

04.15

Lizenziert für Frau Dr. Daniela Sager.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

24. Jahrgang
August 2015
ISSN 0942-3818
20565

altlasten spektrum

Herausgegeben vom
Ingenieurtechnischen Verband für Altlastenmanagement
und Flächenrecycling e.V. (ITVA)

www.ALTLASTENdigital.de



Organ des ITVA

Inhalt

H.-U. Bertram
Dunkle Wolken oder Silberstreif am Horizont?

M. Koch
Probenahme nach LAGA PN 98: Langzeiterfahrungen mit der Repräsentativität der Proben und statistische Auswertung der Laborergebnisse

K. Finsterwalder, D. Sager
Biologische in situ Sanierung von Deponien und Böden durch Belüftung

J. Frauenstein
AquaConSoil 2015 in Kopenhagen – Forscher und Anwender im Dialog?

K. Schelle
„Boden und Grundwasser – Berufsbilder der Zukunft“ – 3. ITVA-Nachwuchsveranstaltung an der RWTH-Aachen

Biologische in situ Sanierung von Deponien und Böden durch Belüftung

Klemens Finsterwalder, Daniela Sager

1. Einleitung

Generell ist es für die Beurteilung einer bautechnischen Situation wesentlich, dass der ungünstigste Zustand erfasst wird (Grenzzustand der Tragfähigkeit, Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit). Ein entsprechendes Vorgehen wird im Deponie- und Altlastenbereich nicht praktiziert, weil sich Grenzzustände, z. B. Emissionen in den Grundwasserleiter, zeitabhängig entwickeln.

Bei Deponiebauwerken oder Schadensfällen im Boden und Grundwasser wird vorgeschlagen, die Frachten und Emissionen in den Grundwasserleiter zu ermitteln [1]. Diese werden aus der Überlagerung der günstigsten und ungünstigsten Bedingungen, definiert über die Streuungen aller emissionsbestimmenden Daten, bestimmt. Das Ergebnis ist eine Emissionsgrenzwertanalyse als Funktion der Zeit. Die Emissionsgrenzwerte, die obere Grenze eines Emissionsfeldes, sind die maximal möglichen Belastungswerte im Abstrom der (Schad)Stoffquelle (Grenzzustand der Grundwasserbelastung).

Auf Grundlage von Emissionsgrenzwertanalysen werden verschiedene mögliche Varianten im Hinblick auf ihre Eignung und vor allem im Hinblick auf ihre standortspezifische Wirksamkeit, d. h. Nachweis der Emissionssicherheit, untersucht. Die Entwicklung von ökologischen Zielvorgaben mit den Fachbehörden ist als Beurteilungsmaßstab ein unverzichtbarer Teil der Bemessung von Sanierungs-/Sicherungsmaßnahmen. Das betrifft die Festlegung von Sanierungszielwerten, u. a. Auslöseschwellenwerte für die Grundwasserbelastung mit Schadstoffen, und die Beurteilung der Nachhaltigkeit des Sanierungsergebnisses in Bezug auf den zeitlichen Verlauf [2]. Aus jenen Varianten, für die der Nachweis der Emissionssicherheit vorliegt, d. h. die Emissionsgrenzwerte halten die Zielvorgaben dauerhaft ein, wird die mit dem besten Preis-Leistungsverhältnis ausgewählt [3].

Für beide, in diesem Beitrag vorgestellten, Standorte haben die Ergebnisse der Emissionsgrenzwertanalyse aufgezeigt, dass eine biologische in situ Sanierung durch Belüftung die wirksamste und zugleich kostengünstigste Variante zur langfristigen Verringerung des Schadstoffpotenzials ist. Die Entwicklung dieses biologischen Verfahrens zielt auf die Inertisierung von organischen Deponieinhaltsstoffen (z. B. Ammo-

nium) oder auch von organischen Verunreinigungen im Boden (z. B. Mineralölkohlenwasserstoffe).

Die Besonderheit des Verfahrens besteht darin, dass die Belüftung nicht nach Druck, sondern über die zugeführte Luftmenge gesteuert ist, sodass sich eine, für die biologischen Abbauprozesse, optimale Temperatur im Deponiekörper bzw. im Untergrund realisieren lässt. Der sich einstellende Belüftungsdruck ist abhängig von der Durchlässigkeit der belüfteten Schichten und der Lage des Grundwasserspiegels zur Sohle der Deponie/(Schad)Stoffquelle. Die Druckmessung an den jeweiligen Belüftungsbrunnen dient der Kontrolle der Funktionstüchtigkeit der Brunnen und liefert kontinuierlich Informationen über Vorgänge im Untergrund. Die Überwachung der Umsetzungs-, Reaktionsvorgänge und biologischen Abbauprozesse erfolgt über kontinuierliche Messungen der Porenluftzusammensetzung. Diese ermöglichen die Erstellung von Massenbilanzen durch die Auswertung der Porenluftbestandteile, getrennt für die Absolutmengen von Stickstoff (TN, total nitrogen) und Kohlenstoff (TC, total carbon). Der Verlauf der Abbauprozesse, als Funktion der Zeit, ist ein Indikator für den Abschaltzeitpunkt. Das Maß hierfür ist der Zuwachs pro Zeiteinheit. Wenn dieser einen vorgegebenen Schwellenwert unterschreitet, kann abgeschaltet werden. Damit wird das Prüfkriterium zum Abklingen der biologischen Umsetzungs- und Reaktionsvorgänge quantifizierbar. Die Volumenvorgabe, Druckmessung sowie analytische Bestimmung der Reaktionsprodukte über die Messung der Porenluftzusammensetzung bieten insgesamt die Steuerungsmöglichkeit der biologischen in situ Sanierung von Beginn an.

2. Prüfung der Eignung der biologischen in situ Sanierung und Bemessung der Maßnahmen auf optimale Wirksamkeit

2.1 Beurteilungsverfahren

Die Entscheidung der Eignung der biologischen in situ Sanierung basiert auf einer Variantenuntersuchung unter Berücksichtigung der standortspezifischen Randbedingungen, der definierten ökologischen Zielvorgaben der Fachbehörden und der sich ergebenden Gesamtkosten. Die Anwendung von Emissionsgrenzwertanalysen, gemäß dem Prinzip

der Vorsorge, bietet bereits in der Planungsphase die Möglichkeit, das erforderliche Wirkungspotenzial einer gewählten Sanierungs-/Sicherungsmaßnahme für eine Deponie oder einen Schadensfall über die gesamte Lebensdauer zu analysieren und zuverlässig zu beurteilen. Die Untersuchung beginnt mit der Statusbeurteilung des Standortes, um das Emissionspotenzial beurteilen zu können. In einem zweiten Schritt werden die, auf dem Markt angebotenen, Sanierungs-/Sicherungssysteme und -verfahren auf einer einheitlichen Grundlage verglichen und bewertet. Die Feststellung der Emissionsicherheit beruht letztlich auf der Verknüpfung der ökologischen Forderungen, d. h. langfristigen Einhaltung der Zielvorgaben, mit dem Wirkungsnachweis einer Variante, z. B. in situ Belüftungsverfahren, und den Daten des Standortes. Verwirklicht wird schließlich die Lösung mit dem besten Preis-Leistungs-Verhältnis.

2.2 Ablauf der Bemessung

Der Ablauf der Bemessung, nach dem Prinzip der Vorsorge, wird exemplarisch am Beispiel einer ehemaligen Rotteballendeponie und an einem Bodenschadensfall mit Dieselmotortreibstoff behandelt. Ziel ist es, eine praktische Vorstellung über Inhalt und Durchführung von Emissionsgrenzwertanalysen zur Bewertung der Emissionsicherheit eines Standortes, d. h. einen tolerierbaren Zustand für den Standort im Hinblick auf die Grundwasserbelastung, und den daraus abgeleiteten Maßnahmen zu vermitteln. Im Rahmen einer Variantenuntersuchung wurden mehrere Sanierungsmaßnahmen untersucht. Neben der in situ Sanierung durch Belüftung des Deponiekörpers wurden weitere, von den Beteiligten vorgeschlagene, Maßnahmen zur Sanierung/Sicherung untersucht, z. B. Wasserhaushaltsschicht, mineralische Abdichtungen oder polymervergütete Dichtungsmaterialien. Die Statusbeurteilung der Grundwasserbelastung (GW), als Emissionen oder Frachten bei Fortführung des Ist-Zustandes, für die gesamte Lebensdauer der Rotteballendeponie ist dargestellt in *Abbildung 1*.

Die Emissionen in den Grundwasserleiter werden über die Breite der (Schad)Stoffquelle unter Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeit integriert. Das Ergebnis ist dann die Fracht an löslichen Stoffen im Grundwasserleiter, die einer Stromlinie von einem Meter Breite zugeordnet ist. Die Grundwasserfracht wird im festgelegten Nachweisschnitt für den Rand der (Schad)Stoffquelle auf der Abstromseite im Grundwasserleiter in [kg/m/Jahr] angegeben.

In den Abbildungen sind die von der Behörde vorgegebenen Beurteilungsstufen eingetragen, wobei als ökologische Zielvorgabe mindestens die Unterschreitung der Stufe III gilt. Bei der Beibehaltung des Ist-Zustandes kann dieses Ziel langfristig nicht erreicht werden. Die Emissionsgrenzwerte überschreiten den tolerierbaren Zustand für den Standort, d. h. die Belastungswerte im Grundwasser sind dauerhaft höher als die festgelegten Beurteilungsstufen.

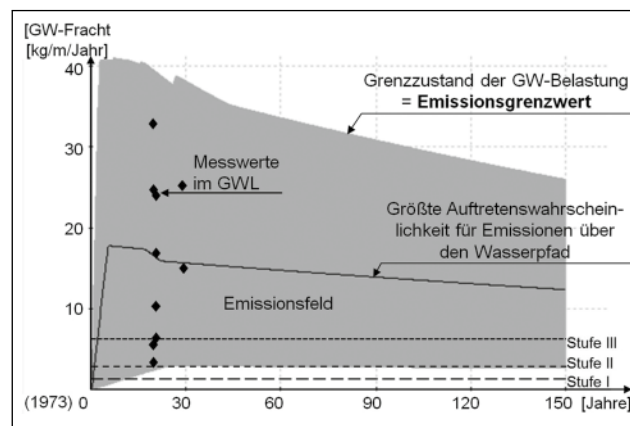


Abbildung 1: Emissionsgrenzwertanalyse der Ammoniumfrachten im GW für eine Fortführung des Ist-Zustandes, Betrachtung der gesamten Lebensdauer, beginnend mit dem Jahr 1973, für beliebige Zeiträume, Verknüpfung mit den ökologischen Zielvorgaben der Fachbehörde

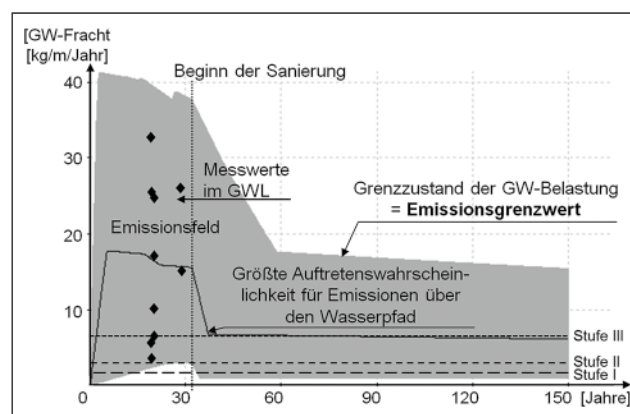


Abbildung 2: Emissionsgrenzwertanalyse der Ammoniumfrachten im GW für eine Abdeckung als WHS mit Waldnutzung, langfristige Überschreitung der behördlichen Zielvorgaben

Im Rahmen der Prüfung der Wirksamkeit einer Wasserhaushaltsschicht (WHS) wurde als Bepflanzung Grasbewuchs, welcher der jetzigen Oberflächenbewirtschaftung entspricht, oder eine Waldnutzung untersucht. In *Abbildung 2* ist exemplarisch eine Waldnutzung dargestellt. Hier liegen die Emissionsgrenzwerte, welche entscheidend für den Nachweis der Wirksamkeit und damit der Emissionsicherheit sind, noch erheblich über der behördlichen Zielvorgabe. Auch die mineralische Abdichtungsmaßnahme der Deponie mit Bentonitmatten erreicht, unter den gegebenen Standortbedingungen, nicht das vorgegebene Sanierungsziel, weder mit zwei noch mit vier Lagen. Als weitere mögliche Abdichtungsmaßnahme wurde eine 10 cm mächtige polymervergütete Abdichtung aus Trisoplast beurteilt. Die Ergebnisse der Emissionsgrenzwertanalyse zeigen, dass diese Maßnahme geeignet ist, um die Zielvorgabe der Behörde einzuhalten (*Abbildung 3*).

Biologische in situ Sanierung von Deponien und Böden durch Belüftung

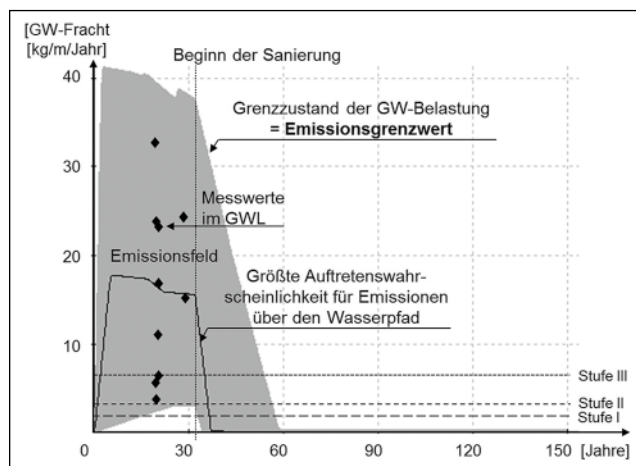


Abbildung 3: Emissionsgrenzwertanalyse der Ammoniumfrachten im GW für eine polymervergütete Abdichtung aus Trisoplast, langfristige Einhaltung der behördlichen Zielvorgaben

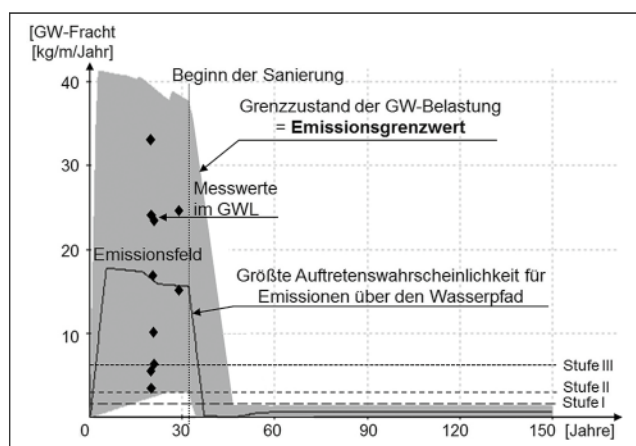


Abbildung 4: Emissionsgrenzwertanalyse der Ammoniumfrachten im GW für das biologische in situ Belüftungsverfahren, Sanierungsbeginn 2010, langfristige Einhaltung der behördlichen Zielvorgaben

Die schlussendlich gewählte, wirksamste und kostengünstigste Maßnahme ist die in diesem Beitrag vorgestellte biologische in situ Sanierung durch Belüftung, welche von den Behörden zur Umsetzung genehmigt wurde. Die *Abbildung 4* stellt die Veränderung der Ammoniumfrachten im Grundwasserabstrom der Deponie dar. Die Ergebnisse der Emissionsgrenzwertanalyse zeigen ein Absinken der Ammoniumfracht unter den Stufe I Wert bei entsprechender Belüftungsdauer.

3. Technische Umsetzung der biologischen in situ Sanierung durch Belüftung

3.1 In situ Sanierung einer ehemaligen Rotteballendeponie durch Belüftung

Die Deponie wurde mit in Ballen kompostierten Hausmüll und in einzelnen Bereichen mit Bauschutt befüllt. Die Deponie ohne Basisabdichtung weist eine Größe von ca. 18 ha auf und die Schütthöhe beträgt

im Mittel ca. 3 m. Die Oberflächen, mit einem ca. 0,8 m mächtigen Kulturboden, sind überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Die maximale Belastung im Grundwasserabstrom der Deponie betrug etwa 20 mg/l Ammonium. Andere Inhaltsstoffe waren dagegen kaum auffällig. Deshalb bot sich in diesem Fall eine Belüftung des Deponiekörpers an, um die im Deponiekörper vorhandenen, biologisch abbaubaren, Stickstoffverbindungen zu oxidieren.

Das Besondere am Standort der Rotteballendeponie besteht darin, dass die Belüftung so geplant wurde, dass sich die ungesättigte Bodenzone und der Deponieinhalt wie ein biologischer Festbettreaktor verhalten und die Deponieoberfläche selbst einen Biofilter für die austretende Porenluft darstellt [4, 5]. Diese drei Bereiche werden auch als biologische in situ Reaktionsbereiche bzw. „Filter“ für die, u. a. in Lösung befindlichen, oxidierbaren Stickstoffverbindungen bezeichnet.

Als natürliche Verteilerschicht dient die ungesättigte Bodenzone unter der Deponie, die aus eiszeitlichem Schotter besteht. Die dort eingeblasene Luft oxidiert zunächst hauptsächlich Ammonium und Kohlenstoff in der ungesättigten Bodenzone mit einer sehr hohen Umwandlungsrate zu NO_3^- und CO_2 . Der weitere mikrobiologische Abbau erfolgt in einer Abbauzone, die sich parallel zur Deponiebasis ausbildet und sich in Richtung Deponieoberfläche weiterbewegt. Damit unterliegt das gesamte Stickstoffpotenzial dem biologischen Abbauprozess, solange die Belüftung in Betrieb ist. Die technische Ausführung der Belüftungsanlage ist im Jahr 2010 erfolgt. Es wird erwartet, dass die Belüftung der Deponie über 200 Brunnen etwa sechs Jahre betrieben werden muss. Jeder Brunnen belüftet eine Fläche von 900 m².

Die Abfallanalysen anlässlich der Brunnenbohrungen ergaben unter Laborbedingungen ein Gesamtpotenzial von 2.320 Mg TN für den Deponiekörper, von denen unter anaeroben Bedingungen 230 Mg als organisch verfügbar eingeschätzt wurden, die als Ursache für die Grundwasserbelastung durch Ammonium bewertet wurden. Wird die Deponie belüftet, entsteht als Abbauprodukt Nitrat (NO_3^-). Beide Stickstoffverbindungen liegen gelöst im Porenwasser vor und gelangen über Konvektion und Diffusion in den Grundwasserleiter, im anaeroben Zustand als Ammonium und im aeroben Zustand als Nitrat. Eine Umwandlung von Nitrat in gasförmigen, elementaren Stickstoff und Wasser (Denitrifikation) findet im Grundwasser statt. Unter Bedingungen des entwickelten und angewendeten in situ Belüftungskonzeptes wurden im Abstrom der Deponie lediglich maximal 5 mg/l Nitrat gemessen.

In der *Abbildung 5* ist die Entwicklung des TN Abbaus als Summenwert aus allen 35 Sonden zur Porenluftanalytik sowie die Entwicklung der Ammoniumkonzentration im Abstrom der Deponie dargestellt. Nimmt der Summenwert nicht mehr oder nur sehr wenig zu, ist der zur Ammoniumbildung verfügbare

Biologische in situ Sanierung von Deponien und Böden durch Belüftung

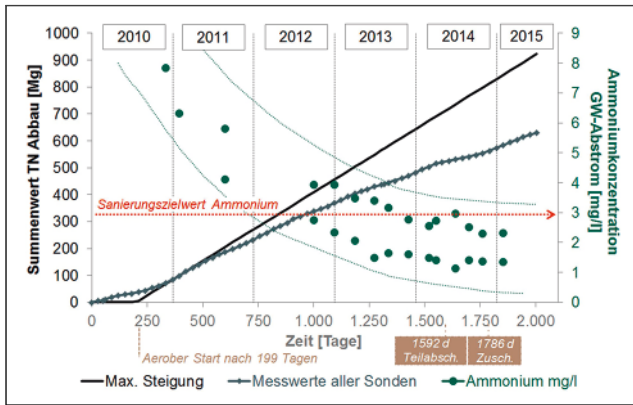


Abbildung 5: Rotteballendeponie – Verlauf der Ammoniumkonzentration im Grundwasser und Abbau Gesamt-Stickstoff in der Deponie 2010 bis 2015, Teilabschaltung des Belüftungssystems für einen Zeitraum von 194 Tagen

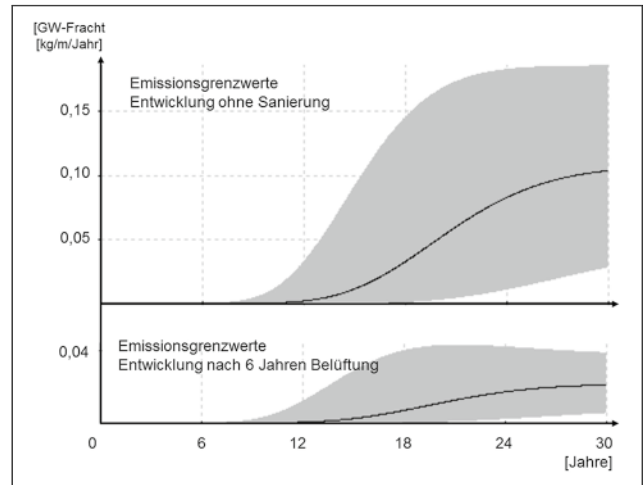


Abbildung 6: Emissionsgrenzwertanalyse der Dieselkraftstofffrachten GW, abhängig von der Zeitdauer der Belüftung (oben: Entwicklung ohne Sanierung, unten: Entwicklung nach 6 Jahren Belüftung); Verzögerung im Stofftransport bedingt durch die mächtige geologische Barriere von 50 Metern

Stickstoff weitgehend abgebaut. Damit ist eine anaerobe Umwandlung der im Deponiekörper vorhandenen Kohlenstoffverbindungen mit der Bildung von Ammonium nur mehr eingeschränkt möglich. Dieser Zustand wird über die Messdaten aus der Bodenluftanalyse und den Messungen im Grundwasserleiter ermittelt.

Die bisher abgebauten TN Mengen sind mit 630 Mg größer als auf Basis der Abfallanalysen (230 Mg) prognostiziert. Das hängt damit zusammen, dass unter aeroben Bedingungen das Potenzial an biologisch abbaubarem Material größer ist als unter anaeroben.

Die Belastung des Grundwassers durch Ammonium von bis zu 20 mg/l wurde durch die Belüftung auf Werte zwischen 1,5 bis 3 mg/l reduziert. Der Sanierungszielwert von 3 mg/l ist unter Berücksichtigung der Varianz der Daten noch nicht erreicht. Der Nitratwert im GWL liegt unter 0,5 mg/l und damit erheblich niedriger als in der Planung erreicht und weit unter dem behördlich tolerierten Grenzwert von 35 mg/l. Die spezifische Umsetzrate TN der Deponie beträgt im Mittel der letzten 12 Monate 0,26 mg/(m²d).

3.2 In situ Sanierung eines Dieselschadens durch Bodenbelüftung

Bei einem Bodenschadensfall sind ca. 60.000 kg gelagerter Dieseltreibstoff ausgeflossen und im Untergrund versickert [6]. Nach eingeleiteten Sofortmaßnahmen und Detailerkundungs- sowie Beweissicherungsmaßnahmen im Grundwasser wurde basierend auf der Fachplanung „Emissionssicherheit“ die biologische in situ Belüftung des Bodens mit konstanter Luftzufuhr vorgeschlagen und bescheidgemäß bewilligt. Zur Abschätzung des biologischen Abbaus der Schadstoffe wurden labortechnische Versuche durchgeführt. Zur Bemessung des Verfahrens wurde aus den Daten der Unfallstelle ermittelt, dass die, im belüfteten Bereich, nach den Sofortmaßnahmen noch vorhandene Menge an Diesel 54.440 kg beträgt. Da die, für die Vermehrung der Bakterienpopulation, im Boden

vorhandenen Stickstoffverbindungen nicht ausreichend waren, wird im Schadensbereich im Abstand von 3 Monaten kontinuierlich NPK-Dünger (Stickstoff, Phosphor, Kalium) mittels Streuwagen bzw. bei den wenigen schwer zugänglichen Bereichen händisch aufgebracht. Für das erste Betriebsjahr betrug die Wirkstoffzugabe 125 g/m² N und je 13 g/m² P und K. Im zweiten Jahr wurden insgesamt rund 270 kg NPK gesamt, im dritten Jahr rund 230 kg NPK gesamt und gegenwärtig etwa 230 kg Wirkstoff appliziert.

Die Leistungen der Fachplanung „Emissionssicherheit“ auf Grundlage von Emissionsgrenzwertanalysen hatten die Berechnung der Emissionen des Nährstoffes Stickstoff (N) durch die Bodenschichten, die Berechnung der Grundwasserfracht für den Parameter Nitrat durch die Nährstoffzufuhr (Ermittlung des Grenzzustandes der Grundwasserbelastung) sowie wiederum den Nachweis der Wirksamkeit der Maßnahme in Abhängigkeit von der Zeit zum Inhalt (vgl. Abbildung 6). Unter Berücksichtigung dieses Vorgehens kann gemäß Ausführungsplanung die Belüftung nach 5 bis 7 Jahren abgeschaltet werden.

Die biologische in situ Sanierung zeichnet sich dadurch aus, dass Belüftungsbrunnen, dimensioniert auf Stärke, Größe und Ausdehnung des Schadensbereiches, errichtet werden, in denen über Belüftungshorizonte das Risikopotenzial gezielt verringert wird. Am vorgestellten Standort des Schadensfalles mit Dieseltreibstoff wurden in der Ausführung jeweils drei separate Bodenhorizonte über insgesamt 7 Belüftungsbrunnen volumengesteuert mit Luft versorgt:

- Horizont 1 im Basisbereich des Schadens,
- Horizont 2 im Zentrum des Schadens,
- Horizont 3 im Oberflächenbereich des Schadens.

Dabei bildet jeder Horizont eine biologische Reaktionszone aus, bzw. wurde die Belüftung im Horizont 3 so konzipiert, dass auch der Bereich darunter

Biologische in situ Sanierung von Deponien und Böden durch Belüftung

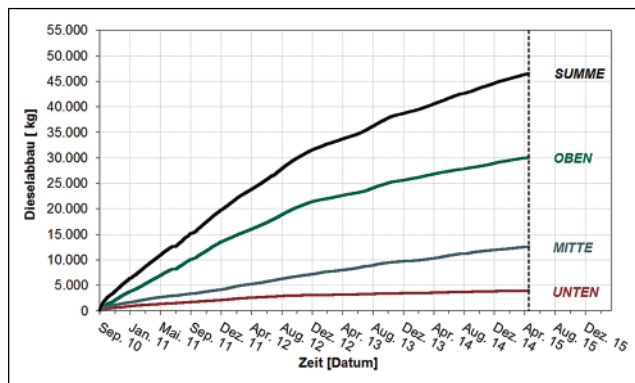


Abbildung 7: Dieselabbau gesamt 2010–2015 bzw. Darstellung der einzelnen Belüftungshorizonte

noch mit Luft versorgt wird. Die insgesamt vier, durch die Belüftungsmaßnahme aufgebauten, biologischen „Filter“ verhindern zuverlässig die Verlagerung von Mineralölkohlenwasserstoffen in tiefere Schichten. Die tolerierbare Belastung des Grundwassers wurde von der Behörde mit einem Grenzwert von 0,1 mg/l festgelegt. Die Grundwasseruntersuchungen mittels Infrarotspektroskopie belegen die Abwesenheit von Mineralölkohlenwasserstoffen. Die Konzentrationen liegen unter der Bestimmungsgrenze von 0,05 mg/l, meist auch unter der Nachweisgrenze von 0,02 mg/l. Die gegenwärtig noch im Boden vorhandene Dieselmenge beträgt 7.900 kg oder ca. 14,5 % der ursprünglich vorhandenen Menge an Diesel. Der biologische Abbau des Diesels im Boden verläuft schneller als erwartet. Die Ursache hierfür liegt in den um ca. 2 bis 4 ° C höheren Bodentemperaturen durch die entstehende Oxidationswärme. Die vorhandene Restmenge an Dieselkraftstoff liegt deutlich unterhalb der oberen ökologischen Zielvorgabe von 10.535 kg. Die untere Zielvorgabe von

4.900 kg wird voraussichtlich in 1 bis 2 Jahren, also 2016 bis 2017 unterschritten sein. Zur Beurteilung der Abschaltung wird der Abbau an Dieselkraftstoff im Zentrum des Schadens herangezogen. Hierfür wurde eine Bodenluftmessstelle installiert, aus der kontinuierlich, jeweils aus jedem Horizont, Bodenluftproben entnommen werden. Maßgeblich für die Bewertung ist jedoch nicht der absolute Betrag der (errechneten) Abbaumenge, sondern der Kurvenverlauf des Abbaufortschrittes. Geht der Dieselabbau gegen Null, d.h. der Summenwert nimmt nur noch wenig zu, dann ist der Zeitpunkt zur Abschaltung der Belüftung erreicht (siehe Abbildung 7). Dieses Ergebnis wird durch eine Feststoffbeprobung im Zentrum des Schadens überprüft.

Es ist erkennbar, dass im unteren Horizont 1 die Umsatzrate von 177 kg/Monat auf 29 kg/Monat, im mittleren Horizont 2 von 246 kg/Monat auf 150 kg/Monat und im obersten Horizont 3 von 958 kg/Monat auf 252 kg/Monat zurückgegangen ist. Die deutlich geringere Abnahme im mittleren Bereich ist auf die Umlagerung von Diesel aus der oberen, hoch belasteten, Zone zurückzuführen.

4. Innovationen des Belüftungskonzeptes

4.1 Innovationen der Belüftungstechnik

Das innovative Konzept besteht in der volumengesteuerten Luftversorgung des zu behandelnden Abfall-/Bodenkörpers. Dadurch wird die Erstellung von Massenbilanzen auf Basis von Bodenluftanalysen möglich. Die Bemessung der Belüftungstechnik ermöglicht standortspezifisch, von Beginn an Bedingungen für eine optimale biologische Umsetzung zu schaffen. Daher muss man sich im Vorfeld mit den Randbedingungen am Standort und der Art der biologischen Belastung auseinandersetzen. In der Tabelle 1

	Thema	Rotteballendeponie	Bodenschadensfall
1	Größe des Schadensherdes [m ²]	180.000	3.500
2	Belüftetes Abfall-/Bodenvolumen belastet [m ³]	600.000	65.000
3	Abstand Quelle – Grundwasserleiter [m]	0–2	ca. 50
4	Zusammensetzung des Untergrundes	eiszeitlicher Schotter	eiszeitlicher Schotter
5	Art der biologischen Belastung	Stickstoffverbindungen	Dieselmotorkraftstoff
6	Reaktionsprodukte	CO ₂ , Nitrat	CO ₂ , H ₂ O
7	Anzahl der Belüftungsbrunnen	208	7
8	Tiefe der Belüftungsbrunnen [m]	6	30
9	Anzahl der Belüftungshorizonte	1	3
10	Anzahl der biologischen in situ Reaktionsbereiche	3 „Filter“	4 „Filter“
11	Anzahl der Bodenluftsonden, Kontrolle des Sanierungsergebnisses	35	1 je Horizont
12	Analyse der Bodenluft je Horizont	CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , Temp.	O ₂ , CO ₂ , Temp., flüchtige KW, Bodenfeuchte
13	Anzahl der Technikcontainer	4	1
14	Anzahl der Kompressoren	300	40
15	Energieverbrauch [W/m ³ Abfall / Boden]	0,20	0,25

Tabelle 1: Vergleich der in situ Belüftung für die unterschiedlichen Anforderungen

Biologische in situ Sanierung von Deponien und Böden durch Belüftung

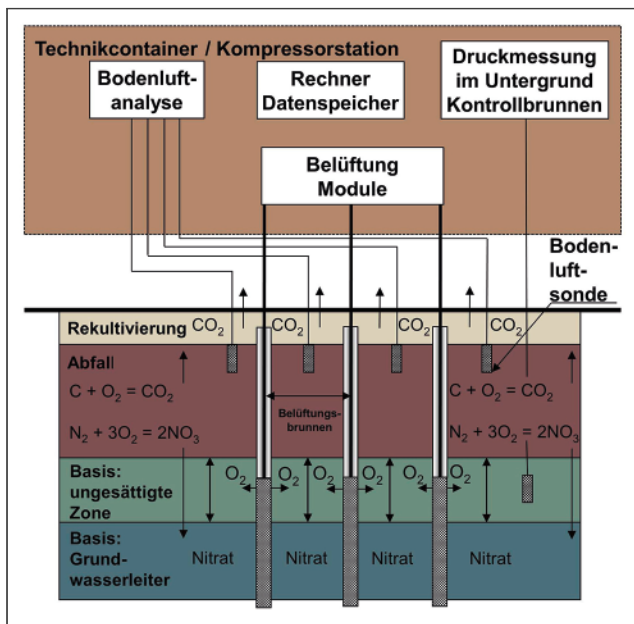


Abbildung 8: Belüftungstechnik - Technikcontainer mit Belüftungsmodulen (Kompressor, Brunnen, Druckmessung), Rechner mit Datenspeicher, Druck- und Temperaturmessung im Untergrund, Bodenluftmessung, Belüftungsbrunnen in einem bestimmten Raster, Bodenluftsonden zur Kontrolle des Sanierungsergebnisses; exemplarisch dargestellt für die Rotteballendeponie

des Betriebes Informationen zur Luftausbreitung und zur Funktionsprüfung der Belüftungsanlage.

Das Angebot von Luftsauerstoff ist vorgegeben. Damit können die Mengen der Reaktionsprodukte, abhängig von der Art der biologischen Belastung, absolut und im Verhältnis zueinander bestimmt werden. Daraus lassen sich die Lebensbedingungen für die Mikroorganismen optimieren (z.B. Nährstoffbedarf, Sauerstoffbedarf etc.).

Im Abfallkörper werden die biologisch verwertbaren organischen Verbindungen zu Kohlendioxid (CO₂), Nitrat (NO₃⁻) und Wasser (H₂O) oxidiert. Dabei wird pro Gramm Kohlenstoff ca. 2,5 bis 3,5 g Sauerstoff (O₂) verbraucht. Die Verhältnisse liegen bei den Proteinen etwas komplizierter, weil sie neben Stickstoff noch unterschiedliche Anteile an Wasserstoff enthalten, der bei der Umwandlung ebenfalls oxidiert. Im Durchschnitt werden hierfür etwa 7,5 g Sauerstoff benötigt. Im Fall des Dieselschadensfalles wird die Luft in jeden der drei Belüftungshorizonte separat eingeblasen. Auch hier werden aus den gemessenen Anteilen der genannten Gase in der Porenluft im Vergleich mit der bekannten Zusammensetzung der zugeführten Luft die Reaktionsanteile an Wasserstoff und Kohlenstoff bilanziert. Für die Oxidation von 1 kg Diesel werden etwa 3,5 kg O₂ benötigt.

findet sich eine Gegenüberstellung der Anforderungen an die in situ Sanierung durch Belüftung für die vorgestellten Standorte.

Die gesamte Technik (Rechner, der die Funktionseinheiten und Komponenten vernetzt, Kompressoren, Belüftungsmodulen für die Belüftungsbrunnen, automatisierte Porenluftanalytik, Anlagensteuerung, Erfassung und Speicherung aller Daten etc.) ist in Technikcontainern untergebracht. Die Anordnung der Brunnen, Kontrollbrunnen und Bodenluftsonden ist immer den Standortbedingungen anzupassen (Abbildung 8). Die Druck- und Temperaturmessung erfolgt dabei immer an der Zuleitung zum Belüftungsbrunnen bzw. kann eine Druckmessung zusätzlich auch im Untergrund als Referenzmessung erfolgen. Der Betrieb der Belüftungsanlage ist vollständig automatisiert.

Mit der biologischen in situ Sanierung durch Belüftung wird eine konstante Menge Luft eingeblasen. Im Bodenkörper baut sich ein Überdruck auf, der bewirkt, dass die Bodenluft durch den Porenraum des Bodenkörpers abströmt und die Luftversorgung dadurch sehr gleichmäßig wird.

Der Druck passt sich den Durchlässigkeitseigenschaften im Bereich der Einpresstelle an, sodass keine spezielle Regeltechnik erforderlich ist. Dadurch wird die vorgegebene Temperaturgrenze, um ein Optimum der Bakterienaktivität gewährleisten zu können, im Deponiekörper im Bereich von 20 bis 40° C regulierbar. Eine weitere initiale Überwachungsmöglichkeit bietet die Auswertung der Druckmessung. Sie liefert während

4.2 Innovationen der Überwachung der Umsetzungs-, Reaktionsvorgänge und biologischen Abbauprozesse

Das gewählte Konzept schafft von Beginn an die Voraussetzung zur Kontrolle der angestrebten Wirksamkeit, da die Menge der zugeführten Luft (Normkubikmeter) sowie die Druckentwicklung im Untergrund bekannt sind. Die Innovation liegt in der quantifizierbaren Bewertung der Umsetzungs-, Reaktionsvorgänge und biologischen Abbauprozesse durch die Auswertung der Bodenluftmessungen für jeden Belüftungshorizont. Dazu wird aus jedem Messabschnitt die Porenluft aus einem Bodenkörper von 1 m Durchmesser abgesaugt. Die Auswertung ist die Grundlage für die Erstellung von Massenbilanzen, getrennt für die Absolutmengen von Stickstoff (TN) und Kohlenstoff (TC) für die Rotteballendeponie bzw. TC für den Bodenschadensfall mit Dieseldieselkraftstoff. Damit erhält man mit dem vorgestellten Belüftungskonzept einen Reaktionsnachweis der Prozesse und Vorgänge.

Die Messtechnik ist voll automatisiert. Die Daten werden täglich erfasst und ausgewertet und sind über Fernzugriff aus allerorts zeitgleich ablesbar. Die Störungen im System werden ebenfalls automatisch gemeldet und können zeitnah beseitigt werden. Die Prognose der stofflichen Umsetzung und die Messungen korrelieren für die beiden Standorte sehr gut. Die kontinuierliche Überwachung ermöglicht eine Aussage zur Beendigung der Belüftung, die aus Messungen im Grundwasserleiter während des Belüftungsbetriebes nicht möglich ist.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der Vorteil von Emissionsgrenzwertanalysen, gemäß dem Prinzip der Vorsorge, liegt darin, dass von Anfang an das Gefährdungspotenzial eines Standortes (mit und ohne Sanierung) in Bezug auf die Schutzgüter Boden und Grundwasser bekannt ist. Damit können die Auswirkungen auf das Umfeld durch Sanierungs-/Sicherungsmaßnahmen auf einen, für den Standort tolerierbaren, Wert begrenzt werden.

Die zuverlässige Bemessung der Maßnahmen in der Planungsphase, im Rahmen einer Variantenuntersuchung, ermöglicht die Beurteilung ihrer standortspezifischen Wirksamkeit zur Erfüllung der ökologischen Forderungen, z. B. behördlich festgelegte Sanierungszielwerte. Zudem werden Nutzungsanforderungen berücksichtigt und die Investitionskosten und Nachsorgeaufwendungen zuverlässig kalkuliert. Für die Rotteballendeponie betragen die Kosten inklusive der Betriebskosten ca. 60 % einer technischen Abdichtung.

Für die Installation der biologischen in situ Sanierung von Deponien und Böden durch Belüftung sind nur geringfügige Eingriffe und bauliche Maßnahmen erforderlich. Im Falle der Rotteballendeponie können die Oberflächen weiterhin landwirtschaftlich genutzt werden. Im Falle des Dieselschadens kann

am Industriestandort ein ungestörter Betrieb fortgesetzt werden. Die Bedingungen des Untergrundes und die sedimentologische Zusammensetzung erfordern eine unterschiedliche Anzahl und Verteilung an Belüftungshorizonten. Das ist mit dem vorgestellten Verfahren umsetzbar. Die entwickelte Mess- und Automatisierungstechnik schafft die Voraussetzung einer weltweit möglichen Kontrolle des Verfahrens über Fernzugriff. Damit kann von allerorts eine individuelle Betreuung und Beratung stattfinden.

Literatur

- [1] Finsterwalder, K. und Sager, D. (2015): Bemessung von Sicherungssystemen für Deponien und Altdeponien – Ökologische und ökonomische Potentiale der Emissionsgrenzwertanalyse. Müll und Abfall 5, S. 272–277.
- [2] Finsterwalder, K. und Sager, D. (2014): Prinzip Vorsorge zur Beendigung der Nachsorge – Erläutert anhand von Fallbeispielen. 6. Praxistagung Deponie 2014, Hannover, wasteconsult, 10.–11.12.2014.
- [3] Finsterwalder, K. (2010): Bemessung von Sicherungssystemen von Deponien auf Basis von Langzeitemissionsprognosen, Teil 1 Grundlagen. DepoTech 2010, Leoben, 3.11.–5.11.2010.
- [4] Finsterwalder, K. (2014): Belüftung der Deponie Pill – Wirkung auf die Grundwasserbelastung. DepoTech 2014, Leoben, 4.11.–7.11.2014.
- [5] Finsterwalder, K. und Sager, D. (2014): In-situ Stabilisierung der Deponie Pill. LfU-Fachtagung „Deponieseminar 2014 – Aktuelles zu Recht und Vollzug“ am 24.09.2014, Augsburg.
- [6] H. Kraiger & H. Zehentner (2012): Erfolgreiche In-Situ-Sanierung eines Dieselschadens durch Bodenbelüftung. Tagungsband zur 11. DepoTech-Konferenz, Leoben, 6.–9. November 2012, S. 493–496.

Anschrift der Autoren:

Dr. Klemens Finsterwalder
Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co. KG
Mailing Weg 5
D-83233 Bernau a. Chiemsee/ Hittenkirchen
Tel.: +49 (0)8051 /96 59 10-10
E-Mail: k.finsterwalder@fitec.com
Internet: www.fitec.com

Dr. Daniela Sager
Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co. KG
Mailing Weg 5
D-83233 Bernau a. Chiemsee/ Hittenkirchen
Tel.: +49 (0)8051 /96 59 10-22
E-Mail: d.sager@fitec.com
Internet: www.fitec.com