

# Beobachtungen und Rückschlüsse im Zusammenhang mit dem Gashaushalt der Deponie Georgswerder in Hamburg Wilhelmsburg

## 1. Allgemein

Im Zusammenhang mit dem Betrieb der Deponie Georgswerder werden anhand von Auswirkungen unterschiedlicher Luftdruckzustände Rückschlüsse auf die Gasbildung, den Gasinhalt und den Flüssigkeitsinhalt im Deponiekörper gezogen. Es wurde dabei deutlich, dass außer in dem gasgängigen Porenvolumen oberhalb des Stauflüssigkeitsspiegels auch erhebliche Gasmengen ungelöst in der Stauflüssigkeit eingeschlossen sind.

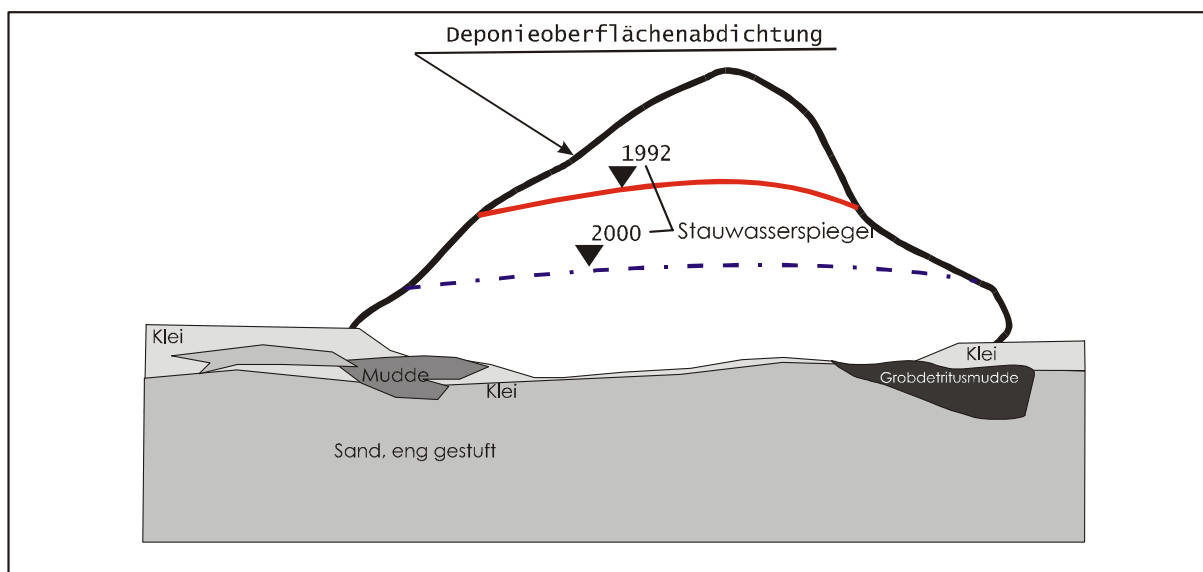


Bild 1: Schnitt durch die Deponie

Die Deponie Georgswerder wird seit ca. 25 Jahren nicht mehr beschickt und wurde zwischenzeitlich vollflächig mit einer Kombinationsdichtung abgedeckt. Unterhalb dieses Dichtsystems befindet sich eine Gasflächendränage, die jedoch nicht zur Entgasung genutzt wird. Die Gasabsaugung erfolgt ausschließlich über vertikale Gasbrunnen. Das dichtende Element der Abdeckung ist eine PEHD-Folie, die zur Vermeidung von schädlichen mechanischen Spannungen im oberen Bereich der Deponie an den horizontalen Trennstellen nicht verschweißt ist, sondern hier lediglich dachziegelartig überlappt. Es hat sich gezeigt, dass diese Trennstellen für Gas bzw. Luft eine relativ gute Durchlässigkeit aufweisen.

