

**UNIVERSITÄT STUTTGART**

**Pilotprojekt TANIA  
zur Verkürzung  
der Nachsorgezeit durch Intervallbelüftung  
am BA IV der KMD Dorfweiher**

im Auftrag des LK Konstanz

**Kurzzusammenfassung des Abschlussberichts**

**Dezember 2015**

**Projektleitung**

**Prof. Dr.-Ing. M. Kranert, Universität Stuttgart**

Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft

Bericht erstellt von

K. Lhotzky, Ingenieurgesellschaft Lhotzky und Partner, Braunschweig

Dr.-Ing. M. Reiser, Dr.-Ing. M. Kieninger, D. Laux, M. Rapf, Universität Stuttgart



## **Akronym „TANIA“:**

**T**otale **A**erobisierung zur **N**achsorgeverkürzung durch extensive **I**ntervallbelüftung von **A**bfalldeponien

Der vorliegende Abschlussbericht zum „Pilotprojekt TANIA zur Verkürzung der Nachsorgezeit durch Intervallbelüftung am BA IV der KMD Dorfweiher“ stellt den laut Vertrag bzw. gemäß der „Beschreibung des Forschungsprojekts TANIA“ nach Ablauf der Monitoringphase zu erstellenden Bericht dar.

Das Forschungsprojekt wird gefördert vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

## Kurzzusammenfassung

In Deutschland wurden in den letzten zwölf Jahren etwa ein Drittel der Hausmülldeponien in die Stilllegungsphase überführt und sollen in absehbarer Zeit aus der Nachsorge entlassen werden. Wissenschaftliche Berechnungen und Voraussagen der Schadstoffemissionen zu abgelagerten Abfällen zeigen, dass Hausmülldeponien noch lange Zeit, nachdem sie stillgelegt wurden, beaufsichtigt werden müssen. Aufgrund der im Deponiekörper ablaufenden biologischen Ab- und Umbauprozesse treten über längere Zeiträume Emissionen über das Sickerwasser und Deponiegas aus der Deponie aus. Die Dauer der Nachsorgephase wird allerdings unter anaeroben Milieubedingungen in der Deponie und nach Aufbringung einer Oberflächenabdichtung nicht verkürzt, sondern verlängert.

Auf der Deponie Dorfweiher wurde ein neues Verfahren zur Aerobisierung angewandt, um die Nachsorgezeit zu verkürzen. Dabei wurden bisher bekannte Methoden zur Behandlung von Deponien verknüpft und weiterentwickelt. Dieses eingesetzte Verfahren wird mit dem Akronym ‚EISBER‘ (Extensive Intervallbelüftung mit Sickerwasserrückführung und Biologischer Emissions-Reduzierung) abgekürzt. Ein Abschnitt der Deponie Dorfweiher wurde von 2010 bis 2012 aktiv in Intervallen mit unterschiedlichen Belüftungsdrücken über insgesamt 80 Belüftungslanzen belüftet, die in einem 10 m Raster angeordnet waren. Ein passiv beaufschlagtes Biofilter, das flächig auf dem gesamten Versuchsabschnitt aufgebracht war, behandelte die dabei entstehende Abluft. Während der sich anschließenden, zwei Jahre dauernden Monitoringphase wurden die Auswirkungen der Aerobisierung auf den Deponiekörper und die Abfallzusammensetzung untersucht und ausgewertet.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die organische Substanz beschleunigt abgebaut werden konnte. Mit der Belüftung des Deponieabschnitts verringerte sich dort die Atmungsaktivität ( $AT_4$ ) im Abfall von 3,7 auf 2,0 mg/g und die Gasbildungsrate ( $GB_{21}$ ) von 11,1 auf 4,2 l/kg. Dies zeigte sich auch durch die geringen Deponiegasemissionen nach der Belüftungsphase, da die Methanemissionen von  $16 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ha})$  vor der Belüf-

tungsphase auf  $3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ha})$  zurückgingen. Im Biofilter wurde das Methan weiter abgebaut. Die organischen Kohlenstoffemissionen unterschritten während und nach der Belüftungsphase den TA-Luft-Grenzwert von  $0,5 \text{ kg C}_{\text{org}}/\text{h}$  (entspricht  $50 \text{ mg/m}$ ).

Die Auswertungen ergaben, dass das eingesetzte Bioflächenfilter, das erstmals bei einer Deponiebelüftung zur Abluftbehandlung angewandt wurde, im Durchschnitt einen Methanabbau von  $50 \%$  erreichte. Da das Methan auf dem Weg vom Deponiekörper zur Schotterschicht des Biofilters bereits in der obersten Abfallschicht um  $90 \%$  reduziert wurde, erreichten nach der Belüftungsphase nur noch  $5 \%$  Methan die Atmosphäre. Setzungen der Deponieoberfläche konnten weitgehend vorweg genommen werden. Durch die Belüftung erhöhte sich die Konzentration des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) und des biochemischen Sauerstoffbedarfs ( $\text{BSB}_5$ ). Die Fracht des CSB stieg um den Faktor 6 an. Nach Belüftungsende verringerte sich die CSB-Fracht, die CSB-Konzentration blieb jedoch weiterhin relativ hoch.

Etwa die Hälfte des vorhanden organischen Kohlenstoffs baute sich während der Belüftungsphase ab. Die Klimabilanz ergab, dass sich das Belüftungsverfahren als Maßnahme zum Klimaschutz eignet. Bei der Bilanzierung des Wasserhaushaltes der Deponie konnte festgestellt werden, dass durch die Belüftung dem Deponiekörper mehr Wasser entzogen wurde als diesem zufluss.

Als entscheidender Parameter bei der Bestimmung der Nachsorgezeit für den Abschnitt stellte sich der CSB im Sickerwasser heraus. Allein unter der Betrachtung des Kriteriums Deponiegasemissionen wäre bereits direkt nach der Belüftungsphase eine Entlassung aus der Nachsorge denkbar. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Belüftungsmaßnahme erfolgreich verlief und die Nachsorgezeit des belüfteten Teils der Deponie Dorfweiher bedeutend verkürzt werden konnte.

Ziel heutiger Maßnahmen an Deponien sollte sein, die Abfälle, die von der Gesellschaft abgelagert werden, so zu behandeln, dass diese in einer überschaubaren Zeit nicht mehr das Wohl der Allgemeinheit beeinträchtigen. Die Möglichkeiten dafür sind vorhanden. Die Lasten und Kosten, die mit der Ablagerung dieser Abfälle einhergehen, werden damit nicht auf zukünftige Generationen verschoben.

### 6 Diskussion

#### 6.1 Neue wissenschaftliche Erkenntnisse

Die Ergebnisse der Messungen, Bewertungen und Bilanzierungen ergeben, dass mit dem auf der Deponie Dorfweiher erstmals eingesetzten EISBER-Verfahren die Nachsorgezeit bedeutend verkürzt werden konnte. Es wurde nachgewiesen, dass sich mit Hilfe dieses Verfahrens die organische Substanz im Abfall beschleunigt abbaut. Durch die erfolgte Aerobisierung des Deponiekörpers konnten die Atmungsaktivität ( $AT_4$ ) von 3,7 auf 2,0 mg/g sowie die Gasbildungsrate ( $GB_{21}$ ) von 11,1 auf 4,2 l/kg im Abfall gesenkt werden. Mit geringen Modifikationen kann das EISBER-Verfahren auch auf weitere Deponien übertragen und dort eingesetzt werden.

Das erstmals bei einer aktiven Deponiebelüftung zur Abluftbehandlung eingesetzte passiv beaufschlagte Bioflächenfilter, bestehend aus Schotter, Grünabfall und Heidekraut, reinigte in hinreichendem Maße die Abluft aus dem Deponiekörper. Durch die Aerobisierung wurde der Methangehalt im Deponiekörper von über 50 % auf unter 10 % gesenkt. Das aus dem Deponiekörper emittierte Methan konnte durch die Methanoxidation in der obersten Abfallschicht und im Biofilter um 95 % abgebaut werden. Daher empfiehlt sich der Aufbau des eingesetzten Biofilters für weitere Vorhaben. Bei zukünftigen Belüftungsprojekten sollte deshalb grundsätzlich überlegt werden, ob die bislang häufig verwendete aktive Abluftabsaugung mit anschließender Deponiegasbehandlung durch ein Flächenbiofilter ersetzt werden kann. Ein weiterer Vorteil dabei wäre, dass die für eine aktive Absaugung erforderlichen Maßnahmen zum Explosionsschutz entfallen könnten.

Eine weitere Erkenntnis der vorliegenden Untersuchungen war, dass es sinnvoll ist, Methanemissionen aus dem Flächenbiofilter zusätzlich mit der Methode der Open-Path-Laserabsorptionsspektrometrie zu messen. Dadurch ist es möglich, die mit unterschiedlichen Methoden gemessenen Methanemissionen zu vergleichen und damit die Ergebnisse abzusichern. Zusätzlich können im Gegensatz zur FID-Messung reale

Verhältnisse wie Windrichtung und Windstärke berücksichtigt, diese Technik als Online-Überwachung der Belüftungszustände eingesetzt und die Methanfracht berechnet werden.

Im Verlauf der Belüftungs- und Monitoringphase bestätigte sich die Eignung des angewandten hydrostatischen Liniensetzungsmesssystems für die Ermittlung der Setzungen. So konnten auch kleinräumige Setzungen gemessen und in den Zusammenhang zu Temperatur- und Gasentwicklung gestellt werden. Daher kann empfohlen werden, dieses Setzungsmesssystem bei nachfolgenden Deponiebelüftungsmaßnahmen zu verwenden. Als weiteres Ergebnis der Setzungsmessungen kann festgehalten werden, dass die Setzungen durch die Belüftung vorweg genommen wurden.

Die Messergebnisse und deren Auswertung weisen auf interessante Entwicklungen und Zusammenhänge hin. Bereits vor der Belüftungsphase wurden in der obersten Deponieschicht relevante Temperaturerhöhungen festgestellt. Dies kann damit begründet werden, dass dieser Deponiebereich durch eine vom biologisch aktiven Biofiltermaterial verursachte konvektive Luftströmung passiv belüftet wurde. Ebenso beeinflusste diesen obersten Bereich das vor Beginn der Belüftung durch Selbsterhitzung erwärmte Biofilter. Nachdem die Belüftungsphase startete, stiegen die Temperaturen in der obersten Schicht weiter an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dieser Bereich von Beginn an mit ausreichend Sauerstoff versorgt wurde und der aerobe organische Abbau dort zuerst stattfand. Im Laufe der Belüftungsphase wurden zunehmend die unteren Schichten besser mit Sauerstoff versorgt. Der aktivste aerobe Abbaubereich verlagerte sich in Richtung Deponiebasisabdichtung, so dass sich ebenfalls die wärmste Schicht in die unteren Deponieschichten verlagerte.

Höhere Temperaturen in der Deponie bedeuten in der Regel schneller ablaufende biologische Abbauprozesse. Über den Luft- und Wasserpfad wurde Organik ausgetragen, was während der Belüftungsphase zu größeren Setzungen führte. Die Beziehung zwischen Temperatur und Setzung wurde durch die Messergebnisse bestätigt, obwohl von einem tragenden Gerüst aus grobem und nicht leicht abbaubarem Abfall ausgegangen wurde.

Die Bewertung des EISBER-Verfahrens führt zum Ergebnis, dass es sinnvoll ist, die Deponie mit unterschiedlichen Belüftungsdrücken zu belüften und die Dauer der Belüftungsintervalle entsprechend den Bedingungen in der Deponie anzupassen. Dies führt – wie in Kap. 4 dargestellt – zu einem beschleunigten Abbauprozess. Aufgrund der differenzierten Belüftung in unterschiedlichen Tiefen konnte die Deponie mit ausreichend Sauerstoff versorgt, der eingebrachte Sauerstoff optimal genutzt und gleichzeitig der Energieeinsatz für das Belüftungssystem auf das Notwendigste reduziert werden.

Bei der Berechnung der notwendigen Belüftungsmenge für den Deponiekörper sollte berücksichtigt werden, dass infolge von konvektiven Luftströmungen zumindest die oberen Zonen des Deponiekörpers passiv belüftet werden können. Eine entsprechend geometrische Form des Deponiekörpers oder die Lage der Deponie zur Hauptwindrichtung können diese beeinflussen. Eine hohe konvektive Luftströmung kann zur Folge haben, dass eine geringere Belüftungsmenge in den Deponiekörper eingebracht werden muss.

Die Belüftung von Abfall bewirkt eine höhere Luft- sowie Wasserdurchlässigkeit. Das kann damit begründet werden, dass die mit hohem Druck eingebrachte Belüftungsluft neue Wegsamkeiten im Deponiekörper entstehen und somit sich auch die wassergesättigte Zone reduzieren lässt.

Belüftungsaktivitäten und dadurch verursachte höhere Temperaturen entziehen dem Deponiekörper insbesondere durch Evapotranspiration zusätzlich Wasser. Sind wassergesättigte Zonen in der Deponie vorhanden, können diese durch mit Druck eingebrachte Luft reduziert werden.

Bei abgelagertem Abfall mit geringen Wassergehalten sollte überlegt werden, ob zur Befeuchtung des Abfalls gesammeltes Sickerwasser rückgeführt werden kann. Dadurch ließen sich Sickerwasserbehandlungskosten einsparen. Bei dem untersuchten Deponiebereich war eine Sickerwasserrückführung nicht erforderlich, da der Wassergehalt im Abfall für einen organischen Abbau während der Belüftungsphase ausreichte.

Der erwartete Rückgang der organischen Belastung des Sickerwassers, vor allem bei den Parametern CSB sowie Ammonium, konnte nicht festgestellt werden. Die Messergebnisse weisen darauf hin, dass durch die Belüftung eingestautes Porenwasser gelöst wurde, welches organisch hoch belastet war und zu dieser größeren organischen Fracht und Konzentration im Sickerwasser führte. Diese Annahme wird durch den Rückgang der organischen Belastung im Sickerwasser, nach Ende der Belüftungszeit, bestätigt.

Eine durch die Aerobisierung des Deponiekörpers verursachte Mobilisierung von Schwermetallen im Sickerwasser, wie sie in der Literatur vermutet wurde, hat sich in der Untersuchungsreihe nicht bestätigt.

Mit den gesammelten Messdaten war es möglich, Kohlenstoff, klimarelevante Gase sowie Wasser zu bilanzieren. Die Kohlenstoffbilanz ergab, dass infolge der Belüftung etwa die Hälfte des organischen Kohlenstoffs im Abfall abgebaut werden konnte. Die bilanzierten klimarelevanten Gase zeigten eine Verringerung dieser Gase um 75 %, was auf die Aerobisierung zurückzuführen ist. Die Wasserbilanz hatte zum Ergebnis, dass sich der Wasserabfluss durch die Belüftung erhöhte und somit im Mittel die Abflussrate über der Zuflussrate lag.

