stickstoff gesamt ist der ausschlaggebende Parameter, der die Dauer der Nachsorge bestimmt. Bei der Prognose des Konzentrationsverlaufs dieses Summenparameters stellt sich die Frage nach der langfristigen stofflichen Zusammensetzung des Stickstoff gesamt. Im bisher beobachteten Zeitraum setzt sich der gemessene Stickstoff in den meisten Fällen zu nahezu 90 % aus $\text{NH}_4\text{-N}$ zusammen. Bei geringeren Konzentrationen des Parameters Stickstoff gesamt (≤ 100 mg/l) geht der Anteil des $\text{NH}_4\text{-N}$ auf ca. 80 % zurück. Der übrige Stickstoff entfällt zum Großteil auf $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NO}_2\text{-N}$ sowie organische Stickstoffverbindungen. In welcher Weise sich diese Zusammensetzung über die Zeit noch verändert, ist gegenwärtig nicht eindeutig absehbar. Nach KUCKLICK ET AL. [1996] würde eine ansteigende $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration jedoch ein Indiz für die zunehmende Stabilisierung des Abfalls bedeuten.

Vom gegenwärtigen Standpunkt aus muß mit Nachsorgezeiträumen für den Parameter Stickstoff gesamt von mindestens einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten gerechnet werden. Hierbei ist zu beachten, daß dieser Parameter in den allermeisten Fällen die individuelle Dauer der Nachsorge einer Deponie bestimmen wird. Die Summenparameter CSB und AOX werden im Regelfall bei der einzelnen Deponie bereits früher die Grenzwerte für die Direkteinleitung einhalten. Möglicherweise muß in Zukunft über Einzellösungen (z. B. Schönungsteiche) zur Beseitigung des Stickstoffs gesamt im Sickerwasser nachgedacht werden.

4.1.4 Extrapolationen des Parameters Chlorid

Der Parameter Chlorid verhält sich aller Voraussicht nach nicht wie die bisher vorgestellten Parameter, da er im Abfallkörper keinerlei Abbaureaktionen unterliegt und auch keine Möglichkeiten zur Adsorption bestehen. Dieser Parameter unterliegt nahezu vollständig der

Elution durch das eindringende Niederschlagswasser. Demzufolge sind exponentielle Extrapolationen für diesen Parameter potentiellen Rechnungen vorzuziehen. In Abb. 39 sind unterschiedliche Varianten für den Konzentrationsverlauf dargestellt.

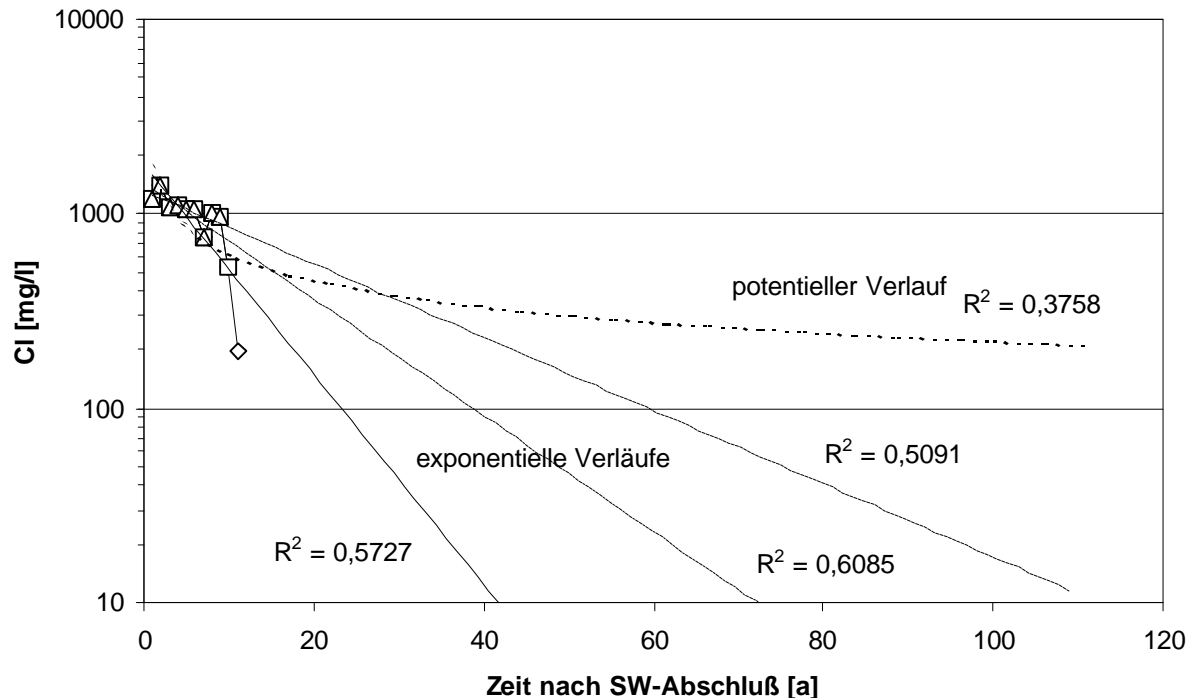


Abb. 42: Extrapolationen des Parameters Chlorid

Aus Abb. 42 geht hervor, daß die Chloridkonzentrationen bei vielen Deponien mit großer Wahrscheinlichkeit innerhalb von ca. 60 Jahren (siehe exponentielle Verläufe) einen Wert von 100 mg/l (Grenzwert der Schweizer Verordnung für oberirdische Gewässer) erreichen werden. Die Deponien mit extremen Chloridkonzentrationen wurden bei diesen Prognosen nicht mit einbezogen, da ihr Sickerwasserprofil nicht den durchschnittlichen Verlauf der Chloridkonzentrationen der Deponien widerspiegeln.

4.1.5 Extrapolationen der Schwermetalle im Sickerwasser

Das bisher dokumentierte Verhalten der Schwermetalle im Sickerwasser ist im Gegensatz zu den Erwartungen als sehr positiv zu bewerten. Die Schwermetalle werden, soweit dies für die nächsten Jahrzehnte oder Jahrhunderte absehbar ist und das Milieu im Abfallkörper keine grundlegenden Veränderungen erfährt, kein Hemmnis für die Direkteinleitung darstellen. Auf Grund ihres vom pH-Wert abhängigen Löslichkeitsverhaltens und Komplexierungsverhaltens, z. B. mit Huminstoffen, befinden sich die Konzentrationen der Schwermetalle in der überwiegenden Anzahl der Deponien bereits nach wenigen Betriebsjahren in einem

Konzentrationsbereich der unterhalb der im Anhang 51 der Rahmen-AbwasserVwV festgelegten Grenzwerte liegt.