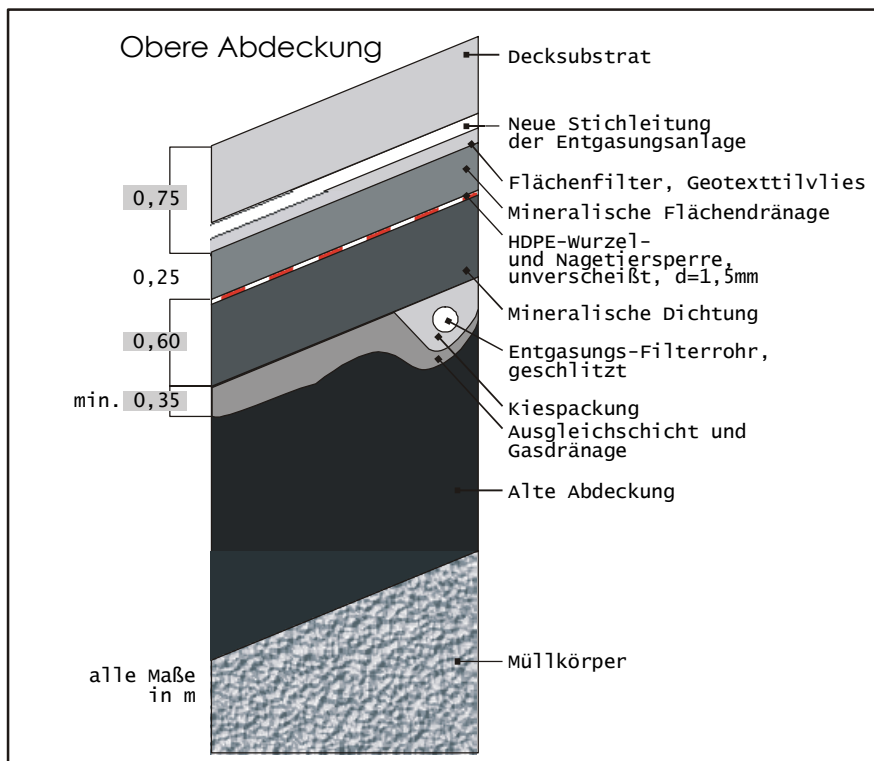


Bild 2: Aufbau der Deponieabdeckung

## 2. Beobachtungen

Schon seit längerem wird beobachtet, dass von den Luftdruckschwankungen Auswirkungen auf den Gas- und Flüssigkeitshaushalt der Deponie ausgehen. So tritt in der Deponie bei steigendem Luftdruck ein Unterdruck zur Umgebungsluft hin auf und die Gaskonzentrationen in der Gasflächendränage unterhalb der Deponieabdeckung nehmen ab. Auch bei abgeschalteter Entgasungsanlage kam es oft vor, dass in dieser Dränage ein Unterdruck bestand und reine Luft anzutreffen war. Bei fallendem Luftdruck kehrt sich dieses Verhalten um und es ist Deponiegas anzutreffen. Darüber hinaus sind auch in den Flüssigkeitspegeln Auswirkungen der Luftdruckschwankungen festzustellen: Bei zunehmenden Luftdruck sinken die Pegelstände und bei fallendem Luftdruck steigen sie wieder an. Es wurde auch festgestellt, dass benachbarte aber unterschiedlich tief verfilterte Pegel voneinander abweichende Pegelstände aufweisen. Einige Pegelbrunnen weisen eine deutliche jahreszeitliche Abhängigkeit auf. Wieder andere Pegelbrunnen weisen ein artesisches Verhalten auf.

### 3. Zusammenhänge und Folgerungen

#### 3.1 Das Porenvolumen als Behälter

Das Porenvolumen der Deponie wird größenordnungsmäßig bis zur Hälfte des Deponievolumens eingeschätzt. Dieses freie Volumen wiederum ist etwa zur Hälfte mit kapillar gebundener Flüssigkeit belegt. Die verbleibenden 25% sind entweder mit gasförmiger Atmosphäre oder mit Flüssigkeit gefüllt. Es ist davon auszugehen, dass unterhalb des sogenannten Stauflüssigkeitsspiegels noch rottungsfähiges Material vorhanden ist und daher auch hier noch Deponiegas entsteht. Da das hier entstandene Gas, nicht wie in einem See, sehr schnell in Form von Gasbläschen nach oben hin aufsteigen kann, wird entsprechend mehr Flüssigkeit verdrängt. Die Deponie ist gewissermaßen ein Pufferbehälter, dem durch die Verrottung ständig Gas zugeführt wird, das letztendlich wieder entweicht oder entzogen wird.

#### 3.2 Einflüsse der Luftdruckschwankungen

Zeichnet man die Differenzdruckschwankungen zwischen dem gasgängigen Porenraum und der freien Atmosphäre auf und vergleicht diese mit der Ganglinie des Luftdrucks, wird deutlich, dass hier eine Abhängigkeit besteht (siehe Bild 3). Sinkender Luftdruck bewirkt in der Deponie gegenüber der freien Atmosphäre einen Gasüberdruck, steigender Luftdruck dagegen einen Unterdruck.