## **6.2 Schlussfolgerungen für den Deponieabschnitt BA IV**

### **6.2.1 Aufbau der Oberflächenabdichtung**

Ehemalige Hausmülldeponien sind wie Deponien der Klasse DK II zu betrachten (das dafür notwendige Oberflächenabdichtungssystem ergibt sich nach Anhang 1 Tabelle 2 DepV). Demgemäß ist ein Abdichtungssystem grundsätzlich mit zwei Abdichtungskomponenten vorzusehen. Allerdings bestehen Alternativen, um eine Abdichtungskomponente zu ersetzen, wenn folgende Voraussetzung erfüllt ist:

Es müssen Maßnahmen nach § 25 Abs. 4 DepV zur Beschleunigung biologischer Abbauprozesse und zur Verbesserung des Langzeitverhaltens nachweislich erfolgreich durchgeführt worden sein. In einem solchen Fall kann gemäß Anhang 1 Tabelle 2 Fußnote 6 DepV anstelle der zweiten Abdichtungskomponente und der Rekultivierungsschicht eine als Wasserhaushaltsschicht nach Nummer 2.3.1.1 DepV bemessene Rekultivierungsschicht eingebaut werden. Als weitere Alternative kann anstelle der zwei Abdichtungskomponenten eine Konvektionssperre in Verbindung mit einem elektronischen Kontrollsystem eingebaut werden.

Maßnahmen zur Beschleunigung der Abbauprozesse der organischen Anteile im Deponiekörper und zur Verbesserung des Langzeitverhaltens wurden im Forschungsvorhaben auf dem BA IV nachweislich erfolgreich durchgeführt. Damit sind die nach Anhang 1 Tabelle 2 Fußnote 6 i. V. m. § 25 Abs. 4 DepV geforderten Voraussetzungen erfüllt und eine alternative Oberflächenabdichtung kann in Betracht gezogen werden. In Anhang 4 dieser Arbeit ist ein Varianten- und Kostenvergleich geeigneter Oberflächenabdichtungssysteme aufgeführt, die bei nachweislich erfolgreich belüfteten Deponien grundsätzlich möglich sind.

Die angestrebte Folgenutzung für die Deponie Dorfweiher ist Wald. Da dies ein entsprechendes Wurzelwachstum bedeuten würde, sollte die Rekultivierungsschicht mindestens 2 m mächtig sein. Die Gasdrän- und Ausgleichsschicht kann bei belüfteten Deponien geringer ausfallen als auf Deponien mit unvorbehandeltem Hausmüll, da weniger Gasemissionen und Setzungen zu erwarten sind.

Die Wasserbilanz in 5.3.3 ergab, dass ohne Belüftung der Wasserzufluss größer ist als der Wasserabfluss. Dies führt zu einem höheren Sickerwassereinstau. Um dies zu verhindern, sollte die Oberflächenabdichtung zeitnah aufgebracht werden.

### **6.2.2 Entlassung aus der Nachsorge**

Nach § 11 Abs. 2 DepV kann die Deponie auf Antrag des Deponiebetreibers durch die zuständige Behörde aus der Nachsorgephase entlassen werden, wenn zukünftig keine

Beeinträchtigungen des Wohles der Allgemeinheit zu erwarten sind. Dabei sind die Kriterien nach Anhang 5 Nr. 10 DepV einzuhalten, die für die Feststellung des Abschlusses der Nachsorgephase wie folgt lauten und für den BA IV nachfolgend geprüft wurden:

1. Umsetzungs- oder Reaktionsvorgänge sowie biologische Abbauprozesse sind weitgehend abgeklungen.

Dieser Nachweis wurde erbracht, da die Gasproduktion im Deponiekörper durch die Belüftung stark reduziert werden konnte und auch die Setzungen der Deponieoberfläche nach der Belüftungsphase abklagen. Ein weiteres Indiz dafür war auch die zurückgehende Temperatur in der Deponie.

2. Eine Gasbildung findet nicht statt oder ist so weit zum Erliegen gekommen, dass keine aktive Entgasung erforderlich ist, austretende Restgase ausreichend oxidiert werden und schädliche Einwirkungen auf die Umgebung durch Gasmigration ausgeschlossen werden können. Eine ausreichende Methanoxidation des Restgases ist nachzuweisen.

Die Methanfracht aus dem Deponieabschnitt nach Belüftungsende lag deutlich unterhalb des Wertes von  $0,5 \text{ l CH}_4/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , welcher als Grenzwert für die Entlassung aus der Nachsorge in der Literatur [HEYER et al. (2010)] genannt wird. Das Biofilter mit der Funktion einer biologischen Oxidationsschicht baute die restlichen Methanemissionen fast vollständig ab.

3. Setzungen sind so weit abgeklungen, dass setzungsbedingte Beschädigungen des Oberflächenabdichtungssystems für die Zukunft ausgeschlossen werden können. Hierzu ist die Setzungsentwicklung der letzten zehn Jahre zu bewerten.

Die Deponie setzte sich während der Belüftungsphase im ersten Jahr um 32 cm, im zweiten Jahr um 20 cm und im dritten Jahr um 18 cm. Ein Jahr nach Belüftungsende ergaben sich Setzungen um weitere 8 cm. In der Nachfolgezeit ist aufgrund abklingender biologischer Aktivität damit zu rechnen, dass das Ausmaß der Setzungen weiter

zurückgehen wird. Für das Prüfkriterium Setzungen wird angenommen, dass fünf Jahre nach Belüftungsende eine Entlassung aus der Nachsorge erreicht werden kann.

4. Das Oberflächenabdichtungssystem ist in einem funktionstüchtigen und stabilen Zustand, der durch die derzeitige und geplante Nutzung nicht beeinträchtigt werden kann; es ist sicherzustellen, dass dies auch bei Nutzungsänderungen gewährleistet ist.

Wenn eine geeignete, wie auch in Anhang 4 beschriebene Oberflächenabdichtung errichtet wurde, kann der Deponieabschnitt nach diesem Kriterium aus der Nachsorge entlassen werden.

5. Die Deponie ist insgesamt dauerhaft standsicher.

Zur Standsicherheit des Deponieabschnitts sind gegebenenfalls Baugrunduntersuchungen und Berechnungen anzustellen.

6. Die Unterhaltung baulicher und technischer Einrichtungen ist nicht mehr erforderlich; ein Rückbau ist gegebenenfalls erfolgt.

Die Einrichtungen für die Gasbehandlung sind wegen des Bioflächenfilters nicht erforderlich. Anders dagegen sieht es bei der Sickerwasserfassung aus. Solange das Sickerwasser nicht unbehandelt in ein Gewässer eingeleitet werden darf, muss dieses gefasst und behandelt werden.

7. Das in ein oberirdisches Gewässer eingeleitete Sickerwasser hält ohne Behandlung die Konzentrationswerte des Anhangs 51 Abschnitt C Absatz 1 und Abschnitt D Absatz 1 der Abwasserverordnung ein.

Die Anforderungen nach Anhang 51 Abschnitt C Absatz 1 AbwV wurden vom Sickerwasser des BA IV für die Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> auch ein Jahr nach Belüftungsende überschritten. Die weiteren Anforderungen an Stickstoff (gesamt), Phosphor (gesamt) und Nitrit werden dagegen eingehalten. Die Anforderungen an das Abwasser

vor Vermischung (Abschnitt D) wurden vom Eluat des Abfalls eingehalten (siehe Tabelle 4.10), im Sickerwasser des BA IV lagen die Parameter Arsen und Chrom während der Belüftungsphase oberhalb des Grenzwerts. Bei Belüftungsende hielten diese beiden Parameter diesen Grenzwert knapp ein. Die Eluatuntersuchungen des Abfalls ergaben jedoch eine geringe Arsen- und Chromkonzentration. Deshalb ist damit zu rechnen, dass die in Abschnitt D formulierten Anforderungen eingehalten werden, wenn das Sickerwasser auch die Anforderungen für die Parameter CSB und BSB<sub>5</sub> nach Abschnitt C einhält.

Die beiden entscheidenden Parameter für dieses Prüfkriterium sind demnach CSB und BSB<sub>5</sub>. BILGILI et al. (2008) stellten bei Laborversuchen mit belüftetem Abfall einen Anstieg des CSB im Sickerwasser von anfänglich 38.000 mg/l auf 98.000 mg/l nach 85 Tagen fest. Erklärt wird diese Erhöhung mit dem Umbau der organischen Bestandteile im Sickerwasser zu organischen Säuren. Nachdem 600 Tage belüftet wurde, konnte ein schneller Rückgang des CSB auf 1.800 mg/l ermittelt werden. Infolge der Belüftung des Abfalls verringerte sich der CSB um 98 %.

Die in Abbildung 6.1 dargestellte CSB-Konzentration im Sickerwasser zeigt nach Belüftungsende eine fallende Tendenz. Langfristig gesehen ist jedoch die Konzentration im Abfalleluat ausschlaggebend für die CSB-Konzentration im Sickerwasser. Über die beiden Ergebnisse der CSB-Untersuchung des Abfalleluats vor und nach der Belüftung kann eine exponentielle Trendlinie gelegt werden, wie Abbildung 6.1 zeigt. Unter dem Ansatz, dass diese Trendlinie extrapoliert werden kann, würde dies bedeuten, dass bis ca. 2025 das Abfalleluat die Anforderung nach AbwV für die Einleitung in ein Gewässer beim CSB unterschreitet.

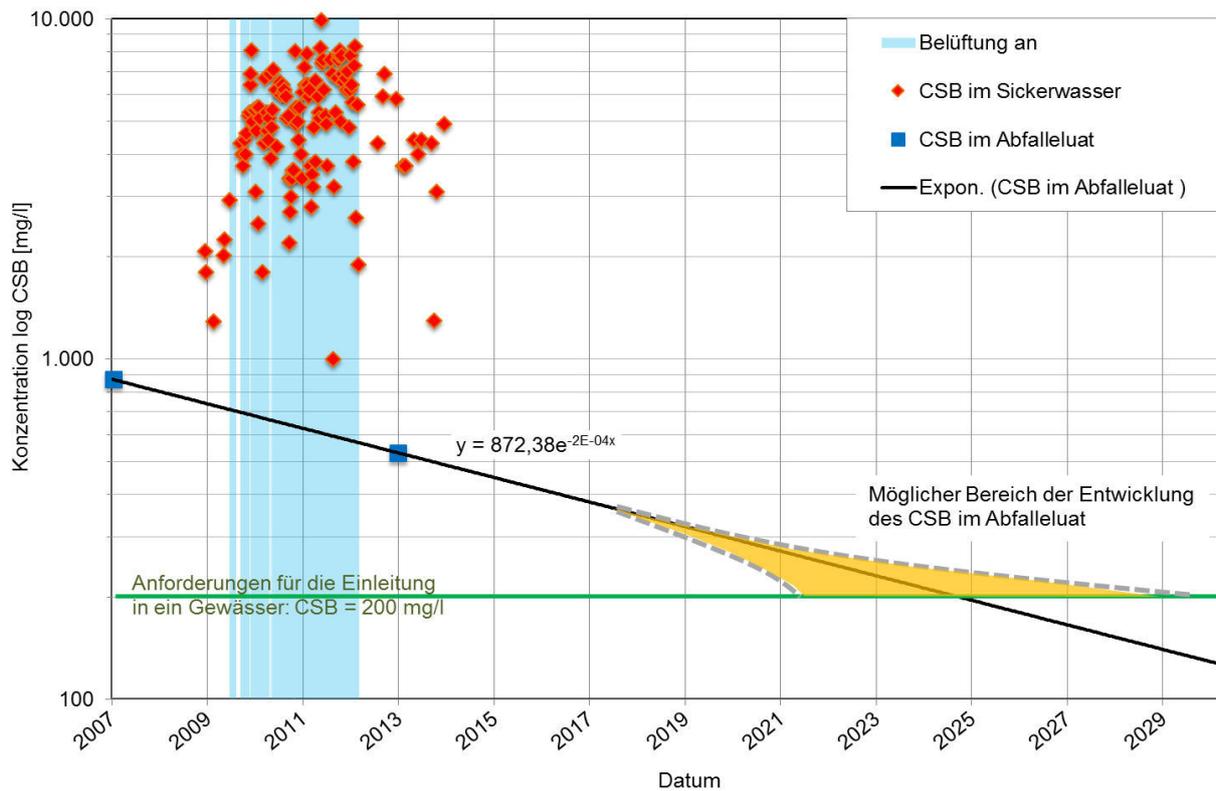


Abbildung 6.1: Mögliche Entwicklung des CSB im Abfalleuat in der Nachsorgezeit

Unabhängig hiervon ist es erforderlich, dass das im BA IV eingestaute und organisch hochbelastete Sickerwasser abgeleitet wird.

Ohne Belüftungs- oder Bewässerungsmaßnahme ist bei Hausmülldeponien nach STEGMANN et al. (2006) mit einem Zeitraum zwischen 110 und 160 Jahren zu rechnen, bis die Anforderungen nach Anhang 51 AbwV eingehalten werden und die Deponie aus der Nachsorge entlassen werden kann.

Der BSB<sub>5</sub> wird nicht weiter betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass der Grenzwert für die Einleitung in ein Gewässer (20 mg/l) im Vergleich zum CSB vorher erreicht werden kann. Bereits während der Belüftungsphase hielt der BSB<sub>5</sub> diesen Grenzwert teilweise schon ein.

8. Das Sickerwasser, das in den Untergrund versickert, verursacht keine Überschreitung der Auslöseschwellen in den nach § 12 Absatz 1 festgelegten Grundwasser-Messstellen, und eine Überschreitung ist auch für die Zukunft nicht zu besorgen.

Zur Emissionsüberwachung des Grundwassers wurden von der Überwachungsbehörde Auslöseschwellen für die Parameter Leitfähigkeit, Chlorid, AOX und Bor festgelegt. Das Grundwasser wird halbjährlich an mehreren Stellen im Bereich der Deponie sowohl aus dem tieferen als auch aus dem oberen Grundwasserleiter entnommen und analysiert [KOBBERSTEIN (2012)].

Tabelle 6.1: Vergleich der Auslöseschwellen des BA IV nach Belüftung

<b>Parameter</b>	<b>Auslöse-schwellen</b>	<b>Sickerwasser nach Belüftung</b>	<b>Abfalleluat nach Belüftung</b>
Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	1.500	12.900	600
Bor [mg/l]	0,5	2,6	n. a.
Chlorid [mg/l]	80	1.300	49
AOX [mg/l]	0,07	0,16	0,04

Im Abfalleluat unterschritten die Parameter Leitfähigkeit, Chlorid und AOX die Grenzwerte für die Auslöseschwellen. Aus Tabelle 6.1 lässt sich ebenfalls ablesen, dass im Sickerwasser jeweils höhere Konzentrationen vorliegen als im Abfalleluat. Daraus kann auch für Bor geschlossen werden, dass auch das Abfalleluat den Grenzwert für die Auslöseschwelle auf lange Sicht unterschreiten wird. Um dieses Kriterium sicher einhalten zu können, wird von der gleichen Nachsorgezeit wie beim CSB ausgegangen.

9. Wurden auf der Deponie asbesthaltige Abfälle oder Abfälle, die andere gefährliche Mineralfasern enthalten, abgelagert, müssen geeignete Maßnahmen getroffen worden sein, um zu vermeiden, dass Menschen in Kontakt mit diesem Abfall geraten können.

Asbesthaltige Materialien wurden auf dem Deponieabschnitt BA IV nicht abgelagert, so dass dahingehend keine Maßnahmen erforderlich sind.

Nach der Prüfung der Kriterien nach Anhang 5 Nr. 10 DepV ergibt sich, dass nach derzeitigem Stand und unter dem Ansatz der Extrapolation der CSB-Trendlinie (siehe Nr. 7) der Deponieabschnitt im Zeitraum frühestens 2025 oder 22 Jahre nach Ablagerungsende aus der Nachsorge entlassen werden kann.

### **6.2.3 Verbesserung der Randbedingungen**

Aus den Temperaturentwicklungen der Deponie lässt sich schließen, dass auch nach Belüftungsende ein Potenzial in den untersten Schichten zum beschleunigten organischen Abbau vorhanden war, wenn auch in viel geringerem Maße. Das Vorhaben war jedoch von vornherein so konzipiert, die Deponie drei Jahre zu belüften und in den anschließenden zwei Jahren die Auswirkungen der Belüftung auszuwerten.

