

Auswertung von Ergebnissen der Grundwasserbeobachtung an Brandenburger Deponien mit dem Ziel der Ableitung von Nachsorgezeiträumen

(Masterarbeit von S. Schulze, TU Bergakademie Freiberg; Betreuung u.a. Dr. U. Stock, LUGV Brandenburg)

1 Einleitung

Im Rahmen der Auswertung vorliegender Ergebnisse der jahrelangen Grundwasserbeobachtung an Brandenburger Deponien wurden für fünf ausgewählte Standorte sogenannte Auslöseschwellen ermittelt. Diese sind nach § 2 Nr. 4 der Deponieverordnung (DepV) von 2009 „Grundwasserüberwachungswerte, bei deren Überschreitung Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers eingeleitet werden müssen“. Somit dienen die Auslöseschwellen der Kontrolle des Grundwasserabstroms von Deponien im Rahmen der Emissionsüberwachung, um nachteilige Auswirkungen der Deponie auf die Umwelt über den Wirkungspfad Boden-Grundwasser frühzeitig erkennen zu können (§ 12, Abs. 1 DepV 2009). Neben dieser Funktion als Alarmwerte werden sie weiterhin zur Bestimmung des Abschlusses der Nachsorgephase einer Deponie angewandt. Dabei gilt nach Anh. 5 Nr. 10 Ziffer 8 der DepV 2009 das Absinken der Deponiebelastung im Grundwasser unter die ermittelten Auslöseschwellen als ein relevantes Entscheidungskriterium.

Für beide Zwecke müssen durch die zuständige Behörde nach Anhang 5 Nr. 3.1 Ziffer 1 DepV 2009 geeignete Grundwassermessstellen im Abstrombereich der Deponien vorgegeben werden (§ 12 Abs. 1 DepV 2009), an denen die Grundwasserbelastung repräsentativ bewertet werden kann. Die Festlegung der Auslöseschwellen erfolgt nach § 12 Abs. 1 DepV 2009 für jede Deponie gesondert durch die zuständige Behörde. Mit § 9 Abs. 1 DepV 2002 wurde Anhang III Nr. 4 Buchstabe C der Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien in deutsches Recht umgesetzt. Danach sollten die Auslöseschwellen unter Berücksichtigung der „Prüfwerte zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser“ aus Anhang 2 Nr. 3 BBodSchV – im Folgenden „Prüfwerte“ genannt - und der hydrogeologischen sowie hydrologischen Standortgegebenheiten festgelegt werden. Dies musste im Allgemeinen im Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsbescheid zur Errichtung einer neuen Deponie oder eines Deponieabschnittes der Klassen 0, I, II oder III angeordnet werden (§9 Abs. 1 DepV 2002). Für Deponien oder Deponieabschnitte, welche in den Anwendungsbereich der Deponieverordnung fallen (nach § 1 Abs. 1 Dep V 2009) und sich am 1. August 2002 in der Ablagerungs- oder Stilllegungsphase befanden, waren die Auslöseschwellen bis zum 1. August 2005 nachträglich festzulegen (§ 25 Abs. 4 DepV 2002). Die Deponieverordnung von 2009 gibt die Notwendigkeit der Nutzung der Prüfwerte dagegen nicht mehr vor.

In der Deponieverordnung ist durch den Bundesgesetzgeber jedoch keine eindeutige Methodik zur Bestimmung der Auslöseschwellen benannt, wodurch den Ländern freier Handlungsspielraum eingeräumt wurde. Vier Bundesländer – Niedersachsen, Bayern, Nordrhein-Westfalen und Thüringen – haben daher interne Richtlinien zur Umsetzung der Deponieverordnung aufgestellt, welche sich meist an den „Leitfaden mit Arbeitsanleitung zur Festlegung von Auslöseschwellen sowie zur Gestaltung von Maßnahmenplänen nach § 9 DepV“ des Landes Niedersachsen anlehnen ([2], [3], [4], [5]). Aufgrund regionaler,

deponiebezogener Besonderheiten entstanden so flexible Verfahren mit eigenen Voraussetzungen und Einschränkungen.

Obwohl der angesetzte Termin zur nachträglichen Festsetzung von Auslöseschwellen lange verstrichen ist, wird dieses Thema eher zögerlich bearbeitet. Dennoch bleibt es auch einige Jahre später sehr aktuell, da zum einen der Bestimmung noch nicht für alle Deponien nachgekommen wurde, zum anderen bis zum Ende der Nachsorgephase eine regelmäßige Überprüfung erfolgen soll, um die zeitliche Repräsentativität zu gewährleisten. Diese Forderung ergibt sich aus der Relevanz, umweltschädigende Verunreinigungen des Grundwassers frühzeitig nachweisen zu können, um Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit durch die Deponie zu verhindern. Gleichzeitig kann mithilfe der Auslöseschwellen kontrolliert werden, ob die Dichtungssysteme sowie die geologische Barriere in vollem Umfang funktionieren oder Undichtigkeiten auftreten. Folglich sind sie als Alarmwert von besonderem Interesse für den Deponiebetreiber aufgrund seines Haftungsrisikos im Schadensfall ([6], [7]).

Ziel der Auswertung der Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung war neben der Ableitung der Nachsorgezeiträume mithilfe von Auslöseschwellen eine Bewertung der Plausibilität der einzelnen Ergebnisse. Daraus ließen sich Schlussfolgerungen ziehen, ob die in der Deponieverordnung von 2009, Anh. 5 Nr. 10 Ziffer 8, vorgegebene Art und Weise der Bestimmung der Nachsorgezeiträume hinsichtlich statistischer Brauchbarkeit und Vertretbarkeit der Nachsorgedauer für die Brandenburger Deponien zu praktikablen Ergebnissen führt. Zudem wurde versucht, aus den Daten Zusammenhänge zwischen Deponiegröße, Geologie des Standortes sowie den vorhandenen Abdichtungssystemen und auf der anderen Seite den Stoffkonzentrationen im Abstrom sowie den Nachsorgezeiten zu finden.

2 Methodik und Datengrundlage

2.1 Bestimmung der Auslöseschwellen

Die Auslöseschwellen basieren in allen existierenden Verfahren auf der Ermittlung der maßgeblichen Grundwasserzusammensetzung des Deponieanstroms, welche über eine statistische Auswertung einer langjährigen Zeitreihe bestimmt werden kann. Anschließend wird eine deterministische Komponente aus einem Vergleichswert aufaddiert, um die natürliche Schwankungsbreite der Messwerte abzudecken. Von den vier erwähnten länderspezifischen Methoden wurden drei für eine Bestimmung der Auslöseschwellen ausgewählt, wobei die Verfahren Niedersachsens und Bayerns aufgrund ihrer Ähnlichkeit kombiniert werden konnten. Tabelle 1 fasst das entstehende Kombinationsverfahren sowie die Methodik NRW zusammen ([2], [3], [5]). Während im ersten Fall die statistische Auswertung über Mittelwert und Standardabweichung σ erfolgt, wird im zweiten Fall die bestmögliche Anpassung einer Verteilungsfunktion an die Messwerte gesucht.

Im Kombinationsverfahren wird zudem zwischen Basisparametern (Deponieleitparameter, Alkali- und Erdalkalimetalle, Stickstoffspezies) und Ergänzungsparametern (Spurenmethalle, organische Schadstoffe) unterschieden. Anstatt der Einbeziehung der in der DepV 2002 geforderten Prüfwerte kommen in diesem Verfahren nach Niedersachsen und Bayern Differenzwerte aus den LAWA-Empfehlungen von 1994 und 2004 respektive die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) der LAWA 2004 zur Anwendung. In Nordrhein-Westfalen werden ebenfalls die GFS, oder da diese bei bestimmten Elementen fehlen, vergleichbare Ersatzwerte (z.B. Trinkwasserverordnung) verwendet ([2], [3], [5]).

Tabelle 1: Vergleich der angewandten Methoden zur Bestimmung der Auslöseschwellen

Verfahren	Kombination Niedersachsen/ Bayern <i>([2], [3])</i>	Nordrhein-Westfalen <i>[5]</i>
Vorgehensweise	<ul style="list-style-type: none"> -Bestimmung von MW und σ aus den Anstromwerten -Erstellung eines Streubandes für die Anstromwerte mit $MW+2\sigma$ und $MW-2\sigma$ -Basisparam.: $AS = (MW+2\sigma)+100\%$ GFS -Ergänzungsparam.: $AS=75\%$ GFS oder PW (falls $PW < GFS$) oder $MW+2\sigma$ (falls größer als PW) -untere AS: $(MW-2\sigma)-100\%$ GFS oder NWG, falls AS sonst < 0 	<ul style="list-style-type: none"> -Untersuchung der Verteilung der Messwerte -AS= 98%-Quantils + 50% GFS bzw. Ersatzwert (z.B. TVO) -Mindest-AS jedoch mit GFS oder Ersatzwert angesetzt -Trendanalyse möglich, falls Fließgeschwindigkeit ausreichend groß
Ausreißer	-außerhalb des Streubandes $MW\pm 2\sigma$	-Werte $> 95\%$ -Quantil
Werte $< NWG$	ersetzt mit $0,5 \cdot NWG$	
Messreihe	mehrjährig für hohe Sicherheit (10a ausreichend)	
Zeitbezug	regelmäßige Neuberechnung der AS mit aktuellen Anstrommesswerten	
ungeeignet bei	<ul style="list-style-type: none"> -stark schwankenden Werten -großer Streuung -Trends im Anstrom -vielen Werten $< NWG$ 	<ul style="list-style-type: none"> -stark schwankenden Werten -großer Streuung -schlechter Anpassung an Verteilung -ungeübten Nutzern

Abbildung 1 verdeutlicht die Vorgehensweise für das Kombinations- und das nordrhein-westfälische Verfahren noch einmal in einer grafischen Darstellung.

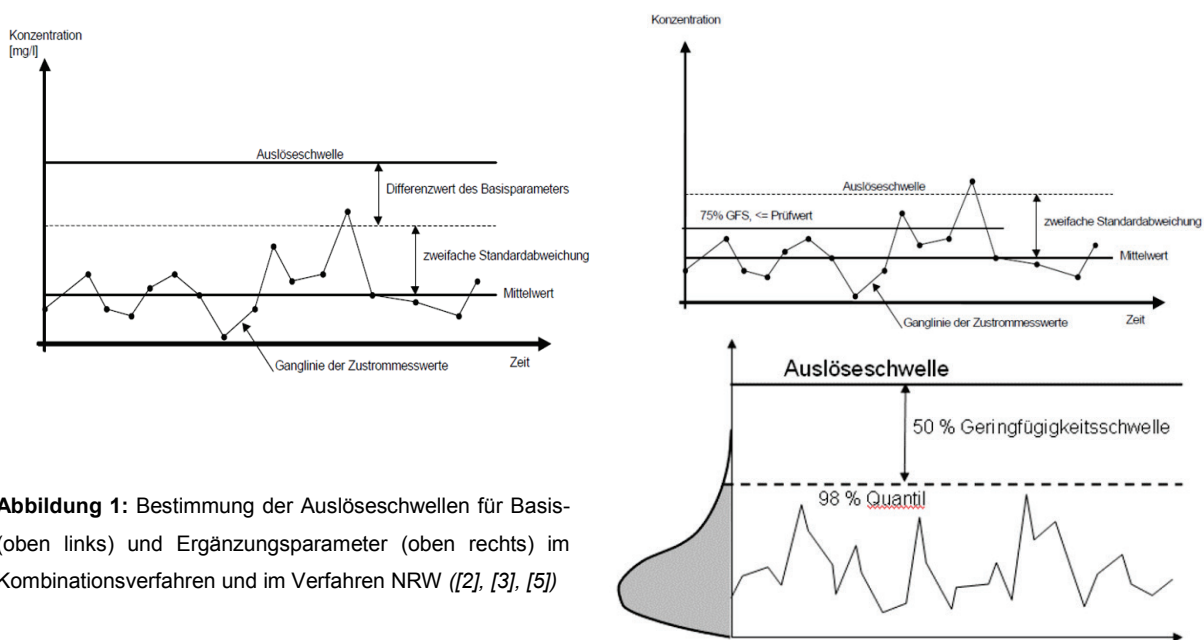


Abbildung 1: Bestimmung der Auslöseschwellen für Basis- (oben links) und Ergänzungsparameter (oben rechts) im Kombinationsverfahren und im Verfahren NRW ([2], [3], [5])

Weitere Details können in den jeweiligen Leitfäden der einzelnen Länder ([2], [3], [5]) sowie in der zugrundeliegenden Masterarbeit [8] nachgelesen werden.

2.2 Ermittlung der Nachsorgezeiträume

Wie die Ermittlung der Nachsorgezeiträume genau geschehen soll, wird nicht gesetzlich vorgegeben. Nach Anh. 5 Nr. 10 Ziffer 8 der DepV 2009 würde eine qualitative Betrachtung der Abstromwerte bezüglich der Auslöseschwellen ausreichen. Um dennoch Ergebnisse mit möglichst festgelegten Zeitpunkten zu erhalten, ist eine mathematische Darstellung der Trends im Deponieabstrom geeigneter. Eine an die Messwerte angepasste Gleichung lässt dann die Ermittlung des Zeitpunktes zu, an dem die Werte die Auslöseschwelle tendenziell unterschreiten [1].

Die Betrachtung der Nachsorgedauer soll laut DepV an repräsentativen Abstrommessstellen einer Deponie erfolgen, da diese die Grundwasserbelastung durch sickernwasserbedingten Deponieaustrag wiedergeben. Die Stoffkonzentrationen müssen unter die Auslöseschwellen fallen, um ein Ende der Nachsorge zu erlauben. Aufgrund natürlicher Abbauprozesse, Retardation und Verdünnung sollte eine ideale Zeitreihe im Abstrom einen exponentiellen Abfall als Reaktion 1. Ordnung gemäß der Gleichung nach Ramke, Krümpelbeck und Ehrig [9] zeigen.

$$c(t) = c_0 \cdot e^{-k \cdot t}$$

mit $c(t)$ – Konzentration des Parameters zum Zeitpunkt t
 c_0 – Konzentration des Parameters zum Zeitpunkt 0
 k – Abbaukonstante des Stoffes
 t – Zeit

Um nicht durch subjektiv ausgewählte Messwerte willkürliche Ergebnisse zu erhalten, wurde eine Linearisierung der Messreihen durch Anwendung des natürlichen Logarithmus (ln) vorgenommen. Somit entstanden aus den exponentiell fallenden linear abnehmende Messreihen (Abbildung 2).

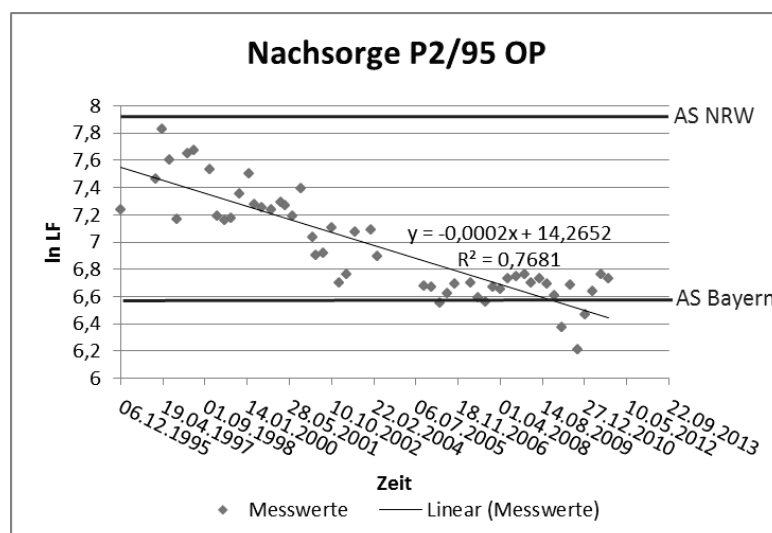


Abbildung 2: Linearisierter Trend einer Messreihe mit eingezeichneten Auslöseschwellen (AS)

Mithilfe der Geradengleichung des Trends

$$y = m \cdot x + n$$

mit m – Anstieg (entspricht der Abbaukonstante k)

x – Zeit t_{nach}

n – $\ln(c_0)$ zum Zeitpunkt t_0

konnte dann mit einer Startkonzentration c_0 die Zeit t_{nach} bis zum Erreichen der Auslöseschwelle, eingesetzt als $y = \ln(AS)$, ermittelt werden.

Die berechneten Zeiträume für die Nachsorgephase sind nur dann plausibel und sinnvoll auswertbar, wenn das Bestimmtheitsmaß R^2 zwischen festgelegter Trendlinie und der eigentlichen Messreihe ausreichend groß ist. Dafür wurde $R^2 \geq 60\%$ angesetzt. Reihen mit $R^2 = 30-60\%$ wurden ebenfalls ausgewertet, jedoch unter Beachtung der größeren Unsicherheit. Datenreihen mit großer Streuung konnten aufgrund nicht festzustellender Tendenzen oder kleiner R^2 -Werte ($R^2 < 30\%$) nicht betrachtet werden. Parameter mit steigenden Messwerten liefern keinen Abschluss der Nachsorge, da die Grundwasserbelastung scheinbar zunimmt. Für diese Fälle war zu betrachten, woher die steigenden Tendenzen kommen und ob eine Überschreitung der Auslöseschwellen derzeit oder in naher Zukunft passiert.

2.3 Datengrundlage

Bearbeitet wurden die Brandenburger Deponien Brück-Neuendorf, Lübben-Ratsvorwerk, Dallgow-Rohrbeck, Fohrde und Senzig. Die Auswahl erfolgte aufgrund ihrer relativ durchgängigen, langjährigen Zeitreihen zur Grundwasseranalyse. Alle notwendigen Ergebnisse der Wasseranalysen und die benötigten Informationen zu den Deponien (Geologischer Untergrund, Abfallvolumen, Alter, Dichtungssysteme) stellte das Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg zur Verfügung.

Anhand der Messreihen wurden für jede Deponie die Abstrompegel, welche über eine längere Zeit durchgängig beprobt wurden, herausgesucht, um mit diesen weiterzuarbeiten. Die Parameterauswahl sollte eigentlich auf diejenigen eingegrenzt werden, die sich zur Bewertung einer deponiebedingten Grundwasserbelastung und ihrer Gesundheitschädlichkeit eignen, wie z.B. Deponieleitparameter bzw. toxisch relevante und organische Stoffe. Da diese aufgrund der vorgegebenen Messprogramme oftmals nicht kontinuierlich analysiert wurden, musste auf all diejenigen Parameter, die eine langjährige Messreihe vorweisen konnten, zurückgegriffen werden. Damit kann die statistische Sicherheit erhöht werden. Zusätzlich wurde beachtet, dass Werte aus den Jahren 2011 oder mindestens 2010 vorhanden sind, um einen aktuellen Zeitbezug der Trends gewährleisten zu können. Tabelle 2 zeigt die getroffene Auswahl.

Tabelle 2: Liste der bearbeiteten Parameter pro Deponie

Deponie	Hydrochemische Parameter
Brück	LF, Na, Mg, K, Ca, N-NH ₄ , NO ₃ , SO ₄ , Cl, TOC, B
Lübben	LF, Na, Mg, K, Ca, NH ₄ , NO ₃ , SO ₄ , Cl, TOC, B, PAK*
Fohrde	LF, Na, Mg, K, Ca, NH ₄ , NO ₃ , SO ₄ , Cl, TOC, B
Dallgow	LF, Na, Mg, K, Ca, NH ₄ , NO ₃ , SO ₄ , Cl, TOC, B
Senzig	LF, Na, Mg, K, Ca, NH ₄ , NO ₃ , SO ₄ , Cl, TOC

* als einziger Ergänzungsparameter

Alle weiteren Informationen zur Auswahl der Pegel und Parameter sowie zu den fünf bearbeiteten Deponien sind in [8] nachzulesen.

3 Darstellung und Auswertung der Ergebnisse

3.1 Beurteilung der Anstrommesswerte – geogener Hintergrund

Die verwendeten Messwerte des Grundwasseranstroms wurden vor der Bearbeitung auf anthropogene Einflüsse getestet, um dies bei der Festlegung der Auslöseschwellen beachten zu können oder betroffene Parameter von der Auswertung auszuschließen. Die aktuellen Werte der Deponieleitparameter verhielten sich an den Standorten meist unauffällig und gaben somit typische geogene Hintergrundwerte wieder. Lediglich für Lübben lag eine leichte Erhöhung vor. Die Daten waren generell für eine Bestimmung der Auslöseschwellen geeignet. Ein signifikanter Einfluss einer ungesicherten Altablagerung oder Abwasser-einleitung, der anhand erhöhter Werte auffiele, war für keinen Standort erkennbar. Zudem konnten meist auch keine temporären Spitzen von Salzionen als Zeichen winterlicher Streusalzaufbringung nachgewiesen werden. Lediglich bei Fohrde war eine Beeinflussung der Werte durch Salzauswaschung nicht sicher auszuschließen. Einige weitere Besonderheiten in den Messreihen fielen während der Bearbeitung auf, die jedoch in die Bestimmung der Auslöseschwellen einbezogen wurden (Näheres in [8]).

3.2 Vergleich und Bewertung der ermittelten Auslöseschwellen

Aufgrund fehlender Basisabdichtungen und Sickerwassermesseinrichtungen vieler Altdeponien Brandenburgs ist eine Anwendung der für das Sickerwasser gedachten Prüfwerte zur Bestimmung von Auslöseschwellen nur bedingt geeignet. Daher erfolgte eine Festlegung mithilfe der zwei oben beschriebenen statistischen Verfahren und den entsprechenden Referenzwerten.

Ein Vergleich der Ergebnisse beider Methoden zeigt zum Teil erhebliche Unterschiede beider Auslöseschwellen des gleichen Parameters (beispielhaft für Deponie Lübben in Abbildung 3). Da die statistische Auswertung der Grundwasserzusammensetzung über beide Verfahren annähernd die gleichen Werte lieferte, ergeben sich die Differenzen der Auslöseschwellen durch die deterministischen Komponenten (Additionsterme).

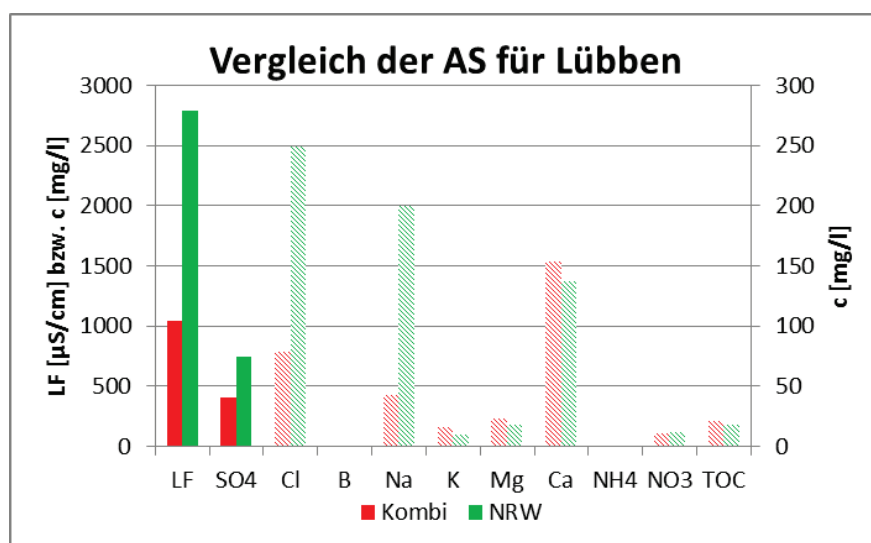


Abbildung 3: Vergleich der Auslöseschwellen für die Deponie Lübben. Die vollen Balken beziehen sich auf die linke vertikale Achse, die gestrichelten Balken sind an der rechten Achse abzulesen (Bor und Ammonium besitzen zu geringe Werte für diese Achseneinteilung)

Bei Verwendung ähnlicher oder sogar gleicher Additionsterme (z.B. K, Mg, Ca, NO₃, NH₄, TOC, PAK) stimmen beide ermittelten Auslöseschwellen desselben Parameters, mit kleinen Unterschieden, gut überein. Das Kombinationsverfahren liefert aufgrund der Addition von 75% GFS anstatt nur 50% (NRW) jedoch immer die leicht höheren Ergebnisse. Durch Nutzung einiger hoher Referenzwerte aus der TVO (z.B. LF, Na, SO₄, Cl, B) im nordrhein-westfälischen Verfahren liegen die Auslöseschwellen für diese Parameter dann deutlich höher als die des Kombinationsverfahrens. Zudem ergibt die Methode von NRW bei Messreihen im Bereich der Nachweisgrenze ebenfalls die höheren Ergebnisse, da hier die Regelung der Mindest-Auslöseschwelle greift.

Problematisch wird dabei die Auswahl der „richtigen“ Auslöseschwelle und damit auch des „richtigen“ Bestimmungsverfahrens. Beide Methoden weisen sowohl Vor- als auch Nachteile auf, die für den Anwender von Bedeutung sind. Da im nordrhein-westfälischen Vorgehen die Verteilung der Messwerte beachtet wird, ist der statistische Hintergrund etwas besser. Jedoch erhöhen sich damit auch die Komplexität, der Zeitaufwand und die geforderten Kenntnisse des Anwenders. Einige relevante Parameter zum Erkennen einer Deponiebeeinflussung des Grundwassers können nach der Methode Nordrhein-Westfalens (z.B. Leitfähigkeit, Alkali- und Erdalkalimetalle, TOC) lediglich mithilfe gewählter Ersatzwerte bearbeitet werden, da die Geringfügigkeitsschwellenwerte fehlen. Somit ermöglichen die Ergebnisse aufgrund größerer Unsicherheiten nur eine Auswertung unter Vorbehalt. Die oft genutzten hohen Ersatzwerte der TVO liefern für diese Parameter absurd hohe Auslöseschwellen, wodurch die Sicherheit herabgesetzt wird und die Nachsorge unvorsichtigerweise stark verkürzt würde.

Tabelle 3: Bewertung der Eignung des Kombinations- und des nordrhein-westfälischen Verfahrens zur Bestimmung der Auslöseschwellen (+ gegeben, - nicht gegeben)

Bewertungskriterium	Kombinationsverfahren	Nordrhein-Westfalen
Relevante Parameter zum Erkennen von Deponieeinflüssen	+	(-)
Relevante Parameter zum Erkennen der Schädlichkeit einer Belastung	+	+
Statistischer Hintergrund des Verfahrens	+	+
Beachtung der Verteilung der Messwerte	(-)	+
Verständlichkeit der Anwendung	+	(-)
Größe der Additionsterme	+	(-)
Bearbeitung von Reihen <NWG	-	+
Bearbeitung von Trends im Anstrom	(-)	(+)

Nach vorliegenden Kenntnissen und basierend auf der Bewertung in Tabelle 3 kann das einfachere Kombinationsverfahren für Standardparameter mit normalen Messreihen empfohlen werden. Damit sind Deponiebeeinflussungen ausreichend erkennbar und die ermittelten Auslöseschwellen eignen sich zur weiteren Auswertung. Treten jedoch Messreihen im Bereich der Nachweisgrenze (NWG) auf, liefert das nordrhein-westfälische Verfahren durch die Festlegung des GFS als Mindest-Auslöseschwelle die besseren Ergebnisse, da Unsicherheiten von Werten <NWG umgangen werden. Im Falle von trendbehafteten Anstromreihen wäre ebenfalls nach der nordrhein-westfälischen Methode zu verfahren. Durch den signifikanten Nachweis von Trends mithilfe der komplexeren Statistik kann damit eine Neuberechnung der Auslöseschwelle erfolgen.

Alle Besonderheiten, auf die bei der Bestimmung der Auslöseschwellen der fünf bearbeiteten Deponien geachtet wurde, sowie die Ergebnisse sind in [8] zu finden. Darauf wird hier im Einzelnen nicht näher eingegangen.

Die festgelegten Auslöseschwellen spiegeln die Ähnlichkeiten und Unterschiede des geogenen Hintergrundes an den Deponiestandorten, teilweise abgeschwächt durch die angewandte Statistik, gut wider, da sie direkt aus den Anstrommesswerten der Deponien bestimmt wurden. Dies zeigt ein Vergleich der Auslöseschwellen der vier Deponieleitparameter mit den Mittelwerten der Anstromzeitreihen (Abbildung 4). Auffälligkeiten wie anthropogen erhöhte Stoffkonzentrationen zeigen sich durch hohe Auslöseschwellen.

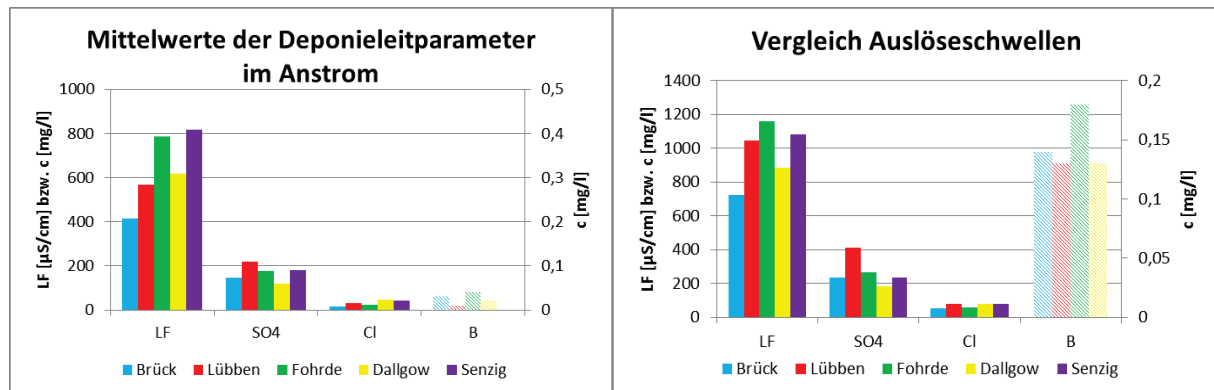


Abbildung 4: Vergleich der Mittelwerte der Anstrommessreihen (geogener Hintergrund, links) und der berechneten Auslöseschwellen für die Deponieleitparameter zwischen den Deponien (rechte vertikale Achse für gestreifte Balken)

Oftmals konnten nur unsichere Auslöseschwellen infolge ungeeigneter Anstrommessreihen (Trends, große Streuung etc.) oder Bestimmungsmethoden (fehlende GFS etc.) festgelegt werden, was sich negativ auf die Bestimmung der Nachsorgezeiten auswirkte.

3.3 Nachsorgebetrachtung

Zur Beurteilung der Nachsorge anhand des dauerhaften Absinkens der Grundwasserbelastung unter die festgelegten Auslöseschwellen mussten zunächst die Trends der einzelnen Parameter im Grundwasserabstrom betrachtet werden. Insgesamt lagen dafür nach der oben beschriebenen Auswahl 275 zu bearbeitende Messreihen der langjährig beprobten Parameter aus 25 Pegeln vor. Abbildung 5 zeigt die Verteilung von steigenden und fallenden Trends in den Messreihen für die Deponien und in der Gesamtbetrachtung.

Einen Aufwärtstrend wiesen 30,5% der untersuchten Abstrommessreihen (84/275) auf, sodass sie sich nicht für die Bestimmung der Nachsorgezeiträume eigneten. Steigende Messwerte lagen entweder schon oberhalb der Auslöseschwellen oder werden diese meist in naher Zukunft überschreiten. Daher kann, solange der Trend sich nicht umkehrt, kein Ende der Nachsorge berechnet werden. Ursache für den Anstieg der Messwerte könnte zum einen der zeitlich verzögerte, verstärkte Stoffaustrag aus dem wachsenden Deponiekörper sein, da die Abfallablagerung auf den Deponien oft erst in den letzten 10 Jahren beendet wurde. Zum anderen können natürliche Anreicherung (z.B. durch Schwereschichtung) oder auch kontinuierliche Messungenauigkeiten durch Gerätealterung sowie Verschleppungsprozesse den Anstieg bedingen.

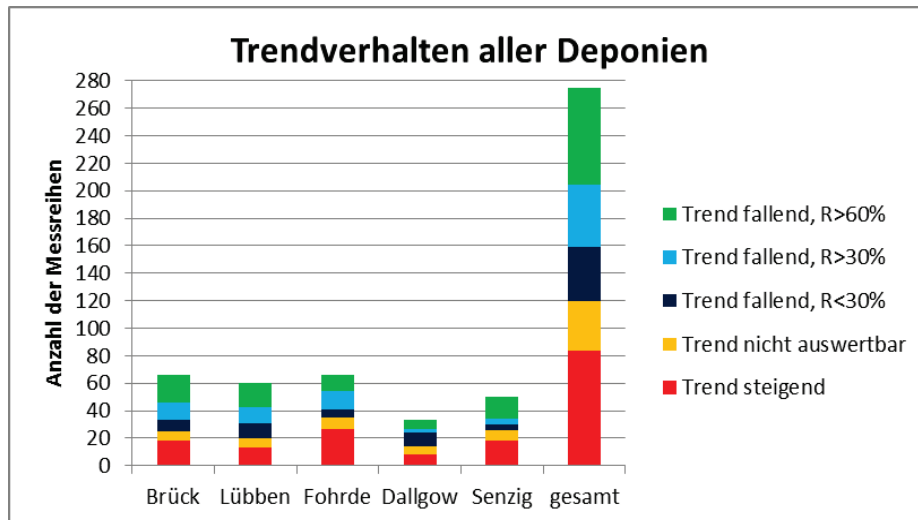
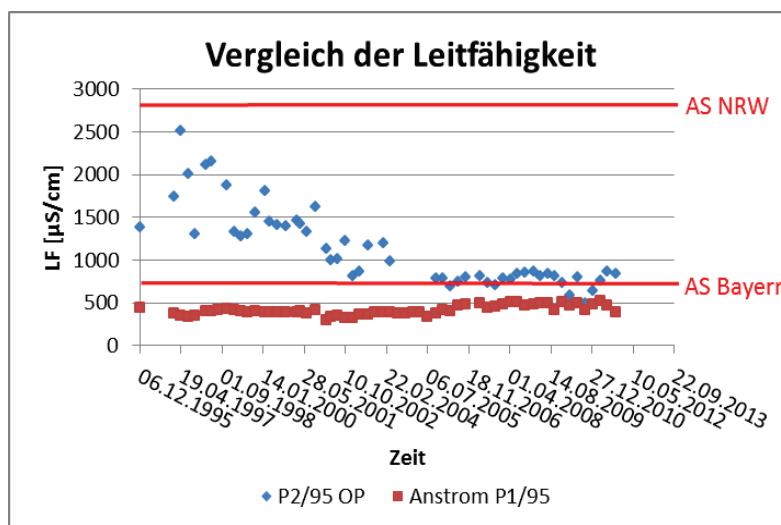


Abbildung 5: Trendverhalten der Messreihen der fünf Deponien im Vergleich

Die übrigen 69,5% der Messreihen (191/275) hatten fallende oder nicht auswertbare Trends. Mithilfe des Bestimmtheitsmaßes R^2 konnten die Abwärtstrends nach ihrer Genauigkeit und statistischen Sicherheit unterteilt werden. $R^2 > 60\%$ zeigte einen deutlichen Trend mit hoher Sicherheit an, sodass eine Nachsorgebestimmung erfolgen konnte; $R^2 = 30-60\%$ wies weniger deutliche Trends aus, deren berechnete Nachsorgezeiten größere Unsicherheiten beinhalteten und $R^2 < 30\%$ galt für Messreihen, deren Trends sehr unsicher sind und somit keine guten Ergebnisse für die Nachsorge liefern würden. Damit entfielen infolge nicht auswertbarer Trends oder $R^2 < 30\%$ weitere 75 Messreihen (27,3%). Es verblieben lediglich 42,2% (116/275) der anfänglich betrachteten Reihen für eine Bestimmung der Nachsorgezeiträume. In Abbildung 5 zeigt sich ebenfalls deutlich, dass die Verteilung der Tendenzen zwischen den Deponien sehr unterschiedlich war. Dadurch mussten für jede Deponie andere Parameter ausgewertet werden. Auch die verschiedenen Messstellen der gleichen Deponie wichen im Konzentrationsverlauf der Parameter voneinander ab, sodass keine eindeutigen Ergebnisse zu erwarten waren.

Ein qualitativer Vergleich zwischen Deponieanstrom und den Abstrompegeln für alle untersuchten Messreihen zeigte in den meisten Fällen in der Vergangenheit deutlich erhöhte



Abstromwerte, wodurch von einer deponiebedingten Beeinflussung des Grundwassers mit zum Teil akuter Versalzungsgefahr ausgegangen werden konnte (beispielhaft in Abbildung 6).

Abbildung 6: Entwicklung der Leitfähigkeit an einem Abstrompegel in Brück (AS – Auslöseschwelle)

Zu Beginn der Zeitreihen lagen die meisten Stoffkonzentrationen oberhalb der Auslöseschwellen. Bereits nach einigen Jahren des Betrachtungszeitraums unterschritten die Emissionen diese jedoch oftmals, sodass die Werte derzeit zum Teil wieder auf dem Anstromniveau liegen.

Eine Auswertung der berechneten Nachsorgezeiten erfolgte nur für Abstrommessreihen mit $R^2 > 30\%$. Da einige Auslöseschwellen nicht mit ausreichender Sicherheit festzulegen waren und daher verworfen wurden, blieben fünf eigentlich auswertbare Messreihen ohne Auslöseschwelle ebenfalls unberücksichtigt. Somit konnten nur die Ergebnisse von 111 der ursprünglich möglichen 275 Messreihen ausgewertet werden und in die Bewertung der Eignung des Verfahrens einfließen. Für die 111 Nachsorgezeiträume (jeweils aus Auslöseschwellen beider Bestimmungsverfahren) wurde folgende Kategorisierung vorgenommen, um einen Überblick über die zum Teil stark variierenden Ergebnisse zu erhalten: 1) Nachsorge beendet (Bezugsjahr 2012), 2) bis 2020, 3) bis 2050, 4) bis 2100 und 5) >2100.

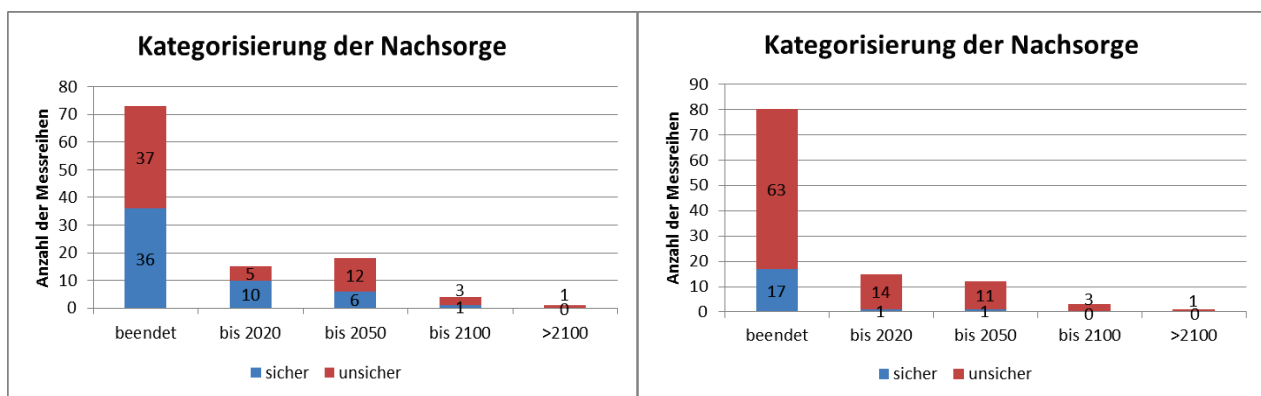


Abbildung 7: Vergleich der berechneten Nachsorgezeiträume (links aus Auslöseschwellen des Kombinationsverfahrens, rechts aus Auslöseschwellen nach NRW)

Mit den Auslöseschwellen des Kombinationsverfahrens ergaben sich für knapp 65% der Messreihen (73/111) schon beendete Nachsorgezeiträume (Abbildung 7 links) und damit positive Eindrücke hinsichtlich der Grundwasserbelastung. Davon wies die Hälfte aufgrund guter Auslöseschwellen sowie einer Trendsicherheit von $R^2 > 60\%$ eine hohe statistische Sicherheit auf. Die andere Hälfte war dagegen als unsicher zu bewerten, da eine Berechnung mit mäßig guten Auslöseschwellen und/ oder $R = 30-60\%$ erfolgte. Bis zum Jahr 2020 erhöht sich die Quote beendeter Nachsorgezeiträume auf 78,5% (88/111). Bei längeren Zeiten verschiebt sich das Verhältnis zugunsten der unsicheren Ergebnisse. Je weiter eine Prognose in die Zukunft erfolgt, desto schlechter wird die Anwendbarkeit der heutigen Trends. Die nordrhein-westfälischen Auslöseschwellen lieferten für über 72% der Messreihen (80/111) schon beendete Nachsorgephasen (Abbildung 7 rechts). Bis 2020 erhöht sich die Quote sogar auf 85,5% (95/111). Eine leichte Verschiebung zugunsten kürzerer Nachsorgezeiten entstand durch die zum Teil deutlich höher liegenden Auslöseschwellen. Ebenfalls auffällig war die größere Anzahl unsicherer Ergebnisse, sowohl bei kurzen als auch bei langen Zeiträumen. Diese resultierte aus den nur mäßig gut bewerteten Auslöseschwellen, wenn die Festlegung mithilfe eines Ersatzwertes erfolgte.

Somit ergaben sich mit den Auslöseschwellen des Kombinationsverfahrens zu Ungunsten des Deponiebetreibers etwas längere, dafür jedoch sicherere Nachsorgezeiten. Außerdem lieferten jeweils mehr als 90% der Messreihen praktikable und finanziell vertretbare

Ergebnisse. Jedoch muss in jedem Fall bedacht werden, dass aus Fehlern und Ungenauigkeiten im Laufe der Bearbeitung größere Unsicherheiten der Zeiträume resultieren. Neben Fehlern bei der Probenahme und Analyse sowie Unsicherheiten der Auslöseschwellen war die Trendbetrachtung der Abstrommessreihen in den seltensten Fällen eindeutig. Schon geringe Veränderungen der Lage eines Trends können erhebliche Verschiebungen der Nachsorgezeit zur Folge haben. Unter Beachtung dieser Punkte sollte ein Nachsorgezeitraum bestenfalls auf den Monat genau angegeben werden. Sicherer wäre die Angabe des Quartals, in dem der Abschluss der Nachsorge stattfinden sollte.

Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Deponien zeigte weitere Probleme für die Auswertung auf. Sowohl die Entwicklungstendenzen der Messwerte als auch die berechneten Nachsorgezeiten variierten meist sehr stark, sodass jeder betrachtete Pegel der gleichen Deponie ein anderes Ergebnis für den Zeitpunkt, wann die Nachsorge zu beenden wäre, lieferte. Auch für einen einzelnen Pegel entstand kein eindeutiges Bild, da die unterschiedlichen Parameter ebenfalls verschiedene Tendenzen und Nachsorgephasen ergaben. Zudem unterschied sich die Anzahl der auszuwertenden Parameter pro Pegel. Abbildung 8 verdeutlicht diese Probleme für die beiden Deponien Brück und Lübben mit ihren Einzelpegeln und den vielen verschiedenen Nachsorgezeiten noch einmal bildlich.

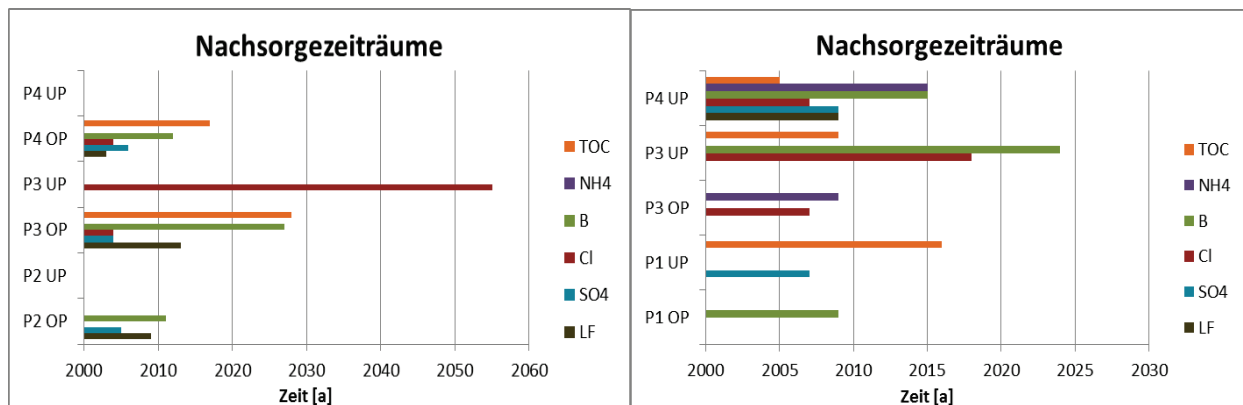
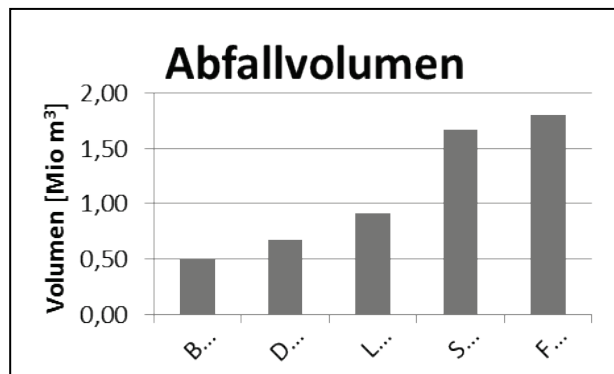


Abbildung 8: Vergleich der berechneten Nachsorgezeiträume für die Pegel der Deponie Brück (links) und der Deponie Lübben (rechts)

Weiterhin ist die Lage der einzelnen Pegel bezüglich der Deponie in die Auswertung einzubeziehen. Ein Pegel im Hauptabstrombereich sollte erwartungsgemäß eine deutlich höhere Deponiebelastung und damit auch längere Nachsorgezeiten zeigen als ein Pegel im Seitenstrombereich. Selbst der Konzentrationsverlauf der Parameter ist oftmals durch äußere Einflüsse gestört und besitzt nicht den tatsächlichen, idealerweise exponentiell fallenden Trend. An drei der fünf Deponiestandorte wurde die wahre deponiebedingte Belastung des Grundwassers durch eine im Grundwasserleiter auftretende Schwereschichtung verzerrt. Das stärker belastete Wasser strömt der Leiterbasis zu, sodass in den dort verfilterten Pegeln (Unterpegeln) signifikant höhere Stoffkonzentrationen beobachtet werden konnten als in den Oberpegeln. Damit wird deutlich, dass auch die Verfilterung eine entscheidende Rolle spielt und für eine Auswertung der Nachsorgezeiträume die Auswahl der repräsentativsten Pegel notwendig ist. Einige weitere äußere Einflussfaktoren auf die Stärke der Grundwasserbelastung im Abstrombereich einer Deponie werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

3.4 Deponieeigene Einflussfaktoren auf den Abstrom

Um den Einfluss von Deponiegröße, geologischem Untergrund und Abdichtungssystemen auf die Grundwasserbelastung im Deponieabstrom bewerten zu können, wurden die Konzentrationen der Deponieleitparameter in den Pegeln im Hauptabstrombereich der fünf Deponien betrachtet.



Der ausschlaggebende Faktor bezüglich der Deponiegröße ist das abgelagerte Abfallvolumen.

Abbildung 9 zeigt, dass dieses für die Deponien sehr unterschiedlich ausfällt. Erwartungsgemäß sollte ein hohes Abfallvolumen zu einer stärkeren Grundwasserbelastung im Abstrombereich führen, da mehr Schadstofffracht aus dem Abfall mobilisiert werden kann.

Abbildung 9: Vergleich des Abfallvolumens der bearbeiteten Deponien (B – Brück, D – Dallgow, L – Lübben, S – Senzig, F – Fohrde)

Dieser direkte Zusammenhang zwischen Deponiegröße und Grundwasserbelastung konnte anhand der Daten der fünf Deponien nicht signifikant nachgewiesen werden. Die kleineren Deponien zeigten zum Teil deutlich höhere Belastungsgrade im Abstrom als die größte Deponie Fohrde. Der Deponieabstrom wird sehr stark von Faktoren wie oszillierenden Fließrichtungen, Schwereschichtungen, unterschiedlichen Eluierungszeiten des Abfallkörpers usw. beeinflusst, welche den wahren Einfluss der Deponiegröße überdecken.

Keiner der fünf Standorte weist eine geologische Barriere zum Schutz des Grundwassers auf. Jedoch wird bei Dallgow der tiefere Grundwasserleiter durch einen durchgängigen Stauhorizont aus Geschiebemergel geschützt. Anhand der vorhandenen Daten konnte am Standort eine signifikant geringe Belastung als im ungeschützten Grundwasserleiter festgestellt werden, wodurch eine Schutzwirkung des Geschiebemergels naheliegt. Durch Wegsamkeiten kommt es dennoch zur Verlagerung der Belastung in den tieferen Grundwasserleiter, da die Stoffkonzentrationen mehrerer Parameter eine steigende Tendenz aufweisen. Der adsorbierende Einfluss von Feinkornschichten im Untergrund kann trotzdem bestätigt werden und führt, zumindest temporär, zu einer geringeren Stoffbelastung in den geschützten Grundwasserleitern.

Alle fünf Deponien besitzen Oberflächenabdichtungen nach Stand der Technik aus den Jahren 2005 bis 2008. Die Schutzwirkung besteht darin, den Stoffaustrag aus dem Abfallkörper durch Verringerung der eintretenden Niederschlagsmenge zu vermindern. In den Konzentrationszeitreihen sollte dabei ein plötzlicher signifikanter Abfall der Stoffkonzentrationen zu sehen sein. Dieser konnte anhand der Daten nur für einen Pegel der Deponie Fohrde beobachtet werden. In den übrigen Fällen ist jedoch nicht die Wirkung der Oberflächenabdichtung anzuzweifeln, sondern zu beachten, dass der Effekt ebenfalls durch andere Faktoren überlagert wird. Zum einen bewirken organische Abbauprozesse im Abfall trotz geringer Wassermengen weiterhin einen Deponieaustrag. Zum anderen ist die zeitliche Verzögerung des belasteten Wassers zu beachten. Durch hohe Lagerungsdichten im Abfallkörper bewegt sich das Sickerwasser nur sehr langsam. Hinzu kommen die geringen Fließzeiten des Grundwassers an allen Standorten, sodass meist mehrere Jahre vergehen,

bevor die Abstrompegel erreicht werden. Daher ist anzunehmen, dass die Auswirkungen der Oberflächenabdichtungen aufgrund der großen zeitlichen Verzögerung des belasteten Wassers erst in den nächsten Jahren in den Abstrommessstellen der Deponien zu sehen sein werden. Aktuell wird zeitverschoben die Situation der Ablagerungsphase wiedergegeben, sodass anhand der Daten keine Verkürzung der Nachsorgephase durch eine Oberflächenabdichtung anzuraten ist.

Eine Basisabdichtung zur Verhinderung des Stoffaustrags ins Grundwasser fehlt an allen fünf bearbeiteten Deponien.

4 Zusammenfassung und Bewertung

Zusammenfassend ist zu sagen, dass in der Regel eine Festlegung der Auslöseschwellen mithilfe der zwei angewandten Bestimmungsverfahren sowie eine Berechnung der Nachsorgezeiten über die beschriebene Methodik erfolgen kann. Es ergaben sich für die fünf betrachteten Deponien auf den ersten Blick überwiegend praktikable und finanziell vertretbare Ergebnisse. Jedoch sind sowohl diese als auch die Eignung der einzelnen Verfahren kritisch mit folgenden Einschränkungen zu betrachten:

- Keine gesetzliche Vorgabe eines verbindlichen Verfahrens zur Bestimmung der Auslöseschwellen: Schon die zwei untersuchten Methoden lieferten zum Teil stark variierende Ergebnisse für dieselbe Messreihe. Daher bleibt die Frage, welche sind richtig? Zudem fließt oftmals die subjektive Meinung des Bearbeiters (z.B. Trendbewertung) ein, sodass keine statistisch fundierte Bestimmung, sondern eher eine willkürliche und subjektive Festlegung der Auslöseschwellen erfolgt.
- Lange Fließzeiten vom An- zum Abstrompegel: In dieser Zeit sind starke natürliche Veränderungen der Wasserchemie zu erwarten, sodass die aus den Anstromwerten ermittelten Auslöseschwellen nicht wirklich repräsentativ für den Abstrom sind.
- Fehlende geologische Barrieren: Die meisten Bestimmungsverfahren basieren auf der Annahme, dass am Deponiestandort eine geologische Barriere als Schutz für das Grundwasser vorhanden ist. Im Fall der fünf bearbeiteten Brandenburger Deponien fehlt diese, sodass mithilfe der bisherigen Verfahren keine geeigneten Auslöseschwellen ermittelt werden können. Es würde regelmäßig zu Überschreitungen kommen.
- Vorgabe des Kriteriums zur Beendigung der Nachsorge: Das dauerhafte Absinken der Abstrombelastung unter die Auslöseschwellen als Kriterium zur Beendigung der Nachsorge einer Deponie ist nicht einfach zu beurteilen. Ein genauer Zeitpunkt kann nicht sicher bestimmt werden, besonders da oftmals die Auslöseschwellen schon innerhalb der Ablagerungs- oder Stilllegungsphase einer Deponie unterschritten wurden. Zudem werden in der Deponieverordnung keine genaueren Angaben gemacht, wie die Herangehensweise aussehen soll oder welche bzw. wieviele Parameter unterhalb der Auslöseschwellen liegen sollen. Jedoch ist hinzuzufügen, dass es sich auch nur um ein in der Deponieverordnung vorgegebenes Kriterium zur Beendigung der Nachsorge handelt (Anh. 5 Nr. 10 DepV 2009).
- Trendverhalten der Parameter im Abstrom: Zum einen erfolgt die Festlegung der Trends und Trendsicherheiten R^2 für die Bestimmung der Nachsorge sehr subjektiv. Zum anderen können oftmals in den Werten aufgrund äußerer natürlicher Einflüsse (Schwereschichtung, oszillierende Fließzeit etc.) keine exponentiell fallenden Trends nachgewiesen werden, auf denen jedoch die Auswertung mit der Gleichung nach

Ramke, Krümpelbeck und Ehrig beruht. Daraus ergeben sich große Unsicherheiten der Ergebnisse, sodass keine terminliche Festsetzung des Abschlusses der Nachsorge aus diesen Werten erfolgen sollte.

- Stark unterschiedliche Nachsorgezeiten: Aus den genutzten Deponiedaten ließen sich mit der angewandten Methodik sowohl für die Pegel einer Deponie als auch für verschiedene Parameter eines Pegels sehr unterschiedliche Nachsorgezeiten berechnen. Welche Nachsorgedauer ist dann die Richtige? Oder welcher Parameter ist am besten geeignet, um die Deponiebelastung wiederzugeben, und somit am repräsentativsten?
- Statistische Brauchbarkeit des Verfahrens zur Nachsorgebestimmung: Von den ursprünglich bearbeiteten 275 Messreihen konnten nur 111 zur weiteren Auswertung genutzt werden. Viele Messreihen mussten verworfen werden, da sie steigende oder nicht ausreichend sichere Trends aufwiesen. Damit ist das Verfahren nur in den wenigsten Fällen geeignet, mehr als die Hälfte der Messreihen konnten nicht in die Betrachtung einbezogen werden. Die statistische Brauchbarkeit ist gering. Zudem ergibt sich durch die vielen beendeten Nachsorgezeiten ein sehr positives Bild der Gesamtbelastung für alle fünf Deponien, welches jedoch anhand der oft auftretenden steigenden Belastungen widerlegt wird. Da alle nicht fallenden Messreihen keine Beachtung bei der Auswertung finden, wird ein zu positives, verzerrtes Bild der Belastungssituation wiedergegeben. Die Nachsorgebestimmung über das angewandte Verfahren führt demnach zu einer zu einseitigen, falschen Bewertung.

(Diese Auflistung stellt nur kurz die wichtigsten Kritikpunkte und Probleme, die während der Bearbeitung auffielen, dar. Sie besitzt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.)

Von diesem Blickpunkt aus bleibt die Umsetzung der Deponieverordnung bezüglich Auslöseschwellen und Nachsorgezeiträumen insgesamt ein kritisches Thema.

Einige Vorschläge zur möglichen Verbesserung der oben genannten Kritikpunkte seien noch erwähnt:

- Erarbeiten und Vorgeben einer geeigneten Methode zur Festsetzung von Auslöseschwellen
- Erarbeiten einer geeigneten Methode zur Bestimmung der Nachsorgezeit. Dazu könnte die Klärung der Frage gehören, ob die Anwendung des exponentiellen Trends tatsächlich geeignet ist oder ob eine andere mathematische Darstellung der Konzentrationszeitreihen sinnvoller wäre.
- Präzisierung des Kriteriums 8 aus Anh. 5 Nr. 10 DepV 2009, vor allem hinsichtlich der Parameterauswahl, da durch die Berechnung sehr unterschiedliche Zeitpunkte vorgegeben werden. Sollen alle Parameter dieses Kriterium erfüllen oder nur 90 (95)%? Kann die Bewertung auf wichtige Parameter (z.B. Deponieleitparameter und toxisch relevante Parameter) zum Erkennen einer deponiebedingten Grundwasserbelastung und ihrer Gesundheitsschädlichkeit eingeschränkt werden?
- Quantifizierung der Zeitverschiebung vom Austritt des Wasser aus dem Abfallkörper bis zur Abstrommessstelle (z.B. Berechnung der Sickerwege im Abfall sowie in der ungesättigten Zone und der Fließwege im Grundwasser getrennt)

Generell sollte eine qualitative Betrachtung der Grundwasserbelastung im Abstrombereich erfolgen (z.B. mithilfe des Piper-Diagramms), um ein überschlägiges Zeitintervall für die

Nachsorgephase angeben zu können. In diesem sind regelmäßige Kontrollen der Stoffkonzentrationen im Grundwasser, der Auslöseschwellen und der berechneten Nachsorgezeit zu empfehlen. Wenn eine Abnahme der Belastung erkannt werden kann und überwiegend fallende Trends zu beobachten sind, ist eine Bestimmung des Nachsorgeendes anzuraten.

5 Quellen

- [1] *Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) vom 27.4.2009, zuletzt geändert am 24.2.2012.*
- [2] *Arbeitshilfe Nr. 3.6/1: Auslöseschwellen bei der Überwachung des Grundwassers im Bereich von Deponien. Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft. Stand: 15.12.2005.*
- [3] *Niedersachsen: Leitfaden mit Arbeitsanleitung zur Festlegung von Auslöseschwellen sowie zur Gestaltung von Maßnahmenplänen nach §9 DepV. Schreiben vom 31.8.2004.*
- [4] *Empfehlung zur Festlegung von Auslöseschwellen gemäß § 9 DepV für Thüringer Deponien. TLUG. Stand 13.7.2005.*
- [5] *Umsetzung der Abfallablagerungsverordnung und der Deponieverordnung in Nordrhein-Westfalen. Stand der Genehmigungspraxis, 2009.*
- [6] *Heinemann & Partner: Praxis im Verwaltungsrecht. Abschnitt Abfallwirtschaftsrecht, 2007.*
- [7] *Heinemann & Partner: Weiterentwicklung des Deponierechts. Abschnitt "Die Festlegung von Auslöseschwellen gemäß §9 Abs. 1 DepV". Essen und EMLE Madrid.*
- [8] *Schulze, S. (2012): Auswertung von Ergebnissen der Grundwasserbeobachtung an Brandenburger Deponien mit dem Ziel der Ableitung von Nachsorgezeiträumen. Masterarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 2012. Betreuung durch Prof. Dr.-Ing. H. Klapperich (TU Freiberg), Dr. U. Stock (LUGV Brandenburg), Dipl.-Geologe D. Tondera (TU Freiberg).*
- [9] *BMBF-Forschungsvorhaben: Abschätzung von Restemissionen von Deponien in der Betriebs- und Nachsorgephase auf der Basis realer Überwachungsdaten, 1999.*