4.1.6 Abschätzung der Nachsorgedauer anhand verschiedener Parameter

In Tab. 17 sind die Ergebnisse verschiedener Autoren zur Dauer der Nachsorgephase zusammengestellt worden.

Tab. 17: Tabellarische Gegenüberstellung der Ergebnisse unterschiedlicher Autoren zum Problem Nachsorgedauer

	Grenzwerte	BELEVI, BACCINI, 1989	KRUSE, 1994	HEYER ET AL., 1997	KRÜMPELBECK, EHRIG
C_{org} CSB	200 mg/l*	500-1700 Jahre -	- 280 Jahre	- 80-360 Jahre	- 65-320 Jahre
N_{ges} TKN NH₄-N	70 mg/l*	55-80 Jahre - -	- 815 -	- 120-450 Jahre -	- - Jahrzehnte bis Jahrhunderte
Chlorid	100 mg/l°	100-150 Jahre	210 Jahre	90-250 Jahre	25-60 Jahre bis 130 Jahre bei überdurchschnittli- chen Belastungen
AOX	0,5 mg/l*	-	-	30-210 Jahre	40-100 Jahre
Schwermetalle	0,1-2 mg/l*	-	-	-	< 10 Jahre

*Anhang 51 der Rahmen-AbwasserVwV; °Schweizer Verordnung

BELEVI UND BACCINI [1989] kommen demzufolge für den Parameter C_{org} auf eine Höchstdauer der Nachsorge von 1700 Jahren. Der Parameter, der sich hingegen für die übrigen Autoren am schwerwiegendsten auf die Dauer der Nachsorge auswirkt, ist der Parameter Stickstoff. Hier werden Nachsorgezeiträume von bis zu 850 Jahren [KRUSE, 1994] prognostiziert. BELEVI UND BACCINI [1989] prognostizieren für diesen Parameter einen geringeren Nachsorgezeitraum von bis zu 80 Jahren. Diese unterschiedlichen Prognosen sind einerseits auf die verwendete Methode zur Erstellung der Prognose und andererseits auf den untersuchten Abfall und die damit zuvor durchgeführten Prozesse zurückzuführen.

BELEVI UND BACCINI [1989] haben ihre Prognosen auf der Grundlage von einfachen Elutionsversuchen erhoben, die lediglich eine Auswaschung darstellen. Hierbei werden biologische Umsetzungsprozesse außer acht gelassen. Im Rahmen der Lysimeterversuche von KRUSE [1994] und HEYER ET AL. [1997] werden sowohl der Metabolismus von Mikroorganismen als auch zu einem überproportional großen Anteil Auswaschungsprozesse Einfluß auf die langfristigen Prognosen nehmen. Die Daten aus der Überwachung [KRÜMPELBECK UND EHRIG] schließlich

dokumentieren zum einen den jeweiligen echten Verlauf, der auf der Deponie gemessen wurde. Sie können aber auch zum Teil Probleme mit sich bringen, die durch die Art der Probenahme, den Probenahmezeitpunkt etc. verursacht werden. Die erhobenen Daten werden hauptsächlich durch die im Abfallkörper stattfindenden biologischen Prozesse geprägt.

4.2 Prognose der Gasmengen

In Abb. 43 sind die Gasmengen als Jahresmittelwerte unabhängig von den Deponien dargestellt. Hierbei sind sowohl die Daten des Untersuchungsvorhabens als auch die Daten der LUA-Studie [KRÜMPELBECK, 1996] mit in die Abbildung eingegangen.

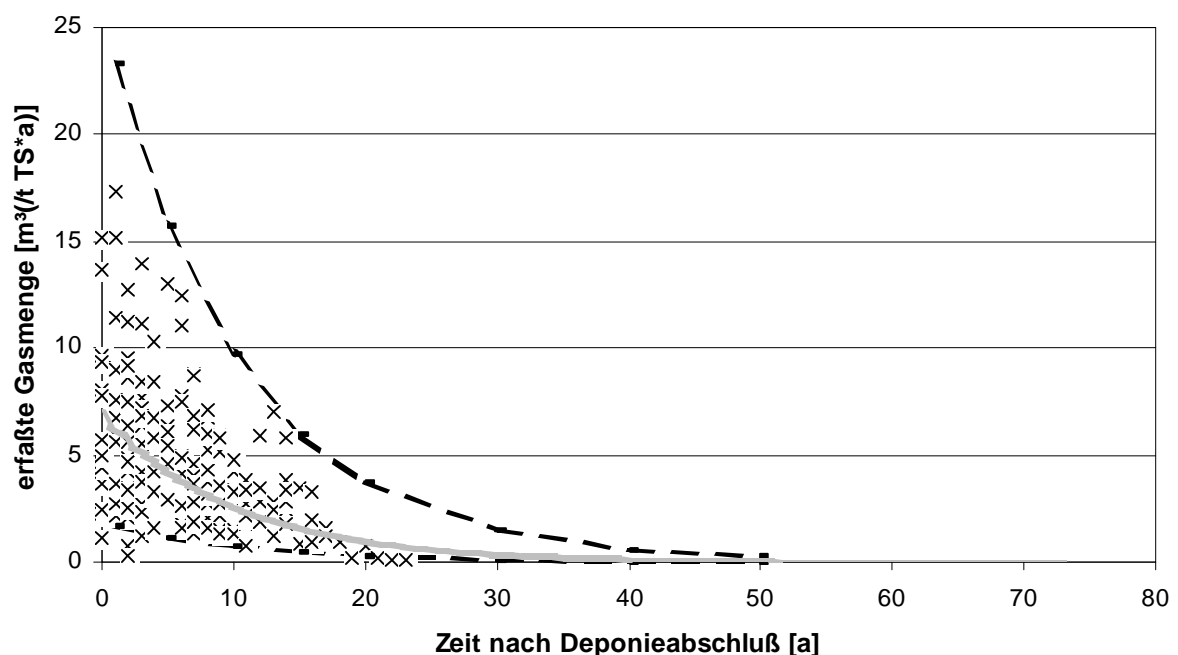


Abb. 43: Darstellung der erfassten Gasmengen als Einzelwerte

Es zeigt sich, daß die Gasmengen zu Beginn der Gasfassung eine relativ große Streuung aufweisen. Dies ist auf die Heterogenität der einzelnen Deponien, deren unterschiedliche Historie, Reaktivierung und vor allem auf die jeweilige Erfassungsrate zurückzuführen. Im Laufe der Zeit nähern sich die Werte der Gasmengen unterschiedlicher Deponien einander an. Nach ca. 20 bis 30 Jahren muß mit Gasmengen im Bereich von $\leq 1 \text{ m}^3/(\text{t TS} \cdot \text{a})$ gerechnet werden. Diese geringe Gasmenge wird in der Folgezeit durch die signifikante Verlängerung der Halbwertszeit nur noch geringfügig abnehmen. Eine Folge hiervon wird eine relativ konstante, geringe Gasemission über voraussichtlich mehrere Jahrzehnte sein. Voraussetzung für dieses Szenario ist, daß sich keine grundsätzlichen Randbedingungen, wie z. B. der Oberflächenabschluß, bei den untersuchten

Deponien ändert. Bei einer frühzeitigen Aufbringung einer wasserundurchlässigen Oberflächenabdichtung ohne die Möglichkeit zur Reinfiltration von Wasser ist ein früherer und möglicherweise noch stärkerer Rückgang der Gasmengen zu erwarten. Dennoch werden auch auf diesen Deponien noch über längere Zeiträume Emissionen auf geringstem Niveau auftreten. Die Ursache für den starken Rückgang sind die bereits frühzeitig zum Erliegen kommenden Umsetzungsprozesse im Deponiekörper auf Grund von Wassermangel bzw. fehlendem Nährstoffaustausch durch die abnehmende Wasserbewegung. Ein in der TAsi formuliertes Schutzziel (Nr. 1.1.1) wird durch dieses Vorgehen unterlaufen. Die nächsten Generationen werden durch diese Vorgehensweise mit dem Abfall aus der heutigen Zeit belastet, da keine weitere nachhaltige Entfrachtung oder Inertisierung stattfindet und die Emissionen erst nach Versagen der technischen Oberflächenabdichtung wieder auftreten. Zu diesem Zeitpunkt sind die technischen Randbedingungen, wie z. B. eine Entgasungsanlage, aller Voraussicht nach nicht mehr funktionstüchtig.

In Tab. 18 sind konservative Prognosen über die Gasmengenentwicklung und den Konzentrationsverlauf der Sickerwasserparameter CSB und Chlorid dargestellt, um einen Überblick über die zu erwartenden Emissionsbandbreiten im Sickerwasser und über die Höhe der Gasemissionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Deponieabschluß zu erhalten.

Tab. 18: Prognose des mittleren Emissionsintervalls von Siedlungsabfalldeponien zu verschiedenen Zeitpunkten, basierend auf den bisherigen Abschätzungen und der einzelnen Konzentrationsverläufe

Zeitpunkt [Jahre nach Abschluß der Deponie]	Gasmenge	CSB-Konzentration	Chlorid-Konzentration
10	$\leq 10 \text{ m}^3/(\text{t TS} \cdot \text{a})$	500 - 3.500 mg/l	900 - 3.000 mg/l
30	$\leq 1 \text{ m}^3/(\text{t TS} \cdot \text{a})$	400 - 1.000 mg/l	400 - 1.000 mg/l
50	$\leq 0,5 \text{ m}^3/(\text{t TS} \cdot \text{a})$	300 - 800 mg/l	100 - 500 mg/l

Hierbei wurden die Gasmengen auf der Grundlage der Abb. 43 abgeschätzt. Für die Prognose der zu erwartenden CSB- und Chloridkonzentrationen wurden neben den bereits dargestellten Extrapolationen (Abb. 39, 40, 42) auch Extrapolationen der Einzelverläufe berücksichtigt. Extreme wurden im Rahmen dieser konservativen Abschätzungen - insbesondere für den Parameter Chlorid - nicht einbezogen.

Anhand der Gegenüberstellungen wird deutlich, daß das Deponiegas in einem überschaubaren Zeitraum kein Problem mehr hervorruft. Nach 30 Jahren sind die Gasemissionen mit den bisherigen technischen Mitteln kaum noch zu erfassen. Zu diesem Zeitpunkt sollten passive Systeme die Beseitigung der geringen Gasvolumenströme übernehmen. Eine Möglichkeit stellt die Methanoxidation in der obersten Lage der Rekultivierungsschicht dar.

Im Gegensatz dazu sind die Belastungen des Sickerwassers auch nach 50 Jahren noch umweltrelevant und erfüllen im Regelfall nicht die Grenzwerte des Anhangs 51 der Rahmen-AbwasserVwV. Der CSB erreicht bzw. unterschreitet 30 - 50 Jahre nach Abschluß teilweise bereits bei einigen Deponien die Grenzwerte für die Indirekteinleitung von Abwässern. Beim Großteil der untersuchten Deponien wird dies allerdings keine Konsequenzen nach sich ziehen, da viele von ihnen bereits ihr höher belastetes Sickerwasser in der nahegelegenen kommunalen Kläranlage reinigen lassen.

Der Parameter $\text{NH}_4\text{-N}$ oder $\text{N}_{\text{ges.}}$, der auf Grund seiner Konzentrationsentwicklung schwierig zu extrapolieren ist, wird voraussichtlich noch weiterhin Konzentrationen erreichen, die als umweltrelevant zu bezeichnen sind. Die Tab. 18 zeigt zudem, daß die Konzentrationen und darauf basierend auch die Frachten pro Zeiteinheit deutlich abnehmen. Dies bedeutet aber nicht, daß das gesamte Emissionspotential des Abfallkörpers bereits aus dem Abfall eluiert bzw. migriert ist. Beim Gaspotential wird nach 50 Jahren nur noch ein geringes Restpotential von 5 - 15 % des gesamten Potentials abgeschätzt. Bei den durch das Sickerwasser eluierbaren Stoffen müssen noch deutlich höhere Restpotentiale von über 50 % des Ausgangspotentials erwartet werden, die in geologischen Zeiträumen aus dem Abfallkörper entweichen können. Etwaige Unterschiede in der Höhe des jeweiligen Restpotentials zwischen dem Parameter CSB und Chlorid sind auf die jeweils abgelagerten Abfälle und das biochemische Verhalten zurückzuführen. Beim CSB handelt es sich um einen Parameter, der verstärkt mikrobiologischen Umsetzungsprozessen unterworfen ist und somit während der sauren Phase sehr hohe Konzentrationen und danach signifikant geringere aufweist. Demgegenüber ist der Parameter Chlorid nahezu ausschließlich Elutionsprozessen unterworfen, so daß die Konzentrationsabnahme neben der Ausgangskonzentration von der durchsickerten Menge an Wasser abhängig ist.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Untersuchungsvorhabens "Abschätzung der Restemissionen von Deponien in der Betriebs- und Nachsorgephase auf der Basis realer Überwachungsdaten" wurden Überwachungsdaten von insgesamt 53 Deponien erhoben. Das Ziel des Vorhabens bestand in der Abschätzung der Dauer der Nachsorgephase von Deponien, die mit unbehandeltem Abfall verfüllt wurden. Darüber hinaus wurde anhand der Darstellung der Konzentrationsverläufe verschiedener Parameter ein detailliertes Bild der Sickerwasserqualität unterschiedlicher Deponien aufgezeigt.

5.1 Sickerwasserqualität

Die Sickerwasserqualität insbesondere zu Beginn einer Ablagerung hat sich in den letzten 20 Jahren stark verbessert. Deponien, die Anfang der siebziger Jahre betrieben wurden, weisen eine lange saure Phase mit hohen CSB bzw. BSB₅-Konzentrationen auf (siehe Abb. 10 und 11). Jüngere Deponien lassen eine kürzere, weniger intensive saure Gärungsphase erkennen (siehe Abb. 9). Dieses veränderte Verhalten wird weitestgehend auf die verbesserte Deponietechnik zurückgeführt.

Bei einigen Deponien konnte außerdem anschaulich dargestellt werden, welche Auswirkungen einzelne Abfälle auf die Sickerwasserqualität haben. So korrelierte ein hoher Sulfatgehalt mit großen Mengen abgelagertem Bauschutt (siehe Abb. 13), größere Mengen an Industrieschlamm und MVA-Schlacke bewirkten eine höhere Konzentration an Anionen und Kationen im Sickerwasser (siehe Abb. 14), wobei ein gleichzeitiger Anstieg der Schwermetallkonzentrationen nicht dokumentiert werden konnte. Es zeigte sich, daß auch geogene und anthropogene Hintergrundbelastungen, je nach Standort, Einfluß auf die Qualität des Sickerwassers nehmen können. Die Kenntnis der standortspezifischen Hintergrundbelastungen ist aber vor allem für die Beurteilung von Grundwasserkontaminationen von großer Bedeutung.

Basierend auf den Ergebnissen der Auswertungen der Sickerwasserqualitätsdaten und ihrer Historie wurden die Deponien in 5 Gruppen eingeteilt. Die jeweilige Zuordnung erfolgte unter dem Aspekt der langfristigen Entwicklung der Sickerwasserqualität. Die Einteilung der Deponien in die unterschiedlichen Gruppen sollte nicht als starres Element verstanden werden, sondern als Hilfsmittel, um die Deponien besser vergleichen zu können.

- (1) Deponien mit kurzer saurer Phase und geringen Schwermetallkonzentrationen
- (2) Deponien aus dem ländlichen Raum, Anfang der Verfüllung in den 60er und 70er Jahren, mit ausgeprägter saurer Phase und hohem Retentionsvermögen
- (3) Deponien mit zumindest zeitweiliger Sickerwasserrückführung
- (4) Deponien mit einem vermuteten Fremdwassereinfluß und dementsprechend geringeren Sickerwasserkonzentrationen
- (5) Deponien mit hohen anorganischen Sickerwasserbelastungen, die in den meisten Fällen auf den Einbau von Industrieabfällen oder MVA-Schlacken zurückzuführen sind

Mit Hilfe von Trendextrapolationen einzelner Sickerwasserparameter wurde die Dauer der Nachsorge prognostiziert. Als Grenzwerte dienten die Vorgaben des Anhangs 51 der Rahmen-AbwasserVwV. Der demnach zeitbestimmende Faktor ist Stickstoff gesamt. Die Parameter CSB und AOX weisen in der Regel deutlich kürzere Nachsorgezeiträume auf. Im Durchschnitt muß mit einer mindestens 100-jährigen Nachsorgephase gerechnet werden. In diesem Zeitrahmen ist der Parameter Stickstoff gesamt zumeist noch nicht berücksichtigt worden, d. h. hier wird ein noch längerer Zeitraum als Nachsorge erwartet. Langfristig sollten Lösungen entwickelt und erprobt werden, die einen möglichst geringen Wartungsaufwand erfordern, gleichzeitig aber eine deutliche Reduzierung des Stickstoff gesamt, speziell dessen Anteil an $\text{NH}_4\text{-N}$, bewirken. Möglicherweise stellen Pflanzenkläranlagen oder Schönungsteiche eine geeignete Lösung dar.

Deponien mit Fremdwasserbeeinflussung könnten aufgrund der bisherigen Regelungen mit einem gegenüber anderen Deponien um mehrere Jahrzehnte kürzeren Nachsorgezeitraum rechnen, da ihre Sickerwasserkonzentrationen in den meisten Fällen sehr viel geringer sind als bei den übrigen Deponien (siehe Anhang 1, Abbildungen der Deponien der Gruppe 4 aus Tab. 10). Eine sinnvollere Möglichkeit zur zeitlichen Eingrenzung der Nachsorge wäre deshalb die Festlegung von Frachtgrenzen pro Zeiteinheit bezogen auf die jeweilige Deponiegröße und den standortspezifischen Randbedingungen.

Da die genannten Parameter Stickstoff gesamt, CSB und AOX durch ihren Verlauf die Dauer der Nachsorgephase bestimmen, können sie als Leitparameter bezeichnet werden. Nach KUCKLICK [1996] reicht eine rückläufige Konzentration der genannten Parameter allein aber noch nicht zum Beweis der weitestgehenden Inertisierung einer Deponie aus. Hierzu müßten weitere Parameter herangezogen werden. Als mögliche Parameter nennt er Nitrat und Eisen.

5.2 Sickerwassermenge und Oberflächenabdichtung

Die Auswertung der vorliegenden Sickerwassermengenentwicklungen hat gezeigt, daß die Höhe der absoluten Sickerwassermenge vor allem von

- der Deponietechnik,
- der Art der Oberflächengestaltung einer Deponie und
- der Niederschlagshöhe abhängig ist.

Anhand mehrerer Beispiele (siehe Abb. 21 bis 24 oder Anhang 2) konnte demonstriert werden, daß sowohl eine mineralische Abdichtung als auch eine mehrere Meter mächtige Bodenabdeckung in Zusammenhang mit der Rekultivierung der Deponiefläche einen reduzierenden Einfluß auf die absolute und die relative Sickerwassermenge hat. Während des Abfalleinbaus hingegen muß je nach Größe der offenen Fläche und Verdichtung des Abfalls mit einer prozentualen Sickerwassermenge von bis zu 50 bis 60 % des anfallenden Niederschlages gerechnet werden (siehe u. a. Abb. 19 und 20). Bei einer mineralischen Oberflächenabdichtung sind Sickerwassermengen von 10 bis 40 % des Niederschlages zu erwarten (siehe Abb. 23 und 24). Mehrere Meter mächtige Bodenabdeckungen führen zu Sickerwassermengen, die zwischen 15 und 40 % des Niederschlages liegen (siehe Abb. 21 und 22), wohingegen gering mächtige Bodenabdeckungen keinen positiven Einfluß auf die Reduzierung der Sickerwassermengen erkennen lassen (siehe Abb. 19 und 20). Sie verhindern lediglich Papierflug, Ungezieferbefall und bewirken eine optische Verbesserung der Deponie. Die Prozentangaben stellen Anhaltswerte für eine durchschnittliche Deponie dar. Kommt es bei Einzeldeponien im Vergleich zu anderen Deponien mit ähnlichen Rahmenbedingungen zu signifikant geringeren Sickerwassermengen, so kann dies ein erstes Indiz für eine Infiltration in den Untergrund sein.

Bei der Bewertung der zu behandelnden Sickerwassermengen gibt es bei nahezu allen älteren Deponien ein zentrales Problem. Dieses umfaßt den Bereich Basisabdichtung und die Funktionstüchtigkeit des Sammlersystems. Auf Grund der noch nicht dem Stand der Technik entsprechenden Bauweise vieler Sammlersysteme kann eine Kamerabefahrung zur Kontrolle der Durchgängigkeit und Funktionstüchtigkeit der einzelnen Stränge in vielen Fällen nicht vorgenommen werden, so daß keine Aussagen über den gegenwärtigen Zustand gemacht werden können. Eine Kontrolle der Basisabdichtung, die nicht in jedem Fall vorhanden ist, kann ebenfalls nicht durchgeführt werden, da dies umfangreiche Aufgrabungsarbeiten erfordern würde. Allerdings wird davon ausgegangen, daß negative Veränderungen - von Fehlern beim Einbau

abgesehen - schleichend erfolgen, so daß ein bislang funktionstüchtiges Sammlersystem nicht in kürzerer Zeit große Mengen Wasser in den Untergrund infiltriert. Signifikante Veränderungen können durch die konsequent betriebene Dokumentation der Daten leichter erkannt werden, da Veränderungen im Rahmen von Kurvenverläufen schneller wahrgenommen werden. Wenn die Analysenergebnisse ohne vorher erfolgte Auswertung aufbewahrt werden, ist dies nicht möglich. Geringe Sickerwasserinfiltrationen in das die Deponie umgebende Erdreich sind nur schwer nachweisbar. In vielen Fällen läßt sich die Funktionstüchtigkeit der Basis nur indirekt durch die Grundwasserüberwachung nachweisen.

5.3 Gasmenge

Im Rahmen der hier ausgewerteten Gasmengendaten unterschiedlicher Deponien konnte demonstriert werden, daß die aus dem Deponiekörper entfernten Gasmengen nach dem Ende der Ablagerung innerhalb von 10 bis 20 Jahren auf Mengen $\leq 2 \text{ m}^3/(\text{t TS} \cdot \text{a})$ (siehe Abb. 32 und 33) zurückgehen. In den darauffolgenden Jahrzehnten ist mit Gasmengen $\leq 1 \text{ m}^3/(\text{t TS} \cdot \text{a})$ zu rechnen. Die Unterschiede zwischen den erfaßten Gasmengen sind auf folgende Faktoren zurückzuführen:

- Abfall,
- Deponietechnik,
- Milieubedingungen der Mikroorganismen,
- Erfassungsrate,
- Qualität und Wartung des Entgasungssystems.

Die Gaserfassungsrate variiert von Deponie zu Deponie. Sie ist abhängig von der Effizienz der Entgasungsanlage und von der Oberflächenabdichtung. Bei offenen Flächen liegt sie im Bereich von $< 50 \%$. Die höchsten Erfassungsraten werden unterhalb einer Kunststoffdichtungsbahn oder Kombinationsabdichtung erzielt, da hier die Möglichkeit der Luftansaugung am geringsten ist und damit ein größerer Unterdruck angelegt werden kann. Andererseits besteht die Gefahr der Austrocknung des Deponiekörpers und der daraus resultierenden, für biologische Prozesse zu geringen Wasserbewegung, wodurch die Umsetzungsreaktionen verlangsamt werden bzw. möglicherweise langfristig vollständig zum Erliegen kommen. Beispiele für dieses Verhalten gibt es bereits in der Literatur [BAUER ET AL., 1997; KRÜMPELBECK UND EHRIG, 1998]. Um diesem Szenario vorzubeugen, wäre eine gezielte Bewässerung unterhalb des Oberflächenabdichtungssystems notwendig. Allerdings ist dieses Vorgehen nur bei Deponien sinnvoll, bei denen nachgewiesen wurde, daß noch ein umweltrelevantes Gaspotential vorhanden ist.

6 Empfehlungen für den langfristigen Umgang mit Deponien, die mit unvorbehandeltem Abfall verfüllt worden sind

Die Zielsetzung des durch das BMBF geförderten Untersuchungsvorhabens "Abschätzung der Restemissionen von Deponien in der Betriebs- und Nachsorgephase auf der Basis realer Überwachungsdaten " ist die Prognose der Dauer der Nachsorgephase. Dies wurde anhand der Darstellung einzelner Parameter durchgeführt. Zudem wird durch die große Anzahl der untersuchten Deponien, die sich auf dem Gebiet der alten Bundesländer verteilen, ein Gesamtbild der gegenwärtigen Emissionssituation und der -entwicklung älterer Deponien aufgezeigt (siehe Abb. 9 - 15).

Die im Rahmen dieses Berichtes dargestellten Ergebnisse lassen nach Ansicht der Autoren folgenden Schluß zu: Das Aufbringen eines wasserundurchlässigen Oberflächenabschlusses ist im Sinne der TASI nicht grundsätzlich zielführend, da solch eine Abdichtung nicht zur Inertisierung führt, sondern zur Konservierung des Abfalls beiträgt und dadurch das Problem, entgegen dem Ziel der TASI, auf zukünftige Generationen verlagert. Demnach sind Kombinationsabdichtungen oder Kunststoffdichtungsbahnen als alleinige Abdichtungsmaßnahme auf die Ablagerungsstandorte zu begrenzen, an denen eine Grundwassergefährdung zu befürchten ist oder bereits Verunreinigungen aufgetreten sind. Bei allen anderen Deponien, die mit organischem Abfall verfüllt wurden, wird eine schnellstmögliche Reduzierung der abbaubaren Fraktion unter weitgehend kontrollierbaren Randbedingungen (Sickerwassersammlung, Deponiegasabsaugung) für geeigneter erachtet. Verfahren zur weitestgehenden Inertisierung oder Reduktion des Emissionspotentials sind bereits erprobt (Deponierückbau) oder befinden sich in der Versuchsphase (In-situ-Stabilisierung entweder durch Aerobisierung und oder Auswaschung).

Ein weiteres Argument gegen den völligen Abschluß der Deponien durch eine Oberflächenabdichtung stellt deren endliche Lebensdauer dar. Selbst Befürworter eines schnellen und effizienten Oberflächenabschlusses gehen von einer nur endlichen Lebensdauer der Kombinationsabdichtung aus [BOTHMANN, 1998]. Hierbei wird über einen Mindestzeitraum von 100 Jahren diskutiert. Was nach dem Versagen des Oberflächenabdichtungssystems mit dem konservierten Abfall zu geschehen hat, bleibt offen. Eine wiederholte Erneuerung des Oberflächenabdichtungssystems nach dessen Versagen wird angesichts des Umgangs mit den heutigen Altlasten und der finanziellen Lage vieler kommunaler Entsorger als nicht realitätsnah angesehen.

Im Rahmen der Ergebnisdarstellung konnte gezeigt werden, daß mineralische Abdichtungen zu einer meßbaren Verringerung der Sickerwassermenge führen, wodurch die Kosten für die Sickerwasserreinigung gesenkt werden können. Sie stellen somit eine Kompromißlösung dar. Allerdings ist eine genügend mächtige Rekultivierungsschicht notwendig, um ihre Funktionstüchtigkeit zu erhalten. Ansonsten kann es, verursacht durch Austrocknung und Rißbildung, nach einigen Jahren zu einem hohen Sickerwasseranfall kommen, der wiederum zu hohen Kosten bei der Sickerwasserreinigung führt. MELCHIOR [1999] legte dar, daß bei modifizierten mineralischen Abdichtungen (Trockeneinbau, weitgestufte Mischungen, Vergütung mit Additiven) Rißbildungen und daraus resultierend Austrocknungserscheinungen kaum noch zu besorgen sind. Möglicherweise stellen diese Art der Dichtungen eine langlebigere Alternative gegenüber den übrigen Dichtungssystemen dar. Insgesamt erscheint eine einzelfall-spezifischere Sichtweise im Umgang mit den Altdeponien für angebracht. Es kann nicht eine einzige Lösung für alle Deponien geben.

Einen pragmatischen, aber zukunftsweisenden Weg zum zukünftigen Umgang mit den Altdeponien zeigt HOINS [1998] auf. Er schlägt vor, die Altdeponien nach dem Prinzip der Gefahrenabwehr in Anlehnung an die Vorgehensweise bei Altablagerungen zu behandeln. Das Vorsorgeprinzip der TASI hält er hinsichtlich der Forderungen zum Oberflächenabdichtungssystem für nur bedingt sinnvoll. Zudem verweist auch HOINS darauf, daß das jeweilige Oberflächenabdichtungssystem auf die einzelfallspezifischen Randbedingungen abgestimmt sein sollte und eine auf den Einzelfall abgestimmte Entscheidung notwendig macht. Für die ersten Jahrzehnte nach Deponieabschluß wird diese Vorgehensweise nicht als zielführend erachtet, da es sich bei den zur Diskussion stehenden Deponien i. d. R. um sehr viel größere Objekte handelt als bei den Altablagerungen, die heute als Altlasten gelten. Bei den untersuchten Deponien muß zu allererst die Frachtreduzierung im Vordergrund stehen.

Der Rückbau von Deponien wird ebenfalls als ein sinnvoller Beitrag zur Verringerung von Emissionen und zur Verkürzung der Nachsorgedauer angesehen, da mit Hilfe dieser Maßnahme das Schadstoffpotential in kürzester Zeit signifikant vermindert wird. Beim Rückbau wird es in Zukunft nicht nur um die Frage der Neugewinnung von Deponieraum gehen, sondern um die Verkürzung der Nachsorgedauer, die damit verbundene Möglichkeit der frühzeitigeren Nutzung des Geländes und die dadurch insgesamt geringeren Kosten der Deponienachsorge. Der Rückbau wird im Gegensatz zu den übrigen Maßnahmen dadurch charakterisiert, daß bei ihm

Teilfraktionen der ausgekofferten Stoffe einer Verwertung zugeführt werden [WISKEMANN UND HARDES, 1998]. RETTENBERGER [1997] dokumentierte anhand des von ihm durchgeführten Rückbauprojektes auf der Deponie Burghof, daß

- 3,9 % stofflich verwertbare Anteile, wie Steine und Metalle,
- 17,1 % thermisch verwertbare Anteile, vor allem eine Leichtfraktion mit einem Heizwert von 20 MJ/kg,
- sowie 79,0 % nicht verwertbare Abfälle enthalten waren.

Die von Rettenberger dargestellte Zusammensetzung der Abfälle beinhaltet für dieses konkrete Deponiebeispiel ein bis zu 21 %-iges Volumeneinsparpotential, welches gleichzeitig zu einer Verminderung des Emissionspotentials führen würde.

Zudem wird davon ausgegangen, daß 3 - 5 % des Gesamtvolumens von Rückbauprojekten als Sonderabfälle qualifiziert werden können, die somit entfernt und gesichert werden [WISKEMANN UND HARDES, 1998]. Die so entstandenen Deponien entsprechen hinsichtlich ihrer Ausstattung dem neuesten technischen Stand, verursachen auf Grund der erzielten Feuchteinbaudichten von bis zu 1,86 t/m³ [RETTENBERGER, 1997] nur noch geringe SW-Mengen pro Zeiteinheit und verfügen auf Grund der verwerteten und aussortierten Anteile über ein vermindertes reaktives Schadstoffpotential.

Eine weitere Möglichkeit zur Verkürzung der Nachsorgedauer besteht in der Intensivierung der Umsetzungsprozesse durch Aufbringen einer temporären Kunststoffdichtungsbahn in Verbindung mit der Reinfiltration von Wasser unterhalb der Dichtung. Hierdurch werden einerseits die Umsetzungsprozesse im Abfallkörper aufrechterhalten oder möglicherweise sogar beschleunigt [KOSTERER, DREES, KUTSCH, 1997], andererseits kann eine hohe Erfassungsrate erzielt werden, wodurch die Gasemissionen auf ein Minimum reduziert werden. Beispiele für eine erfolgreiche Reinfiltration wurden in der Literatur bereits veröffentlicht [BAUER, 1997; KRÜMPELBECK UND EHRIG, 1998]. Allerdings muß auch diese Möglichkeit auf den Deponieeinzelfall (Bestimmung des Gaspotentials) abgestimmt werden.

Insgesamt ist im Bereich Oberflächenabdichtung noch Forschungsbedarf zu leisten, um einen kausalen Zusammenhang zwischen dem langfristigen Rückgang der Gasmengen und einer Kunststoffdichtungsbahn- oder Kombinationsabdichtung eindeutig zu verifizieren oder zu

falsifizieren. Dies wird erst in einigen Jahren möglich sein, wenn die Deponien mit Kunststoffdichtungsbahn- oder Kombinationsabdichtung über mehrjährige Erfahrungen mit ihren Oberflächenabdichtungen verfügen und ihr Gasmengenverhalten und die Ergebnisse zur Bestimmung des Gaspotentials dem von Deponien mit mineralischer Abdichtung oder Bodenabdeckung direkt gegenübergestellt werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- ANDREOTTOLA, G. ET AL. Overview on landfill leachate quality, CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Technical Note No. 3, 1990
- BAHADIR (HRSG) Springer Umweltlexikon, Springer Verlag, 1995
- BAUER ET AL. Infiltration von Sickerwasser - ein Weg zur Aktivierung der Deponie, Müll und Abfall, 758-761, 12/1997.
- BAYERN Deponierisikostudie, Kurzfassung, Umwelt & Entwicklung Materialien Bayern, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, erstellt durch Dr. Ing. Steffen Ingenieurgesellschaft mbH, Essen und Colenco Power Consulting AG, Schweiz, 1994
- BELEVI, H.; BACCINI, P. Long-term behaviour of municipal solid waste landfills, Waste Management and Research, 7, 43-56, 1989
- BOTHMANN, P. Abdeck- bzw. Abdichtungssysteme, Auswirkungen auf Sickerwasser und Deponiegas, aus "Ist die Nachsorge vor dem Hintergrund der Sickerwasserreinigung und Deponiegasverwertung ein wirtschaftlich kalkulierbares Risiko?", 1. Aachener Tagung mit Informationsforum, Enviro Consult Aachen, Tagungsband, S. 273-290, 1998
- BRINKMANN ET AL. Untersuchung des Gefährdungspotentials, Deponie- und Langzeitverhalten vorbehandelter z. T. separierter Siedlungsabfälle, Teilvorhaben 6 des BMBF-Verbundvorhabens "Deponiekörper", Förderkennzeichen 1460799, 1997.
- DERNBACH, H. Versuche zur Abschätzung des Gaspotentials einer Deponie anhand von Müllproben, Veröffentlichung des Instituts für Stadtbauwesen, Heft 33, Gas- und Wasserhaushalt von Mülldeponien, Braunschweig 1982, S. 447-469
- DIN Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Hrsg. Fachgruppe Wasserchemie in der GdCh in Gemeinschaft mit dem Normenausschuß Wasserwesen im Deutschen Institut für Normung e. V., Wiley-VCH und Beuth
- DOEDENS ET AL. Bilanzierung von Umweltchemikalien bei der biologischen Vorbehandlung von Restabfällen, BMBF-Statusseminar des Verbundvorhaben mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen, 1998
- EHRIG, H.-J. Beitrag zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Mülldeponien, Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, Heft 26, 1. Auflage, TU Braunschweig 1978
- Ehrig, H.-J. Beitrag zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Mülldeponien, Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, 2. Erweiterte Auflage, Heft 26, TU Braunschweig 1980
- EHRIG, H.-J. Auswirkungen des Deponiebetriebes auf Sickerwasserbelastungen - Messungen an Deponien und Lysimetern, Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, Heft 39, Sickerwasser aus Mülldeponien - Einflüsse und Behandlung, TU Braunschweig, 1985

- EHRIG, H.-J. Sickerwasser aus Hausmülldeponien - Menge und Zusammensetzung, Hrsg. Hösel, Schenkel, Schnarer, Müllhandbuch KZ4587, Erich Schmidt Verlag, 1989
- FARQUHAR, G. H.; ROVERS, F. A. Gas production during refuse decomposition, Water, Air and Soil Pollution, 2, 1973
- HÄMMERLE, E.; LOTTNER, U. Ergebnisse der Aufgrabungen mineralischer Oberflächenabdichtungen, in "Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten", Egloffstein/Burkhard (Hrsg.), Erich Schmidt Verlag, S. 189-195, 1997
- HEYER, K.-U. ET AL. Langfristiges Gefährdungspotential und Deponieverhalten von Ablagerungen, Bericht zum Teilvorhaben, TV4 im BMBF-Verbundvorhaben "Deponiekörper", Förderkennzeichen BMBF: 1460799 D3, 1997
- HOINS, H. Systeme zur Oberflächenabdichtung von Deponien, Entsorgungspraxis, S. 31-35, 9/1998
- HUBER, H. ET AL. Langfristiges Emissionsverhalten von MVA-Schlacke, Wasser & Boden, 50. Jahrg
- IFK DRESDEN GMBH Analyse der Deponieemission im Zusammenhang mit der qualitativ veränderten Abfallzusammensetzung in den neuen Bundesländern am Beispiel der Deponie Döbeln-Hohenlauff, BMFT-Förderkennzeichen 1450706B6, 1993
- JESSBERGER, H.-L. Zwischenbericht des Forschungsprojektes: Geotechnik der Abfallstoffe, September 1992.
- KETTERN, J., DREES, K., Utsch, J. Investigations on accelerated stabilisation of an old landfill - First operational experience gained at the Horm landfill, Sardinia 97, Sixth International Landfill Symposium, Proceedings Volume IV, S. 463ff.
- KOCH, R. Umweltchemikalien: physik.-chem. Daten, Toxizitäten, Grenz- und Richtwerte, Umweltverhalten, VCH, 1989
- KRUG, M. N.; HAM, R. K. Analysis of long-term leachate characteristics, Sixth International Landfill Symposium Sardinia 97, Proceedings Vol. II, 117-132, 1997
- KRÜMPELBECK, I. Einfluß von Oberflächenabdeckungen auf die Sickerwasserbildung und Gasproduktion bei Altdeponien und Altablagerungen bzw. Altstandorten, unveröffentlichte Studie im Auftrag des Landesumweltamtes NRW, 1996
- KRÜMPELBECK I.; EHRIG H.-J. Erste Erfahrungen mit der Reinfiltration in Deponien, Tagungsband des Seminars 'Deponietechnik' 98 in Hamburg, Jan 1998
- KRUSE, K. Langfristiges Emissionsgeschehen von Siedlungsabfalldeponien, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig, Heft 54, 1994
- KRUSE, K; KAYSER, R. Sickerwasserqualität niedersächsischer Hausmülldeponien, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig, 1993
- KUCKLICK ET AL. Aussagekraft von Sickerwasseranalysen zur Beurteilung der biologischen Stabilität von Deponien, in "Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der TU Braunschweig, Nachsorge von Siedlungsabfalldeponien", Heft 11, S.157-183, 1996
- LAGA LAGA-Merkblatt: Die geordnete Ablagerung von Abfällen, Stand 01.09.1979, veröffentlicht in Müllhandbuch4690, I/80