Die Nachsorgephase des BA IV kann weiter verkürzt werden, indem der vorhandene Sickerwassereinstau beseitigt wird, um die Sickerwasserfrachten und Sickerwasserkonzentrationen zu reduzieren. Dies könnte durch den Bau von Sickerwasserschächten im BA IV erfolgen, aus denen dann das eingestaute Sickerwasser abgepumpt werden kann. Wie die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen des belüfteten Abfalls zeigten, ist längerfristig mit einer um etwa 95 % niedrigeren organischen Belastung des Sickerwassers zu rechnen.

## **6.3 Übertragbarkeit des EISBER-Verfahrens**

### **6.3.1 Belüftung von ehemaligen Hausmülldeponien**

Der belüftete Abschnitt verfügte im Vergleich zu anderen Hausmülldeponien über einen relativ hohen Anteil an Organik. Auch durch den vorgefundenen Sickerwasser-

einstau und die dadurch verursachte geringe Luftdurchlässigkeit waren die Bedingungen zu Beginn der Belüftung nicht optimal. Der Deponiezustand des BA IV entsprach dadurch einem Worst-Case-Szenario. Dennoch konnte mit dem EISBER-Verfahren der Abschnitt BA IV erfolgreich belüftet werden. Da der Zustand anderer zur Belüftung vorgesehener Deponien mindestens gleich gut oder im Regelfall sogar besser für eine Belüftung geeignet ist, lässt sich das EISBER-Verfahren auf andere Deponien übertragen. Aus der Bewertung der Messergebnisse lässt sich folgern, dass die nachstehenden Punkte dabei berücksichtigt werden sollten:

Das beim BA IV gewählte 10 m Raster für die Belüftungsanlagen bewährte sich, um den Abfall ausreichend zu belüften. Zur Belüftung des Abfalls in Tiefen bis zu 4 m unter der Deponieoberkante reicht im Regelfall ein Belüftungsdruck von 0,4 bar aus, in tieferen Bereichen bis 10 m sollte mit einem Druck von 1,0 bar gearbeitet werden. Bei Zonen mit Sickerwassereinstau sind Drücke von 4,0 bar sinnvoll.

Aus den Temperaturentwicklungen vor allem zu Beginn der Belüftungsphase kann die Erkenntnis gewonnen werden, dass eine genauere Überwachung der Temperaturen in der Deponie sinnvoll ist. Deshalb ist auch für die Temperaturmessanlagen ein 10 m Raster zu empfehlen. Dadurch können größere Bereiche der Deponie überwacht werden, so dass die Wahrscheinlichkeit einer Selbstentzündung des Abfalls weiter reduziert wird. Um die vertikalen Temperaturschichtungen zu erkennen, sollte im Abstand von 2 m ein Temperatursensor an jeder Temperaturmesslanze installiert werden. Die Abbauprozesse im Deponiekörper lassen sich durch eine genauere Temperaturüberwachung auch besser steuern.

Bei der Installation der Gasmessanlagen ist dagegen ein Raster von 20 m ausreichend. Die durchschnittlichen Gaskonzentrationen änderten sich langsamer als die Temperaturen. Die Messergebnisse ergeben, dass ein Belüftungsintervall die Gaskonzentrationen kurz beeinflusst. Allerdings konnte nur langfristig der Sauerstoffgehalt angehoben werden. Deshalb ist dieses größere Raster für die Steuerung des Belüftungssystems hinreichend. Längere Gasmessungen an einzelnen Anlagen über mehrere Stunden oder Tage können weiterführende Erkenntnisse liefern, um die Belüftung weiter zu verbessern.

Am Aufbau des Biofilters sollte grundsätzlich nichts verändert werden. Überlegenswert wäre jedoch, ob als Abdeckschicht das Heidekraut durch gerissenes Wurzelholz ersetzt werden kann. Auf die Begehrbarkeit muss dabei geachtet werden. Möglicherweise lassen sich hierdurch Kosten einsparen.

Ein hydrostatisches Liniensetzungsmesssystem sollte verwendet werden, um unterhalb des Biofilters die Setzungen der Deponie und insbesondere kleinräumige Veränderungen der Deponieoberfläche feststellen zu können. Im Zusammenhang mit der Temperatur- und Gasentwicklung kann die Belüftungssteuerung entsprechend angepasst werden, um den organischen Abbau in allen Bereichen optimal zu gestalten.

Zu Beginn jeglicher Maßnahmen zur Belüftung von Deponien sollte überprüft werden, ob ein Sickerwassereinstau vorhanden ist, und wenn ja, sollte dieser im Vorfeld einer Belüftung beseitigt werden. Mit einer Belüftung kann ein Deponiekörper entwässert werden. Jedoch führt dies zu höheren Belüftungskosten, da vor allem in der Anfangsphase größere Belüftungsdrücke erforderlich sind.

Belüftungsaktivitäten können dazu führen, dass im Deponiekörper eingestautes Sickerwasser abfließen kann. Da dieses Sickerwasser durch eine in der Regel lange Aufenthaltszeit hoch organisch belastet sein kann, können die CSB-Frachten aus dem belüfteten Deponiebereich während der Belüftungsphase steigen. Dies sollte beim Betrieb der Sickerwasserbehandlungsanlage berücksichtigt werden. Dadurch werden die Behandlungskosten für die Reinigung des Sickerwassers vorgezogen.

Jede Belüftungsmaßnahme sollte von einem an die örtlichen Verhältnisse angepassten Mess- und Überwachungsprogramm begleitet werden. Damit sollen der Ausgangszustand erfasst, die Emissionen gemessen sowie das Vorhaben bewertet werden können. Der Umfang der Messungen kann sich nach dem beim BA IV durchgeführten Messprogramm richten, welches in Kap. 3 beschrieben wurde. Die Häufigkeit und der Umfang der Sickerwasseranalysen können jedoch reduziert werden. Auch ist eine Wetterstation nicht zwingend erforderlich.

Das EISBER-Verfahren kann jeweils angepasst an die örtlichen Randbedingungen auch in Schwellen- und Entwicklungsländern eingesetzt werden, da dort weiterhin Siedlungsabfälle unbehandelt auf Deponien abgelagert werden. Damit ließen sich klimaschädliche Deponiegasemissionen entscheidend reduzieren sowie langfristig die Auswirkungen durch organisch belastetes Sickerwasser verringern.

### **6.3.2 Belüftung von MBA-Deponien**

Untersuchungen an MBA-Deponien ergaben, dass ein nennenswerter Anteil des abgelagerten Abfalls biologisch gut verfügbar ist, obwohl der Abfall davor mechanisch und biologisch behandelt wurde. Der biologisch gut verfügbare Anteil des Abfalls wird in den ersten Jahren der Ablagerung verhältnismäßig schnell abgebaut. Durchgeführte Untersuchungen gehen von einem Gesamtgasbildungspotenzial zwischen 30 und 40 m<sup>3</sup>N/Mg TS aus [HEYER et al. (2012)].

Mechanisch-biologisch behandelte Abfälle müssen nach Anhang 3 Nr. 2 Satz 10 DepV den Zuordnungswert für die Atmungsaktivität (AT<sub>4</sub>) von 5 mg/g oder die Gasbildungsrate (GB<sub>21</sub>) von 20 l/kg einhalten, um sie auf Deponien der Klasse II ablagern zu dürfen. Deponien für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle verfügen im Regelfall über kein aktives Gaserfassungssystem wie beispielsweise vertikale Gasbrunnen.

Durch die Belüftung des Abfalls des BA IV konnte die Atmungsaktivität (AT<sub>4</sub>) von 3,7 auf 2,0 mg/g sowie die Gasbildungsrate (GB<sub>21</sub>) von 11,1 auf 4,2 l/kg reduziert werden. Ein Teil des BA IV war wassergesättigt, so dass die Luftdurchlässigkeit vor allem im unteren Deponiebereich gering war und dadurch mit hohen Belüftungsdrücken bis 4,0 bar gearbeitet werden musste. Vor diesem Hintergrund eignet sich das EISBER-Verfahren auch für den Einsatz auf MBA-Deponien, die eine im Vergleich zu Deponien mit nicht vorbehandelten Abfällen höhere Einbaudichte aufweisen. Mit dem auf der Deponie Dorfweier angewandten Verfahren könnte die organische Aktivität der abgelagerten MBA-Abfälle weiter verringert und das restliche aus dem Deponiekörper emittierende Methan über den Bioflächenfilter oxidiert werden. Folglich ließen sich damit die klimarelevanten Emissionen von MBA-Deponien deutlich reduzieren.

Da während der Verfüllphase mit einer wesentlichen Gasproduktion zu rechnen ist [HEYER et al. (2012)], könnte überlegt werden, ob die Belüftungsanlagen parallel zum Einbau sukzessive errichtet und betrieben werden.

#### 6.4 Zielwerte für eine Entlassung aus der Nachsorge

Die Ergebnisse der Deponiebelüftungsprojekte in Kuhstedt, Mannersdorf und Dorfweiher wurden in Tabelle 5.6 gegenübergestellt. Aus diesen Erkenntnissen sowie den aus den Belüftungsprojekten Kuhstedt und Mannersdorf entwickelten Vorschlägen zur Bewertung von Belüftungsvorhaben wurden die in Tabelle 6.2 in der Spalte Dorfweiher aufgeführten Kriterien abgeleitet. Diese Kriterien können herangezogen werden, um entscheiden zu können, ob die Belüftungsmaßnahme erfolgreich verlief.

Tabelle 6.2: Kriterien zur Bewertung von Belüftungsmaßnahmen

Deponie	Kuhstedt [RITZKOWSKI (2005), HEYER et al. (2010)]	Mannersdorf [PRANTL (2007), HRAD et al. (2013)]	Dorfweiher
Atmungsaktivität (AT <sub>4</sub> )	2,5 mg O <sub>2</sub> / g TS	2 mg O <sub>2</sub> / g TS (Median)	2,5 mg O <sub>2</sub> / g TS
Gasbildungsrate (GB <sub>21</sub> )	10 l <sub>N</sub> / kg TS	2 l <sub>N</sub> / kg TS (Median)	5 l <sub>N</sub> / kg TS
Kohlenstoffaus- trag	C-Austrag <sub>Dep.-bel.</sub> ≥ 90 % des bioverfügbaren Kohlenstoffs	15 g C/kg TS (Median)	15 g C/kg TS
Deponiegaspro- duktion		CH <sub>4</sub> -Produktion ≤ 0,5 l/(m <sup>2</sup> ·h)	CH <sub>4</sub> -Produktion ≤ 0,5 l/(m <sup>2</sup> ·h)
Temperaturen		Abnehmende Ten- denz, Größenord- nung vor Belüftung.	Temperaturänderung nach 3 d Belüftung max. 10 K

Die Aerobisierung der Deponie Dorfweiher ergab, dass sich auch zwei Jahre nach Belüftungsende keine signifikante Änderung der Qualität des Sickerwassers einstellte. Da es sich demnach um einen länger andauernden Prozess handelt, eine Bewertung

jedoch aus praktischen Gründen zeitnah nach der Belüftungsmaßnahme vorgenommen werden sollte, wird für Sickerwasser kein Kriterium vorgeschlagen.

Aus den Kriterien zur Bewertung von Belüftungsmaßnahmen wurden die Vorschläge zur Entlassung einer Deponie aus der Nachsorge entwickelt. Durch eine Belüftung der Deponie kann die Gasbildung weitgehend reduziert und mögliche Methanemissionen aus dem Deponiekörper können in einer Methanoxidationsschicht auf der Deponieoberfläche verringert werden. Deshalb entsprechen die Vorschläge bei der Atmungsaktivität, der Gasbildungsrate sowie der Deponiegasproduktion den Kriterien zur Bewertung von Belüftungsmaßnahmen. Aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen am BA IV ergibt sich auch, dass die Gasemissionen nicht über die Dauer der Nachsorgezeit der Deponie entscheiden, da die Sickerwasseremissionen längere Nachsorgezeiten einfordern.

Bei den Temperaturen sollten die Größenordnungen vor der Belüftung, jedoch maximal 40 °C, eingehalten werden. Diese Temperaturbegrenzung ist erforderlich, da höhere Temperaturen auf einen fortlaufenden organischen Abbau hinweisen.

Bei der Qualität des Sickerwassers und des Abfalleluats sollten die Anforderungen nach Anhang 51 AbwV für die Direkteinleitung und Indirekteinleitung (Teile C und D) eingehalten werden können.

Um durch Setzungen verursachte, mögliche Risse im Oberflächenabdichtungssystem zu verhindern, sollten die Setzungen bei der Entlassung aus der Nachsorge möglichst gering sein. Setzungen von maximal 5 cm pro Jahr und höchstens 1 % pro Jahr werden für vertretbar gehalten. In Tabelle 6.3 sind die Vorschläge zur Entlassung aus der Nachsorge aufgeführt.

Tabelle 6.3: Vorschläge zur Entlassung aus der Nachsorge

<b>Deponie</b>	<b>Kuhstedt [RITZKOWSKI (2005), HEYER et al. (2010)]</b>	<b>Mannersdorf [PRANTL (2007), HRAD et al. (2013)]</b>	<b>Dorfweiher</b>
Atmungsaktivität (AT <sub>4</sub> )	2,5 mg O <sub>2</sub> / g TS		2,5 mg O <sub>2</sub> / g TS
Gasbildungsrate (GB <sub>21</sub> )	2,5 l <sub>N</sub> / kg TS		5,0 l <sub>N</sub> / kg TS
Deponiegasproduk- tion		CH <sub>4</sub> -Produktion ≤ 0,5 l/(m <sup>2</sup> ·h)	CH <sub>4</sub> -Produktion ≤ 0,5 l/(m <sup>2</sup> ·h)
Temperaturen		Abnehmende Ten- denz, Größenord- nung der Tempera- turen vor Belüftung	Größenordnung der Temperaturen vor Belüftung, max. 40 °C
Sickerwasserqualität		Anforderungswerte nach Anh. 51 AbwV für Direkteinleitung, ggf. ergänzt um Frachten	Anforderungswerte nach Anh. 51 AbwV für Direkteinleitung und Indirekteinlei- tung (Teile C und D)
Eluatbeschaffenheit	Zuordnungswerte für DK I gem. DepV + NH <sub>4</sub> -N, AOX 50 % der Anforde- rungen DepV Anh. 3 Nr. 2 DepV für MBA-		Anforderungswerte nach Anhang 51 AbwV für Direktein- leitung und Indirek- teinleitung (Teile C und D)
Setzungen			Maximal 5 cm/a und 1 %/a

### 7 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

#### 7.1 Zusammenfassung

In Deutschland wurden in den letzten Jahren viele Deponien in die Stilllegungsphase überführt und sollen in absehbarer Zeit aus der Nachsorge entlassen werden. Die Nachsorge endet zu dem Zeitpunkt, an dem keine nachteiligen Auswirkungen mehr von der Deponie auf die Umwelt zu erwarten sind. Wissenschaftliche Berechnungen und Voraussagen der Schadstoffemissionen zu abgelagerten Abfälle zeigen, dass Hausmülldeponien noch lange Zeit, nachdem sie stillgelegt wurden, beaufsichtigt werden müssen. Bei Deponiegas wird von einer Nachsorgezeit von über 30 Jahren und beim Sickerwasser von Zeiträumen zwischen 100 und 200 Jahren ausgegangen. Aufgrund der im Deponiekörper ablaufenden biologischen Ab- und Umbauprozesse treten über längere Zeiträume Emissionen über das Sickerwasser und Deponiegas aus der Deponie aus. Die Dauer der Nachsorgephase verlängert sich allerdings unter herkömmlichen anaeroben Milieubedingungen und bei Aufbringung einer Oberflächenabdichtung.