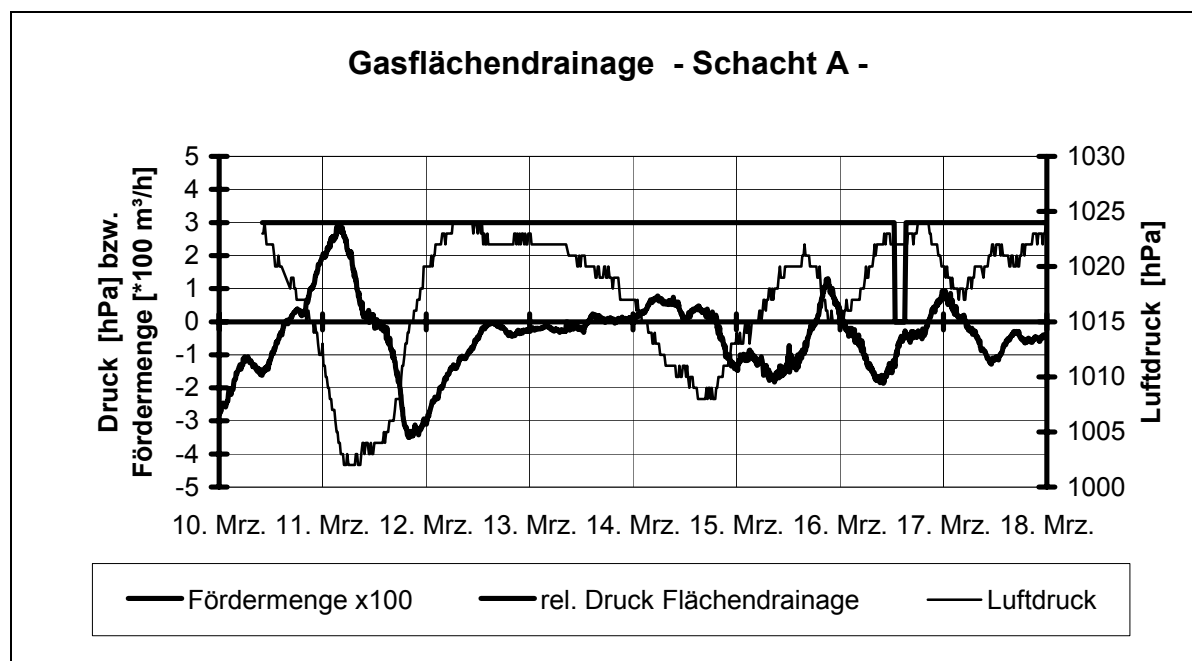


Bild 3: Luft- und Gasdruck vom 10.3. bis 18.3.2000

Da die Gasströmung dem Druckgefälle folgt, entweicht das Deponiegas hauptsächlich bei fallendem Luftdruck. Die Deponieabdeckung weist für Deponiegas eine relativ hohe Durchlässigkeit auf. Es wurde festgestellt, dass bei einem an den Gasbrunnen gemessenen Überdruck von 1 hPa etwa 300 m<sup>3</sup> Deponiegas stündlich entweichen.

Es sind Rückschlüsse möglich, wenn zwischen der Umgebungsluft und dem Porenraum der oberen Deponieschichten ein Druckausgleich besteht. Bei diesem Zustand entweicht praktisch kein Gas aus der Deponie und es dringt auch keine Luft von außen ein. Die Deponie kann dann wie ein geschlossener Behälter betrachtet werden. Steigt der Luftdruck mit genügender Intensität an, sind im Deponiekörper auch bei abgeschalteter Gasabsaugung durchaus Unterdrücke zu verzeichnen, so dass Luft in die Deponie eindringt. Bei einer Gasbildungsrate von 200 m<sup>3</sup>/h und einem gasgängigen Porenvolumen von 1 Mio. m<sup>3</sup> in der Deponie wird sich dieser Unterdruck schon ab einer Luftdrucksteigerungsrate von ca. 0,2 hPa/h einstellen, denn eine Gasproduktionsrate von 200 m<sup>3</sup>/h bewirkt bei diesem Volumen und 1000 hPa Absolutdruck ebenfalls eine Drucksteigerung von 0,2 hPa/h. Wenn der atmosphärische Luftdruck schneller steigt als der Druck innerhalb der Deponie, verschiebt sich das Druckgefälle entsprechend. Dem zu Folge besteht im oberen Bereich der Deponie eine Übergangszone mit wechselnden Gaszusammensetzungen. Dies war auch der Grund weshalb die Förderung nutzbaren Gases über die unmittelbar unter der Deponieabdeckung befindliche Gasflächendränage scheiterte.

Bei konstanter Fahrweise der Entgasungsanlage mit einer Förderrate, die der Gasbildungsrate nahe kommt, wird diese Übergangszone zum Puffervolumen, d.h. bei steigendem Luftdruck füllt sich dieses Volumen von außen her mit Luft auf und drückt das Gas zurück. Fällt der Luftdruck wieder, wird das drückende Gas vom Inneren der Deponie her zuerst diesen Raum auffüllen. Nur relativ selten, bei stark ausgeprägten Luftdruckfall, wird Deponiegas bei einer angepassten Förderrate aus der Deponie entweichen. Wie in Bild 4 zu erkennen ist, nimmt bei fallendem Luftdruck der Sauerstoffgehalt ab, der Kohlendioxidgehalt steigt an und erst danach tritt Methan auf. Dies lässt den Rückschluss zu, dass in den oberen Müll- bzw. Abfallschichten mit dem vorher eingedrungenen Sauerstoff ein aerober Abbau stattgefunden hat. Entsprechend deutet das nur kurzfristig und in geringer Konzentration auftretende Methan auf eine Übersaugung hin, die Übergangszone ist gewissermaßen in die Deponie hinein verschoben. Wird weniger Gas abgesaugt, verschiebt sich dieser Bereich nach außen hin, so dass insgesamt mehr Gas aus der Deponie entweichen wird. Damit dringt Luftsauerstoff aber auch seltener bis zu rottungsfähigem Material vor.

Das Verhältnis des Puffervolumens zum gesamten gasgängigen Porenvolumen verhält sich größenordnungsmäßig wie die Schwankungsbreite des Luftdrucks zum mittleren Luftdruck, d.h. das Puffervolumen macht etwa. 5% des gesamten gasgängigen Porenvolumens aus. Dieser Mechanismus ist ganz allgemein auf die Erdoberfläche übertragbar, wenn zwischen dem gasgängigen Porenvolumen des Untergrundes und der Erdatmosphäre eine Wegigkeit besteht. Vergleicht man die Methankonzentrationen aus der Gasförderung mit der Luftdruckganglinie, wird auch hier ein Zusammenhang deutlich. Dabei geht von einer Steigerung des Luftdrucks mit einer gewissen Verzögerung eine leichte Verminderung der Methankonzentration aus.