- LEIKAM ET AL. Stellenwert der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung, Abfallwirtschaftsjournal, S. 39-44, 9/1996
- LOOCK CONSULTANTS Abschlußbericht der Vorphase zum Thema: Entwicklung eines kombinierten Adsorptions- und Regenerationsystems zur Reinigung von Deponiegasen - Biologische Regeneration schadstoffbeladener Aktivkohle, BMFT-Förderkennzeichen 0317645, 1994
- MCCARTY ET AL. Salt Toxicity in Anaerobic Digestion, Journal WPCF, April 1961.
- MELCHIOR, S. Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdeckungssysteme für Deponien und Altlasten, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 22, 1993
- MELCHIOR, S. Die Oberflächenabdichtung von Altdeponien - Regelsysteme - Alternativen - Empfehlungen, in: Nachsorge von Deponien - Maßnahmen, Dauer, Kosten, Hrsg. Rettenberger, Stegmann, abfall aktuell, S. 107-133, 1999
- N. N. Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) - Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachtungsbedürftigen Abfällen, 12.03.1991
- N. N. Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall) - Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, 14.05.1993
- N. N. Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe (TrinkwV) vom 12.12.1990
- N. N. Allgemeine Rahmen-Verwaltungsvorschrift über Mindestanforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer, Anhang 51: Oberirdische Ablagerung von Abfällen, 31.07.1996
- NUßBAUM, G. Technische Ansätze für einen sickerwasserarmen Deponiebetrieb, in "Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Zeitgemäße Deponietechnik II", S.199-207, 1987.
- POLLER, T. Hausmüllbürtige LCKW/FCKW und deren Wirkung auf die Methangasbildung, Hamburger Berichte 2, 1990
- RAMKE H.-G. Hydraulische Beurteilung und Dimensionierung der Basisentwässerung von Deponien fester Siedlungsabfälle - Wasserhaushalt, hydraulische Kennwerte, Berechnungsverfahren, Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau, TU Braunschweig, Heft 114, 1991
- RETTENBERGER ET AL. Langzeitphasen des Deponiegeschehens bei Altablagerungen, Industrial waste management, waste reduction and treatment; Envirotech, S. 487-494, 1992
- RETTENBERGER ET AL. Betriebsleiterhandbuch Deponiegas, herausgegeben von Ingenieurgruppe RUK und Umweltanalytik RUK GmbH, 1995
- RETTENBERGER, G. Emissionsverhalten hochverdichteter Abfälle - Erfahrungen aus dem Rückbauprojekt Deponie "Burghof", in: 2. Statusseminar Verbundvorhaben Deponiekörper, Februar 1997 in Wuppertal, Projektträger Abfallwirtschaft und Altlastensanierung des BMBF, S. 175-199, 1997

- RETTENBERGER, G. Deponierückbau: Ein sinnvoller Ansatz zur nachhaltigen Abfallwirtschaft?, in: Entwicklungstendenzen in der Deponietechnik, Hamburger Berichte 12, Hrsg. Stegmann, Rettenberger, S. 69-82, 1998
- ROBINSON ET AL. A Review of the Composition of Leachates from Domestic Wastes in Landfill Sites, PECD 7/10/238, Report for the UK Department of the Environment, 1995
- SCHLEGEL, H. G. Allgemeine Mikrobiologie, 7. Auflage, Thieme Verlag, S. 427ff, 1992
- SCHMIDT, W. Verformungsverhalten von Deponien - Meßtechnische Erfassung und betriebstechnische Umsetzung. Fortschritte der Deponietechnik, 1993, Nr. 64.
- SPENDLIN, H.-H. Untersuchungen zur frühzeitigen Initiierung der Methanbildung bei festen Abfallstoffen, Hamburger Berichte, Bd. 4, 1991
- WAHRENDORF, J. Quantitative Risikoabschätzung für ausgewählte Umweltkanzerogene: Forschungsbericht 10606067, Erich Schmidt Verlag 1990.
- WEBER, B. Minimierung von Emissionen der Deponie, aus "Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover", Heft 74, 1990.
- WIEMER, K. Messungen des Wasserhaushaltes und der Dichte von ungestörten Müllproben, Veröffentlichung des Instituts für Stadtbauwesen, Heft 33, Gas- und Wasserhaushalt von Mülldeponien, Braunschweig 1982, S. 289-300
- WIRTZ, A. ET AL. BMBF-Verbundvorhaben Deponiekörper Teilvorhaben 3: Emissionsverhalten umweltrelevanter Schadstoffe in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Abfalls und der Standzeit der Deponien, Förderkennzeichen BMBF 1460799 C, 1997
- WISKEMANN, B.; HARDES, H. Qualifizierter Rückbau von Altdeponien und Altablagerungen, Entsorgungspraxis s. 22-23, Heft 7-8, 1998
- ZUHSE, L. Einfluß der temporären Abdeckung auf den Gas- und Wasserhaushalt einer Deponie, Wasser & Boden, S. 11-16, 49. Jahrg., 8/1997