Zwei erprobte In-situ Behandlungsmethoden, die die Dauer und das Ausmaß der Nachsorgemaßnahmen verringern können, sind allgemein bekannt. Zum einen kann durch Bewässerung die Menge des biologisch abbaubaren Materials verringert werden. Andererseits ist es möglich, die Deponie zu belüften und gleichzeitig die Abluft zu behandeln.

Die vorliegende Arbeit war in das Vorhaben zur Verkürzung der Nachsorgezeit auf der Deponie Dorfweiher eingebettet. Das angewandte Verfahren zur Aerobisierung von Deponien entwickelte das Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) der Universität Stuttgart gemeinsam mit dem Büro Lhotzky und Partner aus Braunschweig. Dabei wurden die bisher bekannten Methoden zur Behandlung von Deponien verknüpft und weiterentwickelt. Dieses Verfahren wird mit dem Akronym ‚EISBER‘ (Extensiver Intervallbelüftung mit Sickerwasserrückführung und Biologischer Emissions-Reduzierung) abgekürzt.

Organische Bestandteile im Deponiekörper sollten mit dem EISBER-Verfahren beschleunigt um- und abgebaut werden, damit Setzungen vorweggenommen, die Qualität des Sickerwassers verbessert und schädliche Deponiegasemissionen reduziert werden können. Ziel war es, eine Entlassung aus der Nachsorge innerhalb eines Zeitraumes von 30 Jahren zu erreichen.

Ein Abschnitt der Deponie Dorfweiher wurde von 2010 bis 2012 aktiv in Intervallen mit unterschiedlichen Belüftungsdrücken über insgesamt 80 Belüftungsanlagen belüftet, die in einem 10 m Raster angeordnet waren. Ein passiv beaufschlagtes Biofilter, das flächig auf dem gesamten Versuchsabschnitt aufgebracht war, hatte die Aufgabe, die dabei entstehende Abluft zu reinigen. Während der sich anschließenden, zwei Jahre dauernden Monitoringphase wurden die Auswirkungen der Aerobisierung auf den Deponiekörper und die Abfallzusammensetzung untersucht und ausgewertet.

Als Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen, Bewertungen und Bilanzierungen lässt sich festhalten, dass die organische Substanz beschleunigt abgebaut werden konnte. Mit der Belüftung des BA IV verringerte sich die Atmungsaktivität ( $AT_4$ ) im Abfall von 3,7 auf 2,0 mg/g und die Gasbildungsrate von 11,1 auf 4,2 l/kg. Dies zeigte sich auch durch die geringen Deponiegasemissionen nach der Belüftungsphase, da die Methanemissionen von  $16 \text{ m}^3_{\text{N}}/(\text{h}\cdot\text{ha})$  vor der Belüftungsphase auf  $3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{ha})$  zurückgingen. Im Biofilter wurde das Methan weiter abgebaut. Die organischen Kohlenstoffemissionen unterschritten während und nach der Belüftungsphase den TA-Luft-Grenzwert von  $0,5 \text{ kg } C_{\text{org}}/\text{h}$  (entspricht  $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ ), so dass nur geringe organische Substanzen aus der Deponie in die Luft verlagert wurden.

Die Auswertungen ergaben, dass das erstmals bei einer Deponiebelüftung zur Abluftbehandlung eingesetzte Bioflächenfilter im Durchschnitt einen Methanabbau von 50 % erreichte. Da das Methan auf dem Weg vom Deponiekörper zur Schotterschicht des Biofilters bereits in der obersten Abfallschicht um 90 % reduziert wurde, erreichten nach der Belüftungsphase nur noch 5 % Methan die Atmosphäre. Das Bioflächenfilter reinigte in ausreichendem Maße die Abluft aus dem Deponiekörper, so dass dieser Aufbau für weitere Belüftungsvorhaben empfohlen werden kann.

Setzungen der Deponieoberfläche konnten weitgehend vorweg genommen werden, wobei sie auch ein Jahr nach Belüftungsende noch nicht völlig abgeklungen waren. Während der Belüftungsphase setzte sich die Deponie im Mittel um 7 % und somit um den Faktor 6 schneller als ohne Belüftung. Das Abfallvolumen verringerte sich um 10 %. Die vor der Belüftungsphase getroffene Annahme, dass Setzungen vorweg genommen werden können, bestätigte sich damit. Die hydrostatische Setzungsmessung bewährte sich und kann für die Anwendung bei weiteren Deponiebelüftungsmaßnahmen empfohlen werden.

Anders verhielt es sich bei der Qualität des Sickerwassers. Ursprünglich war davon ausgegangen worden, dass die organische Belastung des Sickerwassers durch den Eintrag von Sauerstoff verringert werden kann. Die Ergebnisse der Sickerwasseranalysen zeigten jedoch ein anderes Bild. Durch die Belüftung erhöhte sich nicht nur der Sickerwasservolumenstrom, sondern auch die Konzentration an CSB und BSB<sub>5</sub>. Die Fracht des CSB stieg um den Faktor 6 an. Nach Belüftungsende verringerte sich der Durchfluss wieder, die Konzentration blieb jedoch weiterhin relativ hoch. Es ist anzunehmen, dass ein Teil des Sickerwassereinstaus im Deponiekörper durch die Belüftung reduziert werden konnte. Dadurch gelangte das über längere Zeit eingestaute und organisch hoch belastete Sickerwasser in den Abfluss. Eine durch die Belüftung hervorgerufene Mobilisierung von Schwermetallen wurde nicht festgestellt.

Das Sickerwasser aus dem BA IV musste nicht, wie anfangs angenommen, zurückgeführt werden, um die Verlangsamung der biologischen Prozesse im Abfall wegen zu geringem Wassergehalt zu verhindern. Der Wassergehalt im Deponiekörper war während der Belüftungsphase für einen organischen Abbau ausreichend hoch.

Mit leichten Modifikationen, wie der Änderung des Rasters für die Temperatur- und Gasmesslanzen, lässt sich das EISBER-Verfahren auf weiteren Deponien einsetzen. Das gewählte Raster für die Belüftungsanlagen von 10 m bewährte sich bei dem Deponieabschnitt BA IV und kann für weitere Anwendungen empfohlen werden.

Anhand der Messergebnisse und Auswertungen konnten Kohlenstoff-, Klima- und Wasserbilanzen durchgeführt werden. Etwa die Hälfte des vorhandenen organischen

Kohlenstoffs baute sich während der Belüftungsphase ab. Die Klimabilanz ergab ein positives Ergebnis, so dass sich das Belüftungsverfahren als Maßnahme zum Klimaschutz eignet. Bei der Bilanzierung des Wasserhaushaltes der Deponie konnte festgestellt werden, dass durch die Belüftung dem Deponiekörper mehr Wasser entzogen wurde als diesem wieder zuzufloss. Wenn kein Sickerwassereinstau zu Beginn der Belüftungsphase vorhanden gewesen wäre, hätten Sickerwasser zurückgeführt und somit Kosten für die Sickerwasserbehandlung eingespart werden können.

Als entscheidender Parameter bei der Bestimmung der Nachsorgezeit für den Abschnitt BA IV stellte sich der CSB im Sickerwasser heraus. Bei allen anderen Kriterien wurde nach den durchgeführten Untersuchungen und einer Modellrechnung eine geringere Nachsorgezeit ermittelt. Aus diesen Erkenntnissen ergab sich, dass der BA IV frühestens 22 Jahre nach Ablagerungsende aus der Nachsorge entlassen werden kann. Ohne Belüftungsmaßnahme wäre mit einer Nachsorgezeit von über 100 Jahren zu rechnen. Allein unter der Betrachtung des Kriteriums Deponiegasemissionen wäre bereits direkt nach der Belüftungsphase eine Entlassung aus der Nachsorge denkbar.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Belüftungsmaßnahme aufgrund der Reduzierung der organischen Substanz, der erreichten verringerten Deponiegasemissionen, des gemessenen Temperaturverlaufs, der Verbesserung des Wasserhaushaltes und des Austrags von organisch belastetem Sickerwasser erfolgreich verlief. Die Nachsorgezeit des belüfteten Teils der Deponie Dorfweiher konnte bedeutend verkürzt werden.

Bei ehemaligen Hausmülldeponien sollte grundsätzlich geprüft werden, ob Maßnahmen zur Verkürzung der Nachsorgezeit durchgeführt werden können. Nachdem das Deponiegas nicht mehr energetisch genutzt werden kann, sollte in Betracht gezogen werden, die Deponie zu belüften, um so die Nachsorgezeit signifikant zu verkürzen.

### 7.2 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vor der Belüftungsphase getroffenen Annahmen zum Verhalten des Sickerwassers bestätigten sich nur zum Teil. Aus Laborversuchen ist bekannt, dass, wenn Abfall belüftet wird, die organische Belastung des Sickerwassers kurzzeitig ansteigt, jedoch danach deutlich wieder sinkt. Diese Entwicklung konnte auch zwei Jahre nach Belüftungsende im Sickerwasser des BA IV nur teilweise festgestellt werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht darin, zu untersuchen, wie sich auch langfristig die Sickerwasserqualität nach der Belüftungsphase verändert.

Während der dreijährigen Belüftungsphase wurden etwa 20 % der anfangs berechneten erforderlichen Luftmenge in den Deponiekörper eingebracht. Dabei stellte sich in der Anfangsphase als entscheidende Randbedingung das einzuhaltende Temperaturmaximum von 65 °C in der Deponie heraus. Im Abfallkörper lag jedoch ein ausreichend hoher Sauerstoffgehalt vor, um einen beschleunigten organischen Abbau zu ermöglichen. Durch Konvektion konnte ein Teil der fehlenden Belüftungsmenge ausgeglichen werden. Der Einfluss der Konvektion auf die Belüftung des Deponiekörpers sollte nicht vernachlässigt und bei zukünftigen Belüftungsmaßnahmen genauer untersucht werden.

Zum besseren Verständnis der während der Aerobisierung im Deponiekörper stattfindenden biologischen Abbau-, Umbau und Aufbauprozesse der organischen Substanz, wären ergänzende mikrobiologische Untersuchungen hilfreich. Damit könnte der Stoffumsatz und die biochemischen Aspekte besser verstanden werden.

Da die vorgestellten Messergebnisse und Auswertungen auf eine erfolgreiche Behandlung der Deponie schließen lassen und dies auch von der für die Überwachung und Genehmigung der Deponie zuständigen Behörde bestätigt wurde, ist es möglich, ein alternatives Oberflächenabdichtungssystem nach Deponieverordnung aufzubringen. Dabei sollte ein Abdichtungssystem gewählt werden, welches gewährleistet, dass das in der Deponie vorhandene Restgas durch die Abdichtung aufsteigen kann. Ebenfalls ist darauf zu achten, dass das darin enthaltene Methan in der Rekultivierungsschicht oxidiert werden kann sowie die Abdichtung ausreichend Niederschlagswasser von der

Deponie abhält. Als nächster Schritt ist zu empfehlen, auf dem BA IV ein großes Versuchsfeld mit einer alternativen Oberflächenabdichtung zu errichten, um die Eignung dieses Abdichtungssystems zu testen.

In Deutschland eignen sich 200 bis 300 von insgesamt 400 Hausmülldeponien für eine aerobe Behandlung [BMUB (2014)]. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass diese Deponien mit dem EISBER-Verfahren behandelt werden könnten, um die Nachsorgezeit dieser Deponien entscheidend zu verringern. Damit würden außerdem die Methanemissionen aus diesen Deponien gemindert und ein bedeutender Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden.

Ziel heutiger Maßnahmen an Deponien sollte sein, die Abfälle, die von der Gesellschaft abgelagert werden, so zu behandeln, dass diese in einer überschaubaren Zeit nicht mehr das Wohl der Allgemeinheit beeinträchtigen. Die Möglichkeiten sind dafür vorhanden. Die Lasten und Kosten, die mit der Ablagerung dieser Abfälle einhergehen, werden damit nicht auf zukünftige Generationen verschoben.

**Varianten- und Kostenvergleich geeigneter  
Oberflächenabdichtungssysteme gemäß  
Deponieverordnung für die Deponieklasse II**

**Kreismüldeponie Dorfweiher**

Deponiebetreiber

**Landkreis Konstanz**

Benediktinerplatz 1, 78467 Konstanz

Auftraggeber

**Universität Stuttgart**

Institut für Siedlungswasserbau,  
Wassergüte- und Abfallwirtschaft (iswa),  
Bandtäle 2, 70569 Stuttgart

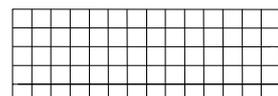
Planer

**Ingenieurgruppe RUK GmbH**

Auf dem Haigst 21, 70597 Stuttgart

im Juli 2014

Fortschreibung April 2016



**Inhaltsverzeichnis:**

1	Veranlassung	1
2	Allgemeines	1
3	Rechtliche Rahmenbedingungen	3
3.1	Deponieverordnung	4
3.2	Anforderungen an die Oberflächenabdichtung gemäß Bundeseinheitlicher Qualitätsstandards (BQS)	6
3.3	Zulassung von Geokunststoffen, Polymeren und Dichtungskontrollsystemen	7
4	Auswahl der Varianten für eine DK II Oberflächenabdichtung	8
4.1	Gleichbleibende Systemkomponenten	8
4.1.1	Gasdrän- und Ausgleichsschicht	8
4.1.2	Entwässerungsschicht	9
4.1.3	Rekultivierungsschicht	9
4.2	Darstellung ausgewählter Varianten für die Deponie Dorfweiher	11
4.2.1	Klassische Varianten	11
4.2.1.1	Kombinationsabdichtung KDB / Tonmineralische Dichtung	11
4.2.1.2	Kombinationsabdichtung KDB / Bentonitmatte	13
4.2.1.3	Kombinationsabdichtung KDB / Trisoplast	15
4.2.2	Varianten mit Berücksichtigung der In situ Behandlung	17
4.2.2.1	Kunststoffdichtung mit Dichtungskontrollsystem	17
4.2.2.2	Kunststoffdichtung mit Wasserhaushaltsschicht	19
4.2.2.3	Kapillarsperre mit Wasserhaushaltsschicht	21
5	Kostenvergleich/Wirtschaftlichkeit	23

**Abbildungsverzeichnis:**

Abb. 1	Kombinationsabdichtung KDB / mineralische Dichtung	12
Abb. 2	Abdichtung mit Bentonitmatte	14

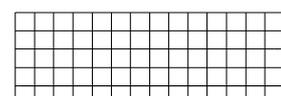
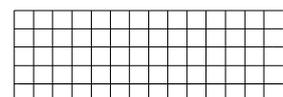


Abb. 3	Trisoplastabdichtung	16
Abb. 4	Kunststoffdichtung mit Dichtungskontrollsystem	18
Abb. 5	Kunststoffdichtung mit Wasserhaushaltsschicht	20
Abb. 6	Kapillarsperre mit Wasserhaushaltsschicht	22

Pläne:

Plan 1	Übersichtslageplan	M 1 : 2.000
Plan 2	Schematischer Schnitt	M 1 : 250



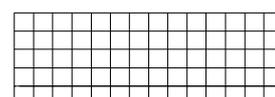


- Resistenz gegen biologische Beanspruchung, wie Nagetiere, Pflanzenwuchs, Mikroorganismen,
- Resistenz gegen chemische Reaktion mit Deponiegas und Kondenswasser,
- Rekultivierbarkeit,
- Kontrollierbarkeit,
- Erweiterbarkeit und Reparierbarkeit.