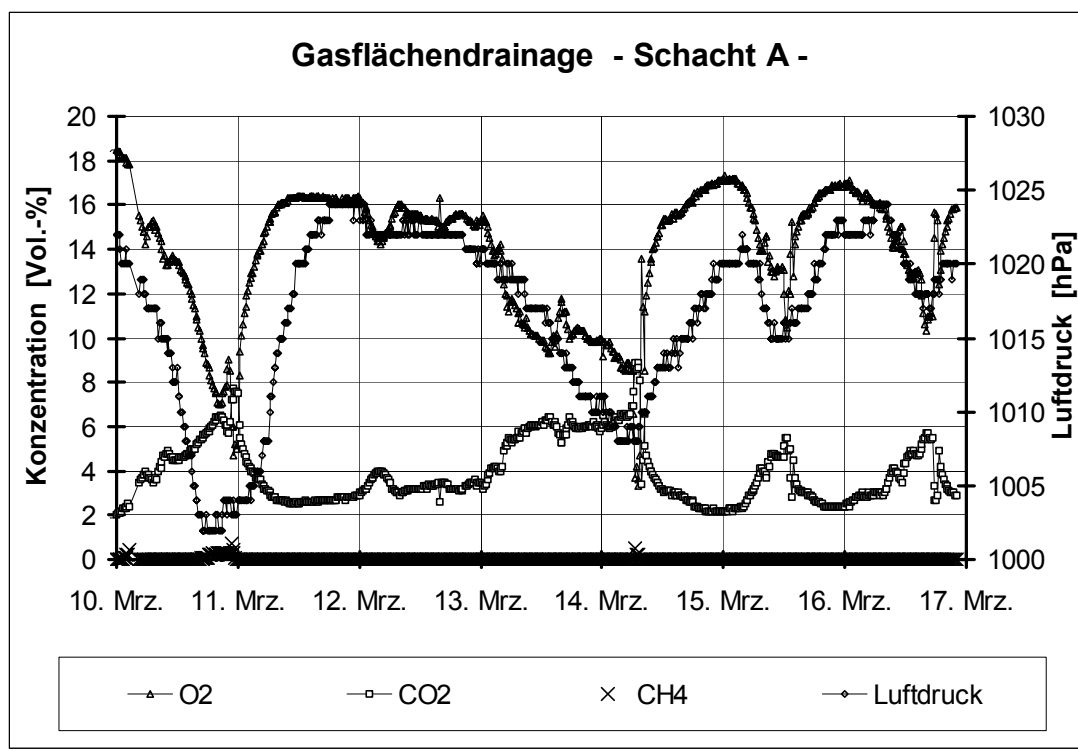


Bild 4: Zusammenhang zwischen Gaskonzentrationen und Luftdruck vom 10.3. bis 18.3.2000

Auf Grund der festgestellten Zusammenhänge kann gesagt werden, dass auf der Deponie Georgswerder mit der bestehenden Gasabsaugung bei konstanter und angepasster Förderrate durch das Puffervolumen kaum Gas an die Umwelt entweicht. Um ein Entweichen von Deponiegas praktisch vollständig zu unterbinden, müsste die Absaugung unterdruckabhängig geregelt werden. Dies hätte jedoch stark schwankende Förderraten zur Folge. Bei stark fallendem Luftdruck müsste ein Vielfaches der Gasneubildungsrate abgesaugt werden und bei stärker steigendem Luftdruck würde keine Förderung mehr stattfinden. Die Nutzung des Gases wäre durch die schwankenden Förderraten praktisch nicht mehr möglich. Eine derart konzipierte Anlage bietet jedoch für Schutzentgasungen

Vorteile gegenüber Anlagen mit einer konstantern Förderrate. Damit könnte auch ohne eine totale Übersaugung ständig ein Unterdruck und so mit auch ein gleichgerichtetes Druckgefälle aufrechterhalten werden. Dies würde eine entsprechende Gasströmung (z.B. von einer Bebauung weg) gewährleisten.

Bei der Auswertung von Aufzeichnungen über Deponiegasvorkommen wurde sehr schnell deutlich, dass insbesondere am Ende von Phasen mit fallendem Luftdruck Gas festgestellt wurde. Mit der Abnahme des Luftdrucks dehnt sich das Gas aus. Dieser Zusammenhang ist bei der Suche von Deponiegas aber z.B. auch bei der Beprobung von Bodenluft von Bedeutung. Umgekehrt wirkt sich steigender Luftdruck günstig für den Arbeitsschutz z.B. bei der Besteigung von Deponieschächten und ggf. auch von Kanalisationschächten aus.

Die Gas- bzw. die Luftmenge, die aus der Deponie entweicht oder hineinströmt, ist von der Höhe des Über- bzw. Unterdrucks abhängig. Durch diese Gas- bzw. Luftströmung teilen sich die Luftdruckschwankungen dem Absolutdruck in der Deponie mit und wirken sich daher auch auf die in der Stauflüssigkeit befindlichen Gaseinschlüsse aus. Mit den Gas- bzw. Luftbewegungen werden die entsprechenden Feuchtigkeitsgehalte in Form von Wasserdampf mit verlagert.