Von **Oberflächenabdichtungen** wird üblicherweise gesprochen, wenn es sich um ein mehrschichtiges System handelt, bei dem die verschiedenen und voneinander eindeutig getrennten Schichten jeweils spezifische Funktionen übernehmen, wenn das Abdichtungssystem aus Materialien mit definierten Materialkennwerten aufgebaut ist und wenn durch die Qualitätssicherung beim Herstellungsvorgang die Umsetzung der planerischen Lösung nachgewiesen werden kann. Die Dichtungsschicht der Oberflächenabdichtung weist dabei eine charakterisierte hohe Dichtigkeit auf, deren langfristige Wirksamkeit durch den Aufbau des Systems sichergestellt werden soll.

Die Abdichtungssysteme weisen i. d. R. folgenden Aufbau auf:

- Rekultivierungsschicht:  
Funktion: Witterungsschutz für die Dichtungsschicht (Schutz vor Frost, Austrocknung, Wasser- und Winderosion, Sonneneinwirkung), Vergleichmäßigung und Verminderung des Wasserzuflusses in die Entwässerungsschicht, ggf. Schutz vor mechanischen Einwirkungen aus der Befahrung, Wurzelraum bei vorgesehener Rekultivierung, Wasserhaushaltsschicht  
Material: lehmige Sande bis sandige Lehme oder Oberbelag nach vorgesehener Nutzung
- Entwässerungsschicht  
Funktion: Aufnahme und Abführung des durch die Rekultivierungsschicht gesickerten Niederschlagswassers (Vermeidung von Staunässe), ggf. zusätzlicher Witterungsschutz der Dichtungsschicht, ggf. Schutz vor Durchwurzelung der Dichtungsschicht durch Aufhöhung der Überdeckung, Verhinderung von Stauwasser zwischen Dichtungselement und Rekultivierungsschicht  
Material: grobkörniges mineralisches Material (Kiese, Sande), langzeitbeständige geotextile Dränmatten und / oder Dränrohre
- Dichtungselement  
Funktion: Sperre gegen Niederschlagswasser, Kondensat, gasförmige Schadstoffe, Deponiegas und Luft (trifft für Kapillarsperre funktionsbedingt nur teilweise zu).  
Material: fein- oder gemischtkörniges mineralisches Material (z. B. Tone, Schluffe, ggf. Sande oder Kiese ggfs. mit schluffigem oder tonigem Feinkornanteil mit oder



ohne Vergütung mittels Tonmehl, Bentonit, Wasserglas o. ä.), ggf. Bentonitmatte, Kunststoffdichtungsbahnen (KDB), Asphaltbeton

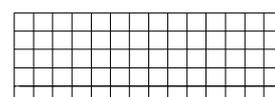
- Ausgleichsschicht, ggf. Gasdränschicht  
Funktion: Tragschicht für den weiteren Aufbau, Feinplanum für die Dichtungsschicht, Schicht zur Druck- und Konzentrationsverteilung des Deponiegases unter der Dichtungsschicht  
Material: nicht bindiges mineralisches Material (Kiese, Sande)
- Filter-, Trenn-, Schutz- und Auflagerschichten  
Funktion: Filterung und Trennung verschiedener Bodenmaterialien, Schutz der Kunststoffdichtungsbahn  
Material: mineralisches Material (filterstabiler Aufbau) oder Geotextilien  
Lage bei Bedarf an folgenden Grenzflächen:
  - Rekultivierungsschicht - Entwässerungsschicht (Trenn- und Filterschicht)
  - Entwässerungsschicht - Dichtungselement (Trenn- und Schutzschicht)
  - Dichtungselement - Ausgleichs- ggf. Gasdränschicht (Trenn- und Filterschicht, ggf. Auflagerschicht)
  - ggf. Ausgleichsschicht - Grobplanum (Trennschicht).

### 3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die maßgebliche Rechtsgrundlage ist die Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) vom 27.04.2009, zuletzt geändert durch Artikel 7 der Verordnung am 02.05.2013. Hiermit gelten einheitliche Anforderungen an Planung, Bau, Betrieb und Schließung von Deponien in Deutschland.

Im Besonderen sind folgende Regelungen gemäß Anlage 1 DepV zu beachten:

- Absatz 2.1.2: Durch die Länder (LAGA Ad hoc-AG Deponietechnik) wurden u.a. Bundeseinheitliche Qualitätsstandards (BQS) für mineralische Komponenten des Dichtaufbaus erarbeitet.
- Absatz 2.4: Bei Verwendung von Geokunststoffen, Polymeren und Dichtungskontrollsystemen, ist eine Zulassung durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin (BAM) erforderlich.



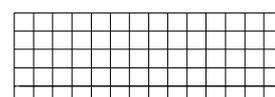
### 3.1 Deponieverordnung

Die Deponieverordnung beschreibt in Anhang 1 Abs. 2.1.1 die Anforderungen an die Systemkomponenten einer Oberflächenabdichtung wie folgt:

Die Verbesserung der geologischen Barriere und die technischen Maßnahmen als Ersatz für die geologische Barriere, das Abdichtungssystem, die Materialien und die Herstellung der Systemkomponenten und deren Einbau sowie die Eigenschaften dieser Komponenten im Einbauzustand müssen so gewählt werden, dass die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen ist. Abweichend hiervon gilt bei serienmäßig hergestellten Dichtungskontrollsystemen ein Zeitraum von mindestens 30 Jahren.

Im Übrigen sind mindestens folgende Kriterien und Einwirkmechanismen unter den besonderen Randbedingungen in Deponieabdichtungssystemen zu berücksichtigen:

1. Dichtigkeit, gemessen an den Anforderungen der Tabellen 1 und 2,
2. Verformungsvermögen, um unvermeidbare Setzungen aufzunehmen,
3. Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanisch einwirkenden Kräften,
4. Widerstandsfähigkeit gegen hydraulische Einwirkungen (Suffosion und Erosion),
5. Beständigkeit gegenüber chemischen und biologischen Einwirkungen,
6. Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen,
7. Beständigkeit gegenüber alterungsbedingten nachteiligen Materialveränderungen,
8. gesicherte, reproduzierbare und qualitätsüberwachte Vorfertigung von Abdichtungskomponenten,
9. gesicherte, die Funktionalität wahrende und qualitätsüberwachte Herstellung sowie Einbau der Systemkomponenten und des Abdichtungssystems, insbesondere unter Einbeziehung geeigneter Maßnahmen zum Schutz vor auflastbedingten Beschädigungen,
10. bei Vorgabe einer einzuhaltenden Durchflussrate: geeignete Nachweise,
11. bei mineralischen Abdichtungskomponenten: Materialzusammensetzung, Einbautechnik und Einbindung im Abdichtungssystem, um eine sehr niedrige Durchlässigkeit zu erreichen und die Gefahr einer Trockenrissbildung zu minimieren,
12. bei Deponieersatzbaustoffen: Einhaltung der zusätzlichen Anforderungen der §§ 14 und 15 dieser Verordnung,
13. bei einer Entwässerung an der Deponiebasis: DIN 19667, Ausgabe Oktober 2009, Dränung von Deponien – Planung, Bauausführung und Betrieb.



Für die Herstellung des Abdichtungssystems soll ein einziger verantwortlicher Auftragnehmer bestellt werden.

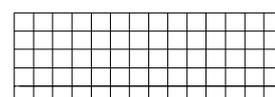
Die besonderen Anforderungen an das Oberflächenabdichtungssystem ist in Anlage 1 Abs. 2.3ff beschrieben.

- Das Oberflächenabdichtungssystem ist nach Tabelle 2 zu errichten.
- Ausreichend dimensionierte und tragfähige Ausgleichsschicht einbauen.
- Beim Erfordernis von zwei Systemkomponenten sollen diese Komponenten aus verschiedenen Materialien bestehen und fehlerausgleichend wirken.
- Wird das Oberflächenabdichtungssystem ohne eine Konvektionssperre hergestellt, ist bei Deponien der Klasse I, II und III ein Kontrollfeld von wenigstens 300 m<sup>2</sup> Größe einzurichten und bis zum Ende der Nachsorgephase zu betreiben.
- Anstelle einer Rekultivierungsschicht kann eine der geplanten Folgenutzung entsprechend angepasste technische Funktionsschicht erstellt werden.
- Anstelle einer Rekultivierungsschicht (Abs. 2.3.1) kann eine Wasserhaushaltsschicht mit folgenden Anforderungen installiert werden:
  - Minstdicke  $\geq 1,5$  m
  - nutzbare Feldkapazität  $\geq 220$  mm
  - im fünfjährigen Mittel darf die Durchsickerung max. 10% vom langjährigen Mittel des Niederschlags (in der Regel 30 Jahre), höchstens 60 mm pro Jahr, spätestens fünf Jahre nach Herstellung betragen.
- Bei gleichzeitiger Verwendung der Rekultivierungs-/Wasserhaushaltsschicht als Methanoxidationsschicht sind die zusätzlichen diesbzgl. Anforderungen mit der zuständigen Behörde abzustimmen. Hierbei sind die Wechselwirkungen der Methanoxidation und des Wasserhaushalts zu beurteilen.

Tabelle 2 Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems

Nr.	Systemkomponente	Regelaufbau für DK II
1	Ausgleichsschicht <sup>1)</sup>	ggf. erforderlich <sup>7)</sup>
2	Gasdränschicht <sup>1)</sup>	ggf. erforderlich <sup>8)</sup>
3	Erste Abdichtungskomponente	erforderlich <sup>2)</sup>
4	Zweite Abdichtungskomponente	erforderlich <sup>2)</sup>
5	Dichtungskontrollsystem	nicht erforderlich
6	Entwässerungsschicht <sup>4)</sup> d $\geq 0,3$ m, k $\geq 1 \times 10^{-3}$ m/s	erforderlich
7	Rekultivierungsschicht, technische Funktionsschicht	erforderlich

1) Die Ausgleichsschicht kann bei ausreichender Gasdurchlässigkeit und Dicke die Funktion der Gasdränschicht nach Nummer 2 mit erfüllen.





- BQS 7-1 "Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen" vom 23.05.2011
- BQS 7-2 "Wasserhaushaltsschichten in Deponieoberflächenabdichtungen" vom 20.10.2011
- BQS 7-3 "Methanoxidationsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen" vom 20.10.2011

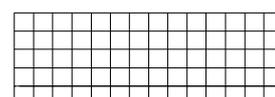
Diese und weitere BQS können der Homepage der LAGA ([www.laga-online.de](http://www.laga-online.de)) entnommen werden. Weitere Dichtungselemente, für die bundeseinheitliche Eignungsnachweise vorliegen, sind ebenfalls über die o.g. Homepage zu finden.

### **3.3 Zulassung von Geokunststoffen, Polymeren und Dichtungskontrollsystemen**

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist zuständig für die Prüfung und Zulassung von Geokunststoffen wie Kunststoffdichtungsbahnen, Schutzschichten, Kunststoff-Dränelementen, Bewehrungsgittern aus Kunststoff, von Polymeren und von Dichtungskontrollsystemen für die Anwendung in Basis- und Oberflächenabdichtungen von Deponien.

Die durch die BAM zugelassenen Komponenten sind unter der Homepage der BAM im Einzelnen aufgeführt und können hier eingesehen werden. Für folgende Dichtungselemente liegen Zulassungs- bzw. Eignungsbeurteilungen vor:

- Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)
- Geotextilien
- Bewehrungsgitter
- Kunststoff-Dränelementen
- Geosynthetische Tondichtungsbahnen (Bentonitmatten)
- Trisoplast
- MDDS-Bahnen (Sandschutzmatten)
- Dichtungskontrollsysteme (DKS)
- Kapillarblockbahn
- Kombikapillarsperre



## 4 Auswahl der Varianten für eine DK II Oberflächenabdichtung

Folgende Dichtungselemente werden für die Variantenbetrachtung der Oberflächenabdichtung des Abschnitt IV herangezogen:

- Kunststoffdichtungsbahn
- Tonmineralische Abdichtung
- Geosynthetische Tondichtungsbahn
- Trisoplastabdichtung
- Kapillarsperre (System)
- Dichtungskontrollsystem (DKS)
- Rekultivierungsschicht
- Wasserhaushaltsschicht

Es werden verschiedene Kombinationen der zuvor genannten Dichtungselemente gewählt, die nach heutigem Kenntnisstand genehmigungsfähig, technisch ausführbar und eine wirtschaftliche Ausführung versprechen. Hierbei werden insbesondere auch Varianten betrachtet, die unter den ortsspezifischen Gegebenheiten und der durchgeführten In situ Behandlung eine Vereinfachung im Aufbau ermöglichen.

### 4.1 Gleichbleibende Systemkomponenten

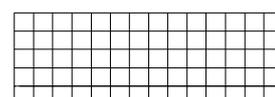
Bei der Variation des Abdichtungssystems werden nicht sämtliche Komponenten variiert. Folgende Systemkomponenten sind in jedem Abdichtungssystem notwendig.

#### 4.1.1 Geogitter im Bereich der steilen Böschung

Der Deponieabschnitt IV der Deponie Dorfweiher weist im Böschungsbereich Neigungen bis 1 : 2 auf. In diesen Bereichen ist für die Oberflächenabdichtungssysteme mit Kunststoffdichtungsbahn der Einbau von Geogitter zur Gewährleistung der Standsicherheit des Abdichtungssystems notwendig. Für die entsprechenden Systeme ist in der jeweiligen Kostenzusammenstellung der Einbau eines Geogitters auf ca. 4.000 m<sup>2</sup> bei Kosten von 6 €/m<sup>2</sup> berücksichtigt.

#### 4.1.2 Gasdrän- und Ausgleichsschicht

Für die Varianten ohne In situ Behandlung wird eine Gasdrän- und Ausgleichsschicht von 0,5 m Mächtigkeit vorgesehen. Durch die In situ Behandlung des Abfalls ist nur noch eine geringe Deponiegasproduktion zu erwarten. Daher kann eine kombinierte Gasdrän- und Ausgleichsschicht in reduzierter Mächtigkeit von  $d = 0,3$  m ausgeführt werden.



### 4.1.3 Entwässerungsschicht

Die Entwässerungsschicht kann entweder als mineralische Entwässerungsschicht mit einer Schichtmächtigkeit von 0,3 m und einem  $k_f$ -Wert von  $1 \times 10^{-3}$  m/s oder als entsprechend dimensionierte geotextile Dränmatte ausgeführt werden. Die geotextile Dränmatte kann in der Regel auch als Schutzschicht zur KDB eingesetzt werden, bei einer mineralischen Entwässerungsschicht ist ein Schutzwirksamkeitsnachweis vorzulegen bzw. eine geotextile Schutzlage vorzusehen.

Für die Variante Kapillarsperre kann die Entwässerungsschicht ggfs entfallen, da die Kapillarschicht diese Funktion übernehmen kann. Ein entsprechender hydraulischer Nachweis ist zu führen.

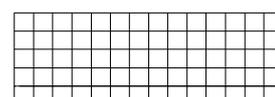
### 4.1.4 Rekultivierungsschicht

Die Rekultivierungsschicht ist die oberste Komponente des Oberflächenabdichtungssystems von Deponien. Sie hat folgende Aufgaben:

- Rekultivierung der Deponie
- Verhinderung der hydraulischen Überlastung, weitestgehende Vermeidung einer Durchwurzelung und Verhinderung sonstiger Beeinträchtigungen der langfristigen Funktionsfähigkeit der Entwässerungsschicht
- Schutz der Abdichtungskomponenten vor Wurzel- und Frosteinwirkungen sowie vor Austrocknung
- Gewährleistung der Einbindung des Deponiekörpers in die umgebende Landschaft
- Ermöglichen der Folgenutzung

Damit die Rekultivierungsschicht die o.g. Aufgaben und Funktionen erfüllen kann, muss sie unter Berücksichtigung der Standortbedingungen, der Abdichtungskomponenten und des zu erwartenden Bewuchses projektspezifisch bemessen werden. Eine Mindestdicke von 1 m gemäß DepV darf nicht unterschritten werden. Die Rekultivierungsschicht soll eine nutzbare Feldkapazität (nFK) von wenigstens 140 mm über die Gesamtdicke und eine ausreichende Luftkapazität (LK) aufweisen. Um die Durchwurzelung zu erleichtern und der Bildung von Stauwasser vorzubeugen, soll die Luftkapazität nach Fertigstellung der Rekultivierungsschicht mindestens 8 Vol-% betragen.

Hinsichtlich des Wasserhaushalts ist ein ausgewogenes Zusammenspiel zwischen der Rekultivierungsschicht und der Entwässerungsschicht erforderlich. Zum einen soll die Rekultivierungsschicht die Dichtungsschicht v.a. vor Wurzeleinwirkung und Austrocknung schützen (der Schutz vor Frost ergibt sich bei den diskutierten Schichtdicken von



selbst). Zum anderen muss die Entwässerungsschicht in Abhängigkeit von der Absickerung aus der Rekultivierungsschicht genügend, darf aber nicht zu viel Wasser abführen, damit es weder zu einer Vernässung am unteren Rand der Rekultivierungsschicht noch zu einer Austrocknung am oberen Rand der Dichtungsschicht kommt.

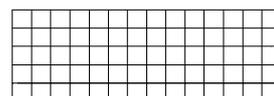
Für die Deponie Dorfweiher wird das Rekultivierungsziel Wald angestrebt. Um ein entsprechendes Wurzelwachstum zu ermöglichen, wird von einer Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht von 2,0 m ausgegangen.

Wird die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht ausgebildet, kann sie bei In situ stabilisierten Deponien als zweite Abdichtungskomponente herangezogen werden. Die Anforderungen an die Wasserhaushaltsschicht sind in der DepV im Anhang 1, Abs. 2.3.1.1 zusammengestellt. Nachfolgend wird für die Varianten mit Wasserhaushaltsschicht ebenfalls von einer Schichtmächtigkeit von 2 m ausgegangen. Für eine weitergehende Planung ist die Wasserhaushaltsschicht für den Standort so zu bemessen, dass die nutzbare Feld- und Luftkapazität die notwendige Speicherkapazität nach DepV garantieren. Hierbei ist für den Standort Konstanz von einem mittleren langjährigen Niederschlag von 847 mm/a auszugehen.

#### 4.1.5 Entgasungssystem

Bei Oberflächenabdichtungssysteme mit Konvektionssperre ist ein Entgasungssystem vorzusehen, um diffuse Gasaustritte an den Rändern des Oberflächenabdichtungssystems zu unterbinden. Im folgenden werden für die Varianten mit und ohne In-situ Behandlung unterschiedliche Ansätze getroffen:

- Ohne In-situ Behandlung ist eine konventionelle Gaserfassung für die aktive Entgasung der Deponie vorzusehen. Für den Abschnitt IV der Deponie Dorfweiher gehen wir davon aus, dass dieser mittels 3 Gasbrunnen entgast werden kann. Diese werden über einen Sammelbalken an die vorhandene Gasbehandlungsanlage angeschlossen. Des weiteren wird am Böschungsfuß eine Kontrolldrainage vorgesehen, die ebenfalls an das Entgasungssystem angeschlossen werden kann. Für die Einrichtung der Gasbrunnen, Gassaug- und -sammelleitungen sowie einen Gassammelbalken und die Kontrolldrainage werden Kosten in Höhe von ca. 100.000 € angesetzt.
- Mit In-situ Behandlung kann die Gasfassung einfacher ausgeführt werden, da das Gaspotenzial der abgelagerten Abfälle reduziert ist. Für den Abschnitt IV der Deponie Dorfweiher wurden 2 Ansätze gewählt:  
Aktive Entgasung der Gasdränschicht über Horizontalkollektoren, die über einen Sammelbalken an die vorhandene Gasbehandlungsanlage angeschlossen werden. Für die Einrichtung der Kollektoren, Gassaug- und -sammelleitungen



sowie einen Gassammelbalken werden Kosten in Höhe von ca. 45.000 € angesetzt.

Passive Entgasung der Gasdränschicht über ca. 10 Gasdurchlässe, die die durchströmende Gasmenge in die Rekultivierungsschicht, die in diesem Bereich als Methanoxidationschicht wirkt, einleiten. Für die Einrichtung der Gasdurchlässe und der Gasverteilerleitungen werden Kosten in Höhe von ca. 50.000 € angesetzt.

## 4.2 Darstellung ausgewählter Varianten für die Deponie Dorfweiher

Unter dem Aspekt der herkömmlichen Abdichtung werden folgende Varianten betrachtet:

- Kombinationsabdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn und mineralische Dichtung (2lagig tonmineralisch)
- Kombinationsabdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn und geosynthetischer Tondichtungsbahn (Bentonitmatte)
- Kombinationsabdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn und Trisoplast

Durch die aerobe Vorbehandlung kann die zweite Abdichtungskomponente ersetzt werden durch

- Kunststoffdichtungsbahn und Dichtungskontrollsystem
- Kunststoffdichtungsbahn mit Wasserhaushaltsschicht
- Abdichtung mit Kapillarsperre und Wasserhaushaltsschicht

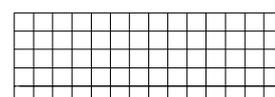
### 4.2.1 Varianten ohne Berücksichtigung der In situ Behandlung

#### 4.2.1.1 Kombinationsabdichtung KDB / Tonmineralische Dichtung

Die Kombinationsdichtung aus KDB und tonmineralischer Dichtung stellte über lange Jahre die Standarddichtung für Oberflächenabdichtungen von DK II Deponien dar. Zur Herstellung der Dichtung liegen langjährige Erfahrungen vor. Allerdings hat sich gezeigt, dass tonmineralische Abdichtungsschichten anfällig gegen Austrocknung und Rissbildung sind.

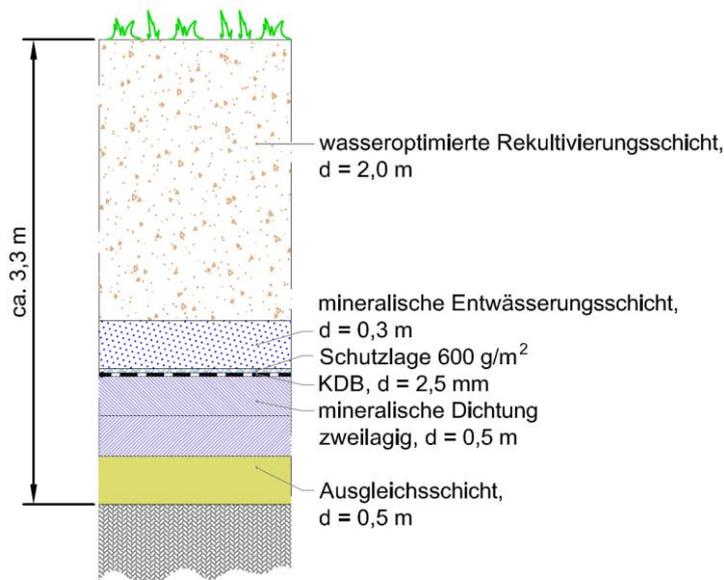
Der Aufbau der Abdichtung erfolgt folgendermaßen (von unten nach oben):

- Gasdrän- und Ausgleichsschicht,  $d = 0,5 \text{ m}$
- mineralische Abdichtung,  $d = 0,5 \text{ m}$ ,  $k_f = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$
- Kunststoffdichtungsbahn (KDB),  $d = 2,5 \text{ mm}$



- Schutzvlies
- mineralische Entwässerungsschicht,  $d = 0,3 \text{ m}$ ,  $k_f = 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
- wasseroptimierte Rekultivierungsschicht,  $d = 2,0 \text{ m}$

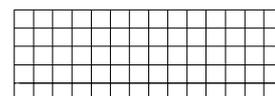
Die dargestellte Variante stellt den klassischen Aufbau der Oberflächenabdichtung mit Einsatz von mineralischen Materialien für die erste Abdichtungskomponente sowie die Entwässerungsschicht dar. Die Gesamtdicke des Abdichtungssystems inkl. Ausgleichsschicht ergibt sich zu ca. 3,3 m. Zur Fassung des Deponiegases ist ein Entgassungssystem mit Gasbrunnen und Gasleitungssystem mit Gasbehandlung erforderlich.



**Abb. 1 Kombinationsabdichtung KDB / Tonmineralische Dichtung**

Die Kosten der Kombinationsdichtung KDB / Tonmineralischen Dichtung können wie folgt angesetzt werden:

Planum herstellen	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
Gasdrän- und Ausgleichsschicht, $d = 0,5 \text{ m}$	ca. 4,00 €/m <sup>2</sup>
mineralische Dichtung, $d = 0,5 \text{ m}$ $k_f \leq 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$	ca. 15,00 €/m <sup>2</sup>
zweilagiger Einbau	ca. 13,00 €/m <sup>2</sup>
Kunststoffdichtungsbahn	ca. 4,50 €/m <sup>2</sup>
Schutzlage	ca. 9,00 €/m <sup>2</sup>
Min. Entwässerungsschicht, $d = 0,3 \text{ m}$	ca. 1,50 €/m <sup>2</sup>
Vlies als Trennlage	ca. 15,00 €/m <sup>2</sup>
wasseroptimierte Rekultivierung, $d = 2,0 \text{ m}$	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
Begrünung	ca. 64,00 €/m <sup>2</sup>
<b>Summe</b>	<b>ca. 64,00 €/m<sup>2</sup></b>



Oberflächenabdichtung auf 12.400 m <sup>2</sup>	793.600 €
Geogitter auf 4.000 m <sup>2</sup>	24.000 €
<b>Summe OAD</b>	<b>817.600 €</b>

Vorteile:

- Einsatz von natürlichen Materialien
- Durch den Einsatz einer Konvektionssperre sind Wasserzutritte sowie Gasaustritte im Bereich der Dichtung ausgeschlossen

Nachteile:

- Große Dicke des Dichtungselements und damit des Oberflächenabdichtungssystems
- Einbau der mineralischen Abdichtung stark witterungsabhängig
- Nachweis der Beständigkeit und Qualität gemäß DepV problematisch

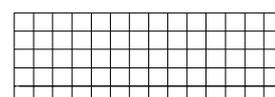
4.2.1.2 Kombinationsabdichtung KDB / Bentonitmatte

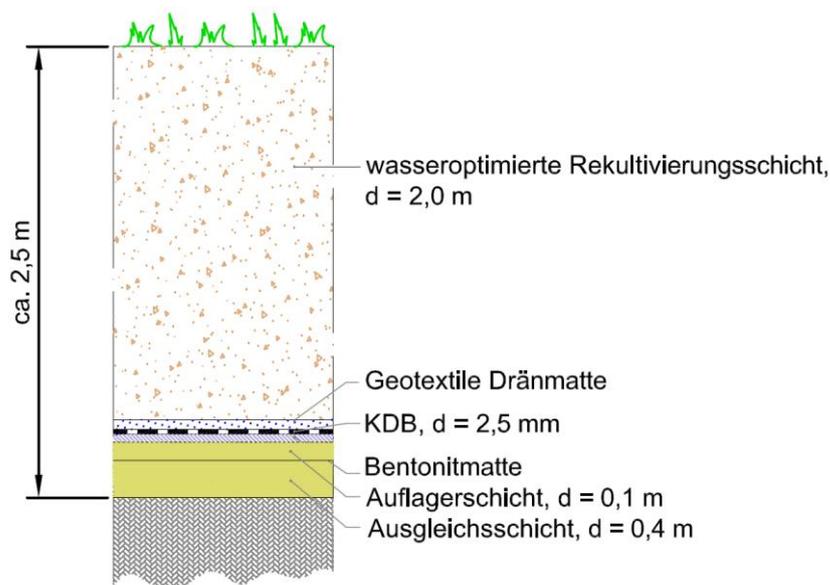
Die Kombinationsabdichtung KDB / Bentonitmatte stellt wegen der einfachen Verlegung und geringen Aufbauhöhe ein preiswertes Abdichtungssystem dar. Bei diesem Abdichtungssystem wird die mineralische Dichtungsschicht als Bentonitmatte (auch GeokunststoffTonDichtungsbahn; GTD genannt) ausgeführt. Zum Schutz der Bentonitmatte ist zusätzlich zur Ausgleichsschicht eine definierte Auflagerschicht einzubauen. Die Entwässerungsschicht wird durch eine geotextile Dränmatte ausgebildet, die auch die Funktion der Schutzlage erfüllt.

Der Aufbau der Kombinationsabdichtung KDB / Bentonitmatte erfolgt folgendermaßen (von unten nach oben):

- Gasdrän- und Ausgleichsschicht, d = 0,4 m
- Auflagerschicht, d = 0,1 m
- Bentonitmatte, d = 0,03 m,  $k_f = 5 \times 10^{-12}$  m/s
- KDB, d = 2,5 mm
- Geotextile Dränmatte
- wasseroptimierte Rekultivierungsschicht, d = 2,0 m

Die Gesamtdicke des Abdichtungssystems inkl. Ausgleichsschicht ergibt sich zu ca. 2,6 m. Zur Fassung des Deponiegases ist ein Entgasungssystem erforderlich.





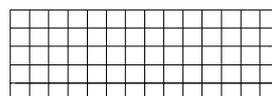
**Abb. 2 Abdichtung mit Bentonitmatte**

Die Kosten der Kombinationsdichtung KDB / Bentonitmatte können wie folgt angesetzt werden:

Planum herstellen	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
Ausgleichsschicht, d = 0,4 m	ca. 3,50 €/m <sup>2</sup>
Auflagerschicht, d = 0,1 m	ca. 2,00 €/m <sup>2</sup>
Bentonitmatte einlagig	ca. 7,00 €/m <sup>2</sup>
KDB, d = 2,5 mm	ca. 13,00 €/m <sup>2</sup>
Geotextile Dränmatte	ca. 6,50 €/m <sup>2</sup>
wassertoptimierte Rekultivierung, d = 2,0 m	ca. 15,00 €/m <sup>2</sup>
Begrünung	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
<b>Summe</b>	<b>ca. 49,00 €/m<sup>2</sup></b>
Oberflächenabdichtung auf 12.400 m <sup>2</sup>	607.600 €
Geogitter auf 4.000 m <sup>2</sup>	24.000 €
<b>Summe OAD</b>	<b>631.600 €</b>

Vorteile:

- Einfache Verlegung
- Durch den Einsatz einer Konvektionssperre sind Wasserzutritte sowie Gasaustritte im Bereich der Dichtung ausgeschlossen
- Gleichbleibende Qualität durch qualitätsüberwachte Vorfertigung der Produkte
- Geringere Dicke des Dichtungselements und damit geringe Mächtigkeit des Oberflächenabdichtungssystems



Nachteile:

- Einbau in steilen Lagen nur begrenzt machbar (trifft auf Deponie Dorfweiher nicht zu)

4.2.1.3 Kombinationsabdichtung KDB / Trisoplast

Durch die LAGA-Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“<sup>1</sup> wurde im Jahr 2009 die Eignung von Trisoplast® als gleichwertigem System zur mineralischen Abdichtung bescheinigt.

Bei Trisoplast® handelt es sich um ein polymervergütetes Sand-Bentonit-Gemisch. Die einzelnen Komponenten werden in einer Mischanlage unter Wasserzugabe gemischt. Durch die Wasserzugabe quillt das Bentonit auf füllt somit das Porenvolumen des Sand-Korngerüstes aus. Das Polymer bewirkt ein Verkleben und Verketteten der Tonmineraleilchen des Bentonits und der Porenzwischenräume.

Durch die Zugabe des Polymers erhält Trisoplast® seine spezifischen bodenmechanischen Eigenschaften die bereits intensiv untersucht wurden:

- sehr geringe Wasserdurchlässigkeit  $3 \times 10^{-11}$  m/s
- rissfreie Verformbarkeit
- extrem langsame Wasserabgabe und Wasseraufnahme
- stark behinderter Ionenaustausch (Langzeitbeständigkeit)

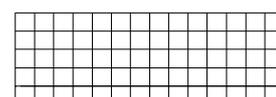
Der Aufbau der Kombinationsabdichtung KDB/Trisoplastabdichtung erfolgt folgendermaßen (von unten nach oben):

- Gasdrän- und Ausgleichsschicht,  $d = 0,5$  m
- Trennvlies
- Trisoplastabdichtung,  $d = 0,08$  m,  $k_f = 3 \times 10^{-11}$  m/s
- Kunststoffdichtungsbahn,  $d = 2,5$  mm
- Geotextile Dränmatte
- wasseroptimierte Rekultivierungsschicht,  $d = 2,0$  m

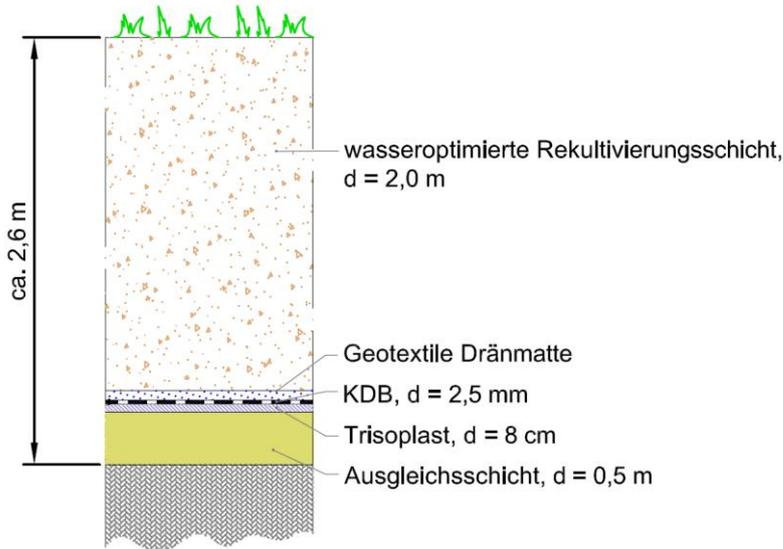
Zur definierten Trennung zwischen Ausgleichsschicht und Trisoplastabdichtung wird ein Trennvlies vorgesehen. Die Entwässerungsschicht wird durch eine geotextile Dränmatte ausgebildet, die auch die Funktion der Schutzlage erfüllt. Die Gesamtdicke

---

<sup>1</sup> LAGA-Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“: Eignungsbeurteilung von Trisoplast® zur Herstellung von mineralischen Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien, 26.01.2009 mit letzten Änderungen gemäß Beschluss der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ vom 24.04.2013



des Abdichtungssystems inkl. Ausgleichsschicht ergibt sich zu ca. 2,6 m. Zur Fassung des Deponiegases ist ein Entgasungssystem erforderlich.



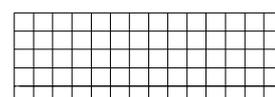
**Abb. 3 Trisoplastabdichtung**

Die Kosten der Kombinationsabdichtung KDB / Trisoplast können wie folgt angesetzt werden:

Planum herstellen	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
Ausgleichsschicht, d = 0,5 m	ca. 4,00 €/m <sup>2</sup>
Vlies als Trennlage	ca. 1,50 €/m <sup>2</sup>
Trisoplast, d ≥ 8 cm	ca. 14,50 €/m <sup>2</sup>
Kunststoffdichtungsbahn	ca. 13,00 €/m <sup>2</sup>
Geotextile Dränmatte	ca. 6,50 €/m <sup>2</sup>
wasseroptimierte Rekultivierung, d = 2,0 m	ca. 15,00 €/m <sup>2</sup>
Begrünung	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
<b>Summe</b>	<b>ca. 55,50 €/m<sup>2</sup></b>
Oberflächenabdichtung auf 12.400 m <sup>2</sup>	700.600 €
Geogitter auf 4.000 m <sup>2</sup>	24.000 €
<b>Summe OAD</b>	<b>724.600 €</b>

Vorteile:

- Durch den Einsatz einer Konvektionssperre sind Wasserzutritte sowie Gasaustritte im Bereich der Dichtung ausgeschlossen
- Geringere Dicke des Dichtungselements und damit geringe Mächtigkeit des Oberflächenabdichtungssystems



Nachteile:

- Monopolstellung des Anbieters
- Großer Überwachungsbedarf beim Einbau aufgrund der geringen Dicke der Dichtungsschicht.

## 4.2.2 Varianten mit Berücksichtigung der In situ Behandlung

### 4.2.2.1 Kunststoffdichtung mit Dichtungskontrollsystem

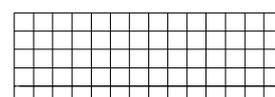
Der Einsatz von Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) als Konvektionssperre in einer Kombinationsabdichtung als auch als alleiniges Dichtungselement in Oberflächenabdichtungen hat sich seit vielen Jahren bewährt.

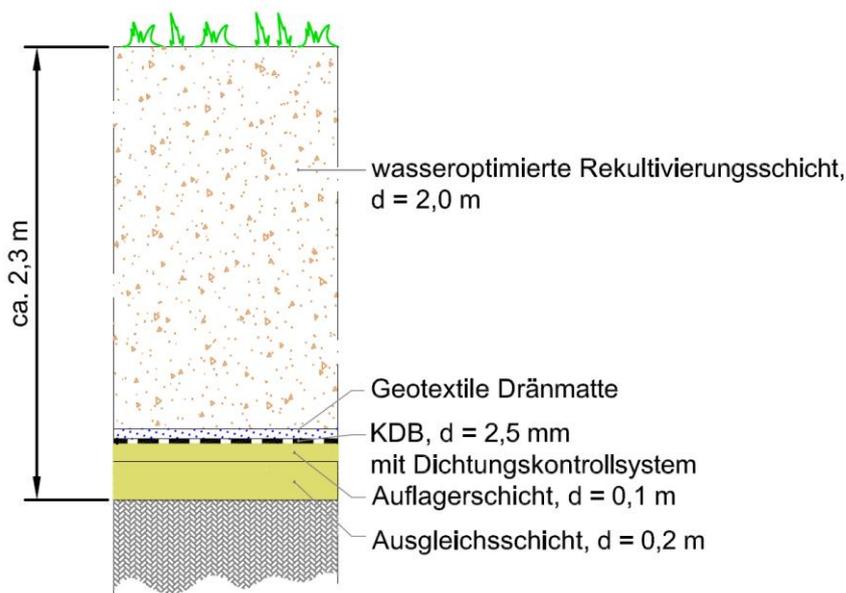
Nach DepV kann bei stabilisierten Deponien ein Dichtungskontrollsystem die zweite Abdichtungskomponente ersetzen. Von der BAM sind zwei Dichtungskontrollsysteme auf der Grundlage einer geoelektrischen Leakageortung zum Einsatz in Oberflächenabdichtungssystemen zugelassen. Hierbei werden unter und über der KDB in einem Raster Elektroden eingebaut, die das Potenzialgefälle messen. Undichtigkeiten in der KDB führen durch das durchfließende Wasser zu einer Änderung des elektrischen Potentials, welches an den benachbarten Elektroden gemessen werden kann. Eine Lokalisierung der Leckagen ist mit hoher Genauigkeit möglich.

Der Aufbau der Abdichtung KDB mit DKS erfolgt folgendermaßen (von unten nach oben):

- Ausgleichsschicht,  $d = 0,2 \text{ m}$
- Auflagerschicht,  $d = 0,1 \text{ m}$
- Kunststoffdichtungsbahn,  $d = 2,5 \text{ mm}$
- Dichtungskontrollsystem
- Geotextile Dränmatte
- wasseroptimierte Rekultivierungsschicht,  $d = 2,0 \text{ m}$

Die Gesamtdicke des Abdichtungssystems inkl. Ausgleichsschicht ergibt sich zu ca. 2,3 m. Zur Fassung des Deponiegases ist ein Entgasungssystem erforderlich. Um die Wirkung des Dichtungskontrollsystems nicht zu sehr einzuschränken ist die Anzahl von Durchdringungen durch die Dichtung zu minimieren. Es wird daher keine passive Entgasung für diese Abdichtungsvariante vorgesehen.





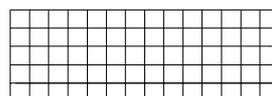
**Abb. 4 Kunststoffdichtung mit Dichtungskontrollsystem**

Die Kosten für eine Oberflächenabdichtung mit KDB mit Dichtungskontrollsystem können wie folgt angesetzt werden:

Planum herstellen	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
Ausgleichsschicht, d = 0,2 m	ca. 2,50 €/m <sup>2</sup>
Auflagerschicht, d = 0,10 m	ca. 2,00 €/m <sup>2</sup>
KDB, 2,5 mm	ca. 13,00 €/m <sup>2</sup>
Dichtungskontrollsystem	ca. 6,00 €/m <sup>2</sup>
Geotextile Dränmatte	ca. 6,50 €/m <sup>2</sup>
wassertoptimierte Rekultivierung, d = 2,0 m	ca. 15,00 €/m <sup>2</sup>
Begrünung	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
<b>Summe</b>	<b>ca. 47,00 €/m<sup>2</sup></b>
<hr/>	
Oberflächenabdichtung auf 12.400 m <sup>2</sup>	582.800 €
Geogitter auf 4.000 m <sup>2</sup>	24.000 €
<b>Summe OAD</b>	<b>606.800 €</b>

Vorteile:

- Durch den Einsatz einer Konvektionssperre sind Wasserzutritte sowie Gasaustritte im Bereich der Dichtung ausgeschlossen
- geringere Dicke des Dichtungselements und damit geringe Mächtigkeit des Oberflächenabdichtungssystems
- durch das Dichtungskontrollsystem können Fehlstellen frühzeitig und lagegenau festgestellt werden



Nachteile:

- Begrenzte Funktionserfüllung für nur 30 Jahre verlangt

4.2.2.2 Kunststoffdichtung mit Wasserhaushaltsschicht

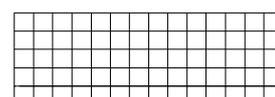
Der Einsatz von Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) als Konvektionssperre in einer Kombinationsabdichtung als auch als alleiniges Dichtungselement in Oberflächenabdichtungen hat sich seit vielen Jahren bewährt.

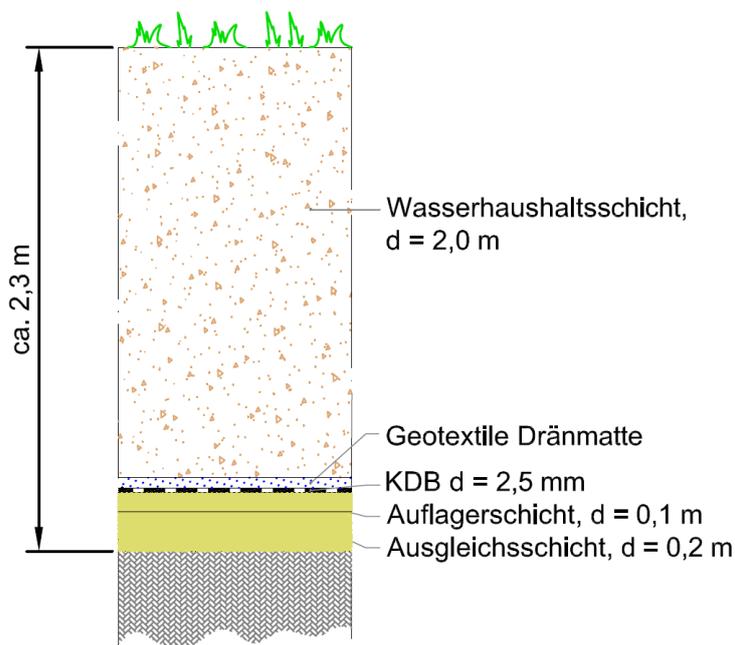
Nach DepV kann bei stabilisierten Deponien eine Wasserhaushaltsschicht die zweite Abdichtungskomponente ersetzen. Die Wasserhaushaltsschicht ist entsprechend der Anforderungen nach einer maximalen Durchsickerung von 60 mm/a 5 Jahre nach Fertigstellung zu bemessen. Die Bemessung erfolgt über eine Wasserhaushaltsberechnung in die neben den meteorologischen Bedingungen am Standort als relevante Bodenkennwerte die nutzbare Feldkapazität sowie die Luftkapazität eingehen. Wasserhaushaltsschichten sind besonders für niederschlagsarme Standorte (Jahresniederschlag < 600 mm/a) geeignet. Der Standort der Deponie weist eine mittlere jährliche Niederschlagsmenge von ca. 850 mm/a auf. Nachfolgend wird für die Wasserhaushaltsschicht am Standort Dorfweiher zur Berücksichtigung des höheren Niederschlags in Abweichung von der DepV eine Schichtmächtigkeit von 2,0 m angenommen.

Der Aufbau der Abdichtung KDB mit Wasserhaushaltsschicht erfolgt folgendermaßen (von unten nach oben):

- Ausgleichsschicht,  $d = 0,2 \text{ m}$
- Auflagerschicht,  $d = 0,1 \text{ m}$
- Kunststoffdichtungsbahn,  $d = 2,5 \text{ mm}$
- Geotextile Dränmatte
- Wasserhaushaltsschicht,  $d = 2,0 \text{ m}$

Die Gesamtdicke des Abdichtungssystems inkl. Ausgleichsschicht ergibt sich zu ca. 2,3 m. Zur Fassung des Deponiegases ist ein Entgasungssystem erforderlich.





**Abb. 5 Kunststoffdichtung mit Wasserhaushaltsschicht**

Die Kosten für eine Oberflächenabdichtung mit KDB mit Wasserhaushaltsschicht können wie folgt angesetzt werden:

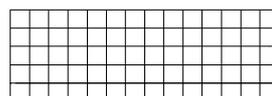
Planum herstellen	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
Ausgleichsschicht, d = 0,2 m	ca. 2,50 €/m <sup>2</sup>
Auflagerschicht, d = 0,10 m	ca. 2,00 €/m <sup>2</sup>
KDB, 2,5 mm	ca. 13,00 €/m <sup>2</sup>
Geotextile Dränmatte	ca. 6,50 €/m <sup>2</sup>
Wasserhaushaltsschicht, d = 2,0 m	ca. 18,00 €/m <sup>2</sup>
Begrünung	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
<b>Summe</b>	<b>ca. 44,00 €/m<sup>2</sup></b>
<hr/>	
Oberflächenabdichtung auf 12.400 m <sup>2</sup>	545.600 €
Geogitter auf 4.000 m <sup>2</sup>	24.000 €
<b>Summe OAD</b>	<b>569.600 €</b>

Vorteile:

- Durch den Einsatz einer Konvektionssperre sind Wasserzutritte sowie Gasaustritte im Bereich der Dichtung ausgeschlossen

Nachteile:

- Hohe Anforderung an den Rekultivierungsboden



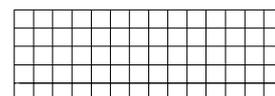
- Gewährleistung der Standsicherheit des Bodens in steilen Böschungen wegen der notwendigen lockeren Lagerung schwierig

#### 4.2.2.3 Kapillarsperre mit Wasserhaushaltsschicht

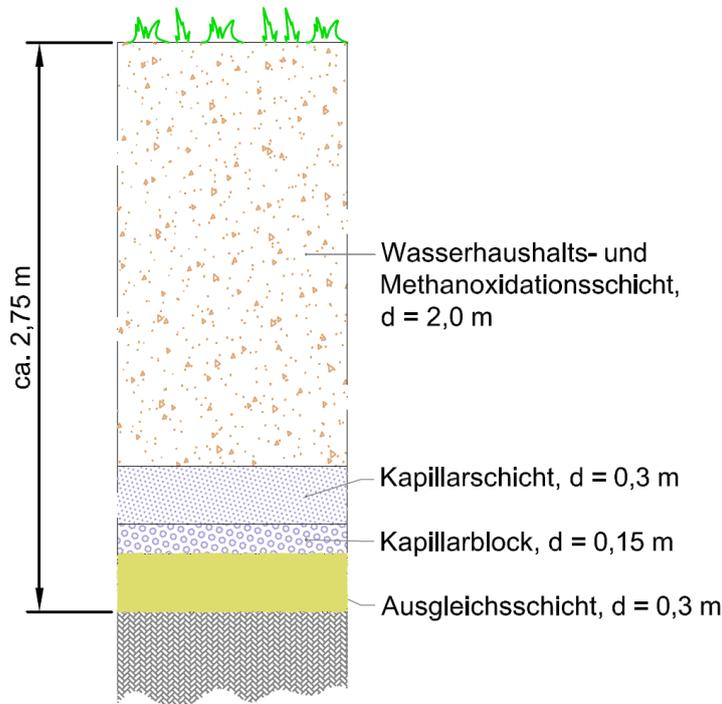
Die Kapillarsperre ist ein Zweischichtsystem, bestehend aus einer feinkörnigen Kapillarschicht mit 0,30 m Mächtigkeit über einem grobkörnigen Kapillarblock mit einer Dicke von 0,15 m. Sie wird als mineralische Abdichtungskomponente ausschließlich auf Böschungen eingesetzt. Die Wirkung der Kapillarsperre beruht auf sehr unterschiedlichen ungesättigten Wasserleitfähigkeiten der beiden Schichten in Abhängigkeit von den sich an der Schichtgrenze von feinem und grobem Material einstellenden Wassergehalten der Materialien. In dem feinkörnigen Material (z.B. Sand) stellt sich bei Zusi-ckerung von Wasser aus den Deckschichten in den kleineren Poren durch die im Po-rensensystem herrschenden Kapillarkräfte (Wasserspannung) ein höherer Wassergehalt ein als bei gleicher Wasserspannung in den gröbereren Poren im grobkörnigen Material (z.B. Kies). In der Kapillarschicht steht daher ein größerer wassergefüllter Fließquer-schnitt und eine höhere ungesättigte Wasserleitfähigkeit für den Wassertransport zur Verfügung als im Kapillarblock. Das Wasser muss am Böschungsfuß in Rohrleitungen gefasst und abgeleitet werden. Bei ausreichender Böschungsneigung wird das zusi-ckernde Wasser in der Kapillarschicht unter ungesättigten Bedingungen lateral in Rich-tung des Böschungsgefälles oberhalb des Kapillarblocks abgeführt. Das erforderliche Mindestgefälle, Böschungslänge und hydraulische Belastung ist im Einzelfall zu di-mensionieren. Mindestgefälle von 8° (1 : 7) wurden im Einzelfall realisiert, in der Regel sind steilere Neigungen für ein ausreichende Leistungsfähigkeit der Kapillarsperre er-forderlich. Der Abschnitt IV der Deponie Dorfweiher weist in der Böschung ein Gefälle von 1 : 2 und im Kuppenbereich zwischen 1 : 5 und 1 : 11 auf. Im Kuppenbereich liegt das vorhandene Gefälle unter den Anforderungen der GDA-Empfehlung E 2-33. Eine Umprofilierung des Abschnitts sollte im Zusammenhang mit den benachbarten Depo-nieabschnitten erfolgen und ist an diese anzupassen.

Durch die Kombination der Kapillarsperre mit einer Wasserhaushaltsschicht kann die Zusickerung zur Kapillarschicht minimiert werden. Die vertikale Durchsickerung der Kapillarsperre darf im fünfjährigen Mittel nicht mehr als 20 mm/a betragen. Nach DepV ist beim Einsatz ohne Konvektionssperre (KDB) ein mindestens 300 m<sup>2</sup> großes Kon-trollfeld einzurichten und bis zum Ende der Nachsorgefrist zu überwachen.

Die Bemessung der Wasserhaushaltsschicht hat entsprechend der Anmerkung im vo-rigen Kapitel zu erfolgen. Im System mit der Kapillarsperre kann die Wasserhaushalts-schicht als Methanoxidationsschicht genutzt werden. Das noch entstehende Deponie-restgas kann durch die Kapillarsperre migrieren und sich gleichmäßig im Rekultivie-



rungsboden verteilen. Die Gesamtdicke des Abdichtungssystems inkl. Ausgleichsschicht ergibt sich zu ca. 2,75 m.



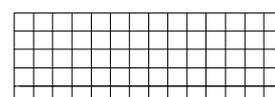
**Abb. 6 Kapillarsperre mit Wasserhaushaltsschicht**

Die Kosten für eine Oberflächenabdichtung mit Kapillarsperre mit Wasserhaushaltsschicht können wie folgt angesetzt werden:

Planum herstellen	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
Ausgleichsschicht, d = 0,3 m	ca. 3,00 €/m <sup>2</sup>
Kapillarsperre, d = 0,45 m	ca. 22,00 €/m <sup>2</sup>
Wasserhaushaltsschicht, d = 2,0 m	ca. 18,00 €/m <sup>2</sup>
Begrünung	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
<b>Summe</b>	<b>ca. 45,00 €/m<sup>2</sup></b>
Dränageleitung mit Abdichtung	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
Lysimeterfeld (1 Feld für das Gesamtsystem)	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
Betrieb Lysimeter über 30 a	ca. 1,00 €/m <sup>2</sup>
<b>Summe OAD + Lysimeter</b>	<b>ca. 48,00 €/m<sup>2</sup></b>
<b>Oberflächenabdichtung auf 12.400 m<sup>2</sup></b>	<b>595.200 €</b>

Vorteile:

- Abdichtungssystem aus mineralischen Materialien



- Bei passiver Entgasung keine Entgasungseinrichtung erforderlich

Nachteile:

- Höherer Profilierungsumfang
- Nur bei ausreichendem Gefälle des Systems wirksam
- Hohe Anforderungen an die einzubauende Rekultivierungsschicht
- Gewährleistung der Standsicherheit des Bodens in steilen Böschungen wegen der notwendigen lockeren Lagerung schwierig
- Bau und Überwachung eines Lysimetertestfelds notwendig
- Im Bereich von Tiefpunkten, an denen sich Dränagewasser sammelt oder weiter fließt, ist unterhalb der Kapillarsperre eine zweite Abdichtungskomponente einzubauen.

## 5 Kostenvergleich/Wirtschaftlichkeit

Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit sind neben den Kosten für das Oberflächenabdichtungssystem auch die Kosten der Stabilisierung sowie die Kosten, die sich aus der Behandlung von Deponiegas und Sickerwasser ergeben, zu betrachten. Entsprechend der in Kap. 4.2 vorgenommenen Unterscheidung werden nachfolgend das Emissionsverhalten sowie die daraus resultierenden Aufwendungen zusammengestellt. Die Kosten wurden auf der Grundlage eigener Erfahrung sowie Literaturwerten angesetzt.

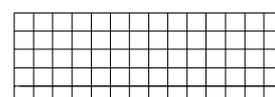
Hinsichtlich der Deponiegasproduktion wird von Stegmann et al.<sup>2</sup> ein Beschleunigungsfaktor infolge der aeroben in situ Behandlung, ausgedrückt als Kohlenstoffaustrag pro Zeiteinheit, von etwa 2 bis 3 gegenüber anaeroben Milieubedingungen beschrieben.

Hinsichtlich der Sickerwasserbelastung wird beschrieben, dass durch die aerobe in situ Behandlung über einen Zeitraum von 3 – 6 Jahren eine Beschleunigung der Konzentrationsabnahme beim

- CSB um einen Faktor 5-6 und
- Stickstoff um einen Faktor 4-11

---

<sup>2</sup> Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge FKZ 204 34 327, Schlussbericht März 2006



erwartet werden kann. Somit kann frühzeitig auf eine technisch aufwändige und kostenintensive Sickerwasserbehandlung verzichtet und eine Entlassung aus der Nachsorge erreicht werden.

### 5.1 Kostenansatz ohne In Situ Behandlung

Es wird davon ausgegangen, dass das Entgasungssystem über weitere 30 a zu betreiben ist. Für Betrieb, Wartung und Kontrolle des Entgasungssystems sind nach Stegmann für eine aktive Entgasung zwischen 8.000 und 12.000 €/a ha aufzuwenden. Unter Ansatz des unteren Wertes ergibt sich für eine Fläche von 1,24 ha ca. 10.000 €/a jährliche Kosten.

Für die Behandlung des Sickerwassers wird davon ausgegangen, dass sich nach Aufbringen der Oberflächenabdichtung die Sickerwassermenge reduziert. Von Puscher<sup>3</sup> wurde an zwei Deponien ermittelt, dass die Sickerwassermenge auf ca. 15 bis 20% der vorher anfallenden Sickerwassermenge zurückgeht. Für einen Zeitraum von 30 a wird von einem mittleren Sickerwasseranfall von ca. 500 m<sup>3</sup>/a und mittleren spezifischen Behandlungskosten von 40 €/m<sup>3</sup> nach Stegmann angesetzt. Damit ergeben sich für die Behandlung des Sickerwassers jährliche Kosten von ca. 20.000 €/a.

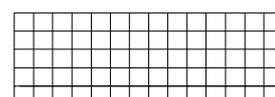
### 5.2 Kostenansatz mit In Situ Behandlung

Die Kosten für die Vorbehandlung wurden aus der Kostenübersicht Stand März 2016 des Landratsamts Konstanz entnommen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurden nur die Ansätze für Vorerkundung, Bau und Betrieb übernommen.

Es wird davon ausgegangen, dass das Entgasungssystem nur noch über 10 a zu betreiben ist. Für Betrieb, Wartung und Kontrolle der Variante aktive Entgasung werden aufgrund der geringeren Deponiegasmenge ca. 4.000 €/a angesetzt. Für die Variante passive Entgasung werden keine Betriebskosten angesetzt. Die Betriebskosten ergeben sich im Wesentlichen aus der Pflege der Rekultivierungsschicht, die im Rahmen der üblichen Pflege vorgenommen werden kann.

Für die Behandlung des Sickerwassers wird für einen Zeitraum von 30 a ein mittlerer Sickerwasseranfall von 500 m<sup>3</sup>/a und mittleren spezifischen Behandlungskosten von 10 €/m<sup>3</sup> nach Stegmann angesetzt. Damit ergeben sich für die Behandlung des Sickerwassers jährliche Kosten von ca. 5.000 €/a angesetzt.

<sup>3</sup> Puscher: Sickerwassermenge und -qualität nach der Oberflächenabdichtung, in Kranert (Hrsg.): Zeitgemäße Deponietechnik 2010



Für die jährlichen Kontrollmessungen mit dem Dichtungskontrollsystem werden für einen Zeitraum von 30 Jahren jährliche Kosten von ca. 3.000 €/a angesetzt.

Mögliche Kosteneinsparungen, die aus einer Verkürzung der Nachsorgedauer durch die In Situ Behandlung resultieren, werden hier nicht angesetzt.

## 6 Zusammenfassung

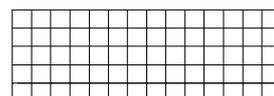
Zusammenfassend ergeben sich für die Abdichtung des 1,24 ha großen Abschnitts IV auf der Deponie Dorfweiher folgende Kosten für die unterschiedlichen Abdichtungsvarianten:

<b>ohne in situ Behandlung mit aktiver Entgasung</b>			
	<b>KDB + tonmin. Dichtung</b>	<b>KDB + Bentonitmatte</b>	<b>KDB + Trisoplast</b>
Oberflächenabdichtung	817.600	631.600	724.600
Invest Entgasung	100.000	100.000	100.000
Betrieb Entgasung	300.000	300.000	300.000
Betrieb Sickerwasserbehandlung	600.000	600.000	600.000
<b>Summe (netto)</b>	<b>1.817.600</b>	<b>1.631.600</b>	<b>1.724.600</b>

<b>mit in situ Behandlung</b>			
	<b>KDB + DKS mit Aktiventgasung</b>	<b>KDB + WHS mit Passiventgasung</b>	<b>Kapillarsperre + WHS</b>
In situ Behandlung	1.032.682	1.032.682	1.032.682
Oberflächenabdichtung	606.800	569.600	595.200*
Invest Entgasung	45.000	50.000	0
Betrieb Entgasung	40.000	0	0
Betrieb Sickerwasserbehandlung	150.000	150.000	150.000
Betrieb DKS	90.000		
<b>Summe (netto)</b>	<b>1.964.482</b>	<b>1.802.282</b>	<b>1.777.882</b>

\* Kosten inkl. Einrichtung und Betrieb Lysimeter

Bei der reinen Betrachtung des Abdichtungssystems liegen die Varianten Kapillarsperre mit Wasserhaushaltsschicht, KDB mit Wasserhaushaltsschicht, KDB mit DKS und KDB mit Bentonitmatte nahezu im gleichen Bereich zwischen 44 und 49 €/m<sup>2</sup>. Unter Berücksichtigung der Invest- und Betriebskosten der Entgasung ergibt sich als günstigstes Abdichtungssystem die Kapillarsperre mit Wasserhaushaltsschicht.



Mit Berücksichtigung aller angesetzten Kostenblöcke stellt die KDB mit Bentonitmatte ohne In situ Behandlung das günstigste System dar.

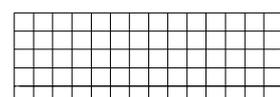
Bei den Systemen mit Wasserhaushaltsschicht ist zu beachten, dass diese in der Detailplanung für den Standort und die herrschenden Niederschlagsverhältnisse nachzuweisen ist.

Stuttgart, im April 2016

Dipl.-Ing. (FH) E. Haubrich  
*Geschäftsführer*

unter Mitarbeit von

i. A. Dipl.-Ing. C. Raschke



Pläne:

Plan 1	Übersichtslageplan	M 1 : 2.000
Plan 2	Schematischer Schnitt	M 1 : 250