### **3.3 Druckverhältnisse innerhalb des Deponiekörpers**

Zwischen den einzelnen Gassonden wurden Druckabweichungen in einer Größenordnung 1/10 hPa festgestellt. Dies deutet auf eine hohe Gasdurchlässigkeit hin. Ob die gute Durchlässigkeit vom Müllkörper selbst ausgeht, ist unklar, möglicherweise tragen die bei der Aufschüttung der Deponie eingebauten Schotterstraßen zum Druckausgleich bei. Darüber hinaus wird auch die vollflächige Gasflächendränage unter der Deponieabdeckung dazu beitragen. Unterhalb des Stauflüssigkeitsspiegels (ca. acht Meter über der Deponiesohle) ist eine geringere Durchlässigkeit für Deponiegas zu erwarten. Bei Bohrungen im Deponiekörper wurden vereinzelt erhebliche Überdrücke festgestellt, die zwar nicht gemessen werden konnten, aber an Hand der aufgetretenen Austrittsgeräusche dürften sie schon im Bereich von über einem bar gelegen haben. In einem Fall wurde eine Bohrung im Südwesten der Deponie mit einer Bohrschnecke bis unterhalb der Deponie in den ersten Grundwasserleiter niedergebracht. Nach dem die Weichschichten durchdrungen waren und die Bohrschnecke mit dem Bohrgutpfropfen gezogen wurde, gab es einen heftigen Knall der von dem sich plötzlich entspannenden Gas ausging. Anschließend war noch mehr als eine halbe Stunde eine heftige Geräuschentwicklung aus dem Bohrloch zu vernehmen. Diese Beobachtung belegt, dass das Gas nicht zwangsläufig nach oben steigt, sondern den Weg des geringsten Widerstands nimmt.

Im Bereich einer tiefliegenden „Deponiegasblase“, wo sich ständig neues Gas bildet, wird sich in Folge von Strömungswiderständen ein höherer Druck aufbauen, als er sich lediglich aus der Addition des herrschenden Luftdrucks und des ggf. überlagernden hydrostatischen Drucks ergibt. Durch den höheren Druck verringert sich die Kompressibilität und damit die von den Luftdruckschwankungen ausgehenden Volumenänderungen. Darüber hinaus wird eine geringere Durchlässigkeit zu den tiefliegenden Gaseinschlüssen hin die Druckschwankungen zusätzlich dämpfen. Der Anteil des (hydrostatischen) Drucks, der von der Flüssigkeitssäule ausgeht, verringert sich im Zusammenhang mit den Gaseinschlüssen und ist damit geringer als es von der Höhenlage des Stauflüssigkeitsspiegels her eigentlich zu erwarten ist. Unter dem Stauflüssigkeitsspiegel ist die tatsächliche Oberkante der im Deponiekörper anstehenden freien Flüssigkeit zu verstehen.

### **3.4 Flüssigkeitsstände in Pegelbrunnen**

Einer weiteren Beobachtung nach weisen flach verfilterte Pegel häufig einen höheren Flüssigkeitsstand auf als tief verfilterte. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass im Porenraum des Deponiekörpers unterhalb des Stauflüssigkeitsspiegels Gas eingeschlossen ist und der hydrostatische Druck geringer ist als bei einer gleich hohen Flüssigkeitssäule ohne Gaseinschlüsse, vergleichbar mit einem U-Rohr-Manometer, das mit Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte gefüllt ist. Häufig reicht die Filterstrecke eines tief verfilterten Pegels bis über den Stauflüssigkeitsspiegel heraus. Auch in diesen Brunnen ist ein niedrigerer Flüssigkeitsstand gegenüber dem benachbarten Stauflüssigkeitsspiegel zu erwarten. Dem entsprechend besteht ein Gefälle von der umgebenden Stauflüssigkeit zum Pegel hin. Dadurch strömt Flüssigkeit in den Pegelbrunnen und hebt den Flüssigkeitsspiegel in diesem Brunnen an, bzw. in der Umgebung des Pegels sinkt der Stauflüssigkeitsspiegel. Es wird sich in einem Gleichgewichtszustand eine Art Saugkegel einstellen. Einen derartigen Pegelstand mit der anteiligen Höhe des realen Flüssigkeitsanteils der gasdurchsetzten Stauflüssigkeitssäule gleichzusetzen, würde einem zu hohen Wert entsprechen. Bei einem Brunnen, der nur am seinem unteren Ende verfiltert ist, besteht die Gefahr, dass drückendes Deponiegas den Pegelstand anhebt.

### **3.5 Flüssigkeitsschwankungen in Pegelbrunnen – luftdruckbeeinflusst**

Pegelschwankungen, die mit der Luftdruckganglinie korrespondieren (siehe Bild 5), sind ein Hinweis darauf, dass unterhalb des Stauflüssigkeitsspiegels Gaseinschlüsse vorhanden sind.

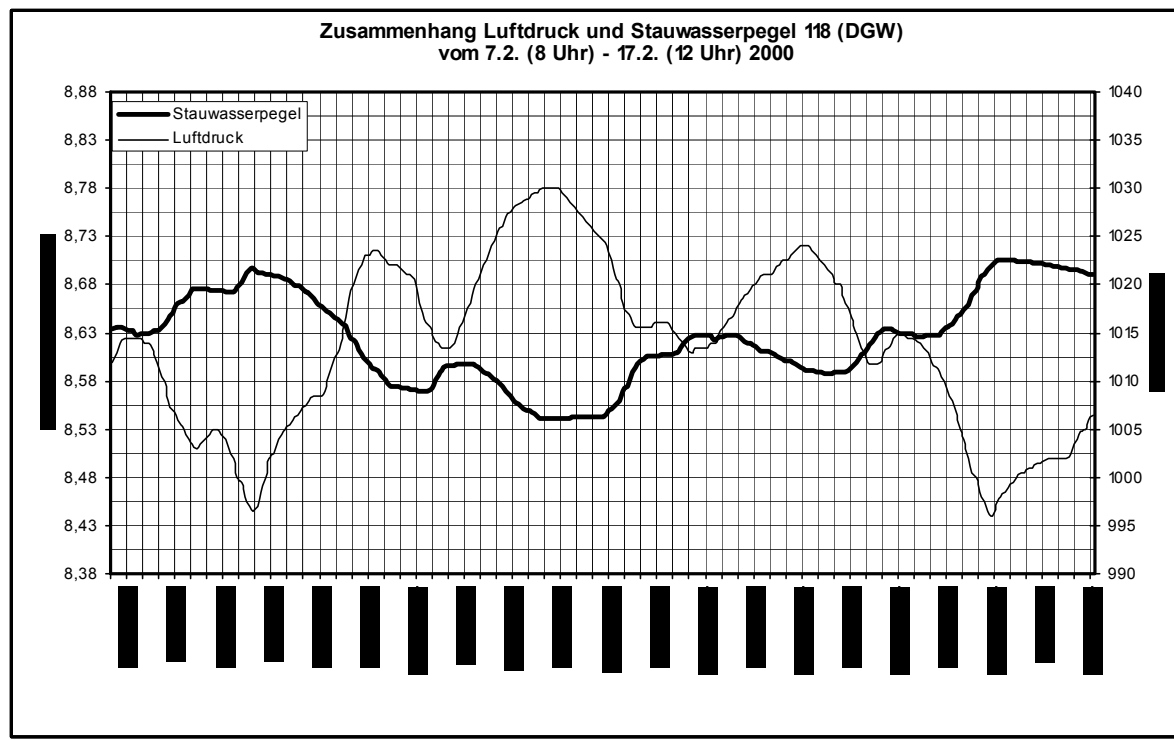


Bild 5: Luftdruck und Pegelstand

Im Einklang mit den Luftdruckschwankungen werden in der Deponie bei praktisch allen Stauflüssigkeitspegeln Schwankungen des Flüssigkeitsspiegels festgestellt. Da Flüssigkeiten weitgehend inkompressibel sind, kann die beim Anstieg des Luftdrucks zurückweichende Flüssigkeit nur dort hin verschoben werden, wo vorher keine Flüssigkeit vorhanden war. Dabei kann es sich um Gasblasen handeln oder auch um einen gasgefüllten Bereich, der nach unten hin vom Stauflüssigkeitsspiegel und nach oben hin von dichtenden Abdeckschichten eingegrenzt ist. Dem inneren Druck solcher „gefangenen Räume“ steht ein äußerer Druck gegenüber. Ein Teil dieses äußeren Drucks ist der (schwankende) Luftdruck. Es ist grundsätzlich möglich, an Hand der Schwankungen des Stauflüssigkeitsspiegels, die von Luftdruckänderungen ausgehen, eine Abschätzung der in der Stauflüssigkeit vorhandenen gasförmigen Einschlüsse vorzunehmen. Ist ein derart gefangener Raum nach oben hin nicht vollständig dicht, wird der Stauflüssigkeitsspiegel in Folge einer Luftdruckänderung reagieren, sich aber bei anschließendem konstanten Luftdruck wieder egalalisieren. Dieser Mechanismus, der letztlich auf unterschiedliche Strömungswiderstände zurückzuführen ist, dürfte auch außerhalb von Deponien zu beobachten sein.

Es hat sich gezeigt, dass die größeren Pegelschwankungen eher bei tief verfilterten Brunnen zu verzeichnen sind, als bei solchen, die flach verfiltert sind. Eigentlich müsste es umgekehrt sein, da sich unter den flach verfilterten Pegeln eine höhere Flüssigkeitssäule mit den entsprechenden Gaseinschlüssen befindet. Eine Erklärung für die entgegengesetzten



Beobachtungen könnte sein, dass durch die mächtige Überdeckung bei einem tief verfilterten Brunnen Luftdruckschwankungen sich zumindest kurzfristig praktisch nur über den (zur Atmosphäre offenen) Pegelbrunnen auf die tiefliegenden Gaseinschlüsse auswirken können. So bewirkt z.B. ein Luftdruckanstieg in diesem Fall nur ein Zurückdrücken der Flüssigkeit aus dem Brunnenrohr zu den Gaseinschlüssen hin. Durch die tiefe Verfilterung besteht gewissermaßen eine „Wasservorlage“ über die sich die Luftdruckschwankungen auf das Gaspolster auswirken. Dabei wurden Änderungen des Pegelstandes beobachtet, die das Ausmaß der Luftdruckänderung erreichten, so gingen bei einem Luftdruckanstieg von 30 hPa, dies entspricht 30 cm Wassersäule, Pegelstände um fast dieses Maß zurück. Dabei wird praktisch nur die Menge Flüssigkeit in den Deponiekörper zurückgedrückt, die das Volumen des veränderten Flüssigkeitsstands im Brunnen ausmacht. Dies bewirkt bei einem größeren Gaspolster aber nur einen entsprechend geringfügigen Druckanstieg. Daher sind solche Pegelschwankungen eher als Barometer als zur Abschätzung von Gaseinschlüssen verwertbar. Ein flach verfilterter Brunnen dagegen, der gerade eben in den Stauflüssigkeitsspiegel hineinführt und dessen Filterstrecke bis über die Stauflüssigkeit hinausreicht, spiegelt den tatsächlichen Stand der Stauflüssigkeit wieder, denn die Luftdruckschwankungen gelangen nur bis an den Stauflüssigkeitsspiegel und nicht ungehindert über die Flüssigkeitssäule des Brunnens bis in das Deponieinnere. Es besteht über einen flachen Brunnen keine direkte Verbindung zu tiefliegenden Schichten. Damit kann es auch nicht zu den Verfälschungen der tatsächlichen Stauflüssigkeitsschwankungen durch das oben geschilderte Verdrängungsverhalten in tiefliegende Bereiche hinein kommen. Auch Verfälschungen, die von den unter 3.3 geschilderten erhöhten Gasdrücken ausgehen, können bei einem derartigen Pegelbrunnen ausgeschlossen werden. Das gleiche gilt für Einflüsse durch einen verminderten hydrostatischen Druck.

### **3.6 Flüssigkeitsschwankungen in Pegelbrunnen – jahreszeitlich temperaturbeeinflusst**

In der Deponie befinden sich sogenannte Flüssigkeitsbecken, in denen flüssiger Industriemüll mit hohen Ölanteilen eingelagert wurde. Um eine gewisse Standfestigkeit zu erreichen, wurden auch feste Müllfraktionen mit eingebracht. Eines dieser Becken befindet sich am Rande der Deponie, unmittelbar unter der Deponieoberfläche. Der Stauflüssigkeitsstand steht in diesem Becken bis dicht unter der Oberfläche an. Bei der Auswertung der punktuell festgestellten Pegelstände wurde eine jahreszeitliche Abhängigkeit deutlich. Zum Ende des Winters sind die Pegelstände deutlich niedriger als im September (siehe Bild 6). Es deutet sich an, dass hier ein Zusammenhang zwischen der Untergrundtemperatur und den biologischen Vorgängen zur Gasbildung besteht, und der daraus resultierende Überdruck den Flüssigkeitsspiegel im Pegel entsprechend anhebt. In einem anderen Bereich dieser Flüssigkeitsbecken weisen einige Pegelbrunnen artesische Merkmale auf, wobei hier

eine jahreszeitliche Abhängigkeit nicht zu erkennen ist. Als Ursache des Überdrucks wird auch hier die Gasbildung vermutet.

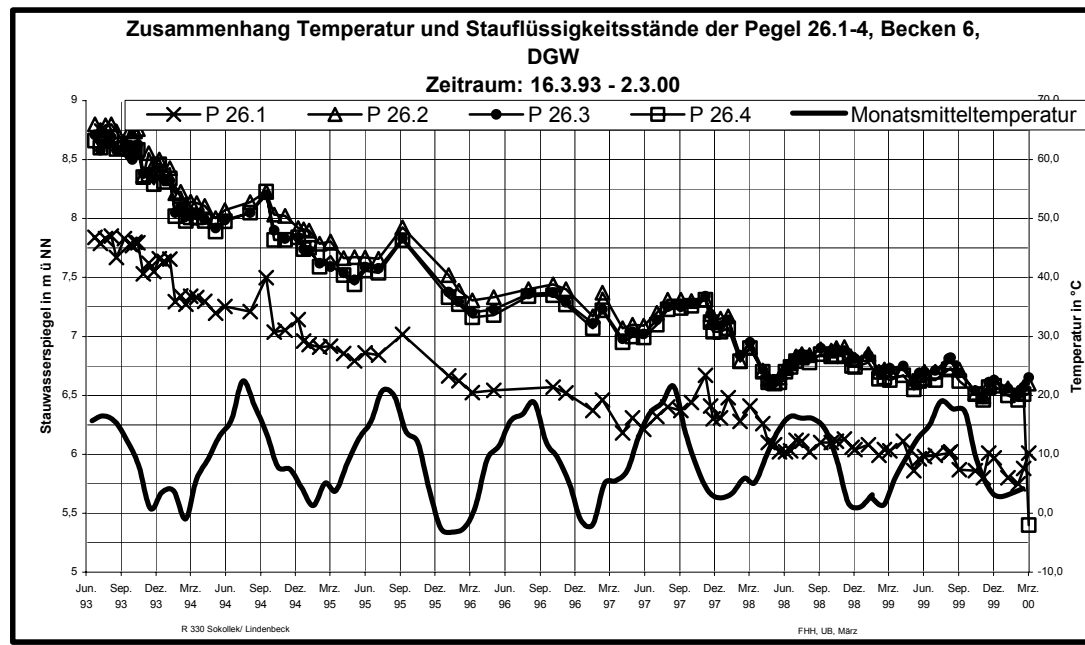


Bild 6: Staflüssigkeitsstände der Pegel 26.1-4 von Juni 93 bis März 2000

#### 4. Ermittlung von Gasbildungsraten und Gasvolumen

##### 4.1 Die Gasbildungsrate

Zur Ermittlung der Gasproduktionsrate wurde die Gasförderrate so lange angepasst, bis sich bei Situationen gleichbleibenden Luftdrucks zwischen der Deponie und der umgebenden Luft ein Druckausgleich einstellte. Bei diesem Zustand strömt kein Gas aus, bzw. es gelangt keine Luft in die Deponie. Die Gasförderrate entspricht nun der Gasbildungsrate. Deponiegas mit der Zusammensetzung von 60 Vol.-% Methan und 40 Vol.-% Kohlendioxid hat ein Molgewicht, das dem von Luft entspricht. Bei der aktuellen Gasproduktionsrate von 180 m<sup>3</sup>/h verlassen damit täglich 5.600 kg Materie den Deponiekörper - bzw. 2000 t/Jahr.

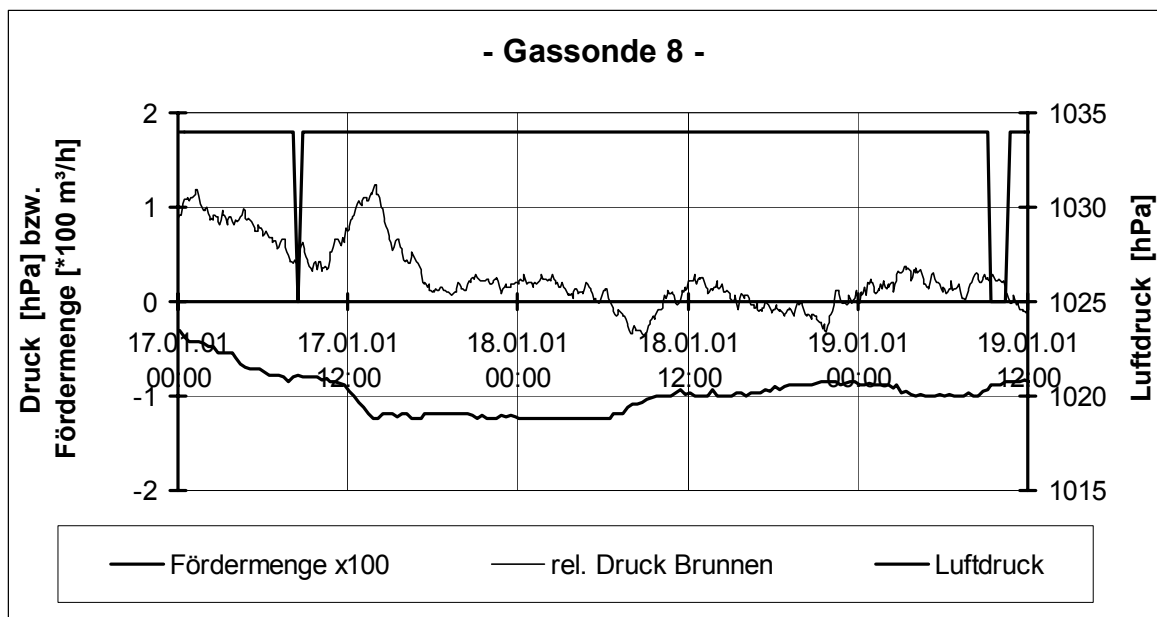


Bild 7: Druckausgleich bei konstantem Luftdruck und angepasster Gasabsaugung

In der Darstellung – Bild 7 pendelt der relative Gasdruck in der zum Gasfördersystem hin abgeschotteten Gassonde Nr. 8 etwa ab dem 17.01.01 – 18 Uhr um Null. Gleichzeitig ist der barometrische Luftdruck über ca. zwei Tage praktisch konstant. Damit entspricht die Gasbildungsrate der Gasfö derrate von 180 m<sup>3</sup>/h. Es zeigte sich, dass bei dieser Fö derrate der Methangehalt über längere Zeiträume stabil blieb. Dagegen nahm der Methangehalt bei einer mittleren Gasfö derrate von ca. 210 m<sup>3</sup>/h im Laufe eines Monats kontinuierlich von 62 auf 57 Vol-% ab.

#### 4.2 Das Gasvolumen innerhalb der Staflüssigkeit

Der Rückschluss auf die Gaseinschlüsse beruht auf den von den Luftdruckveränderungen ausgehende Intensität der Schwankungen des Staflüssigkeitsspiegels. Dabei werden die aufgezeichneten Ganglinien des Staflüssigkeitsspiegels in Verbindung mit der Änderung des Luftdrucks zur Berechnung des in der Flüssigkeitssäule eingeschlossenen Gasvolumens verwendet. Die Gaseinschlüsse sind im Bereich der Staflüssigkeit zusätzlich einem hydrostatischem Druck ausgesetzt (siehe auch unter 3.3). Durch den von der Flüssigkeitssäule ausgehenden hydrostatischen Druck erhöht sich im Bereich der Staflüssigkeit der Absolutdruck. Damit vermindert sich die Kompressibilität der Gasblasen entsprechend. Eine weitere Druckerhöhung kann von der Gasbildung ausgehen.

Die kontinuierlich aufgezeichneten Pegelstände der verfügbaren Brunnen weisen eine relativ starke Beeinflussung durch die Luftdruckganglinie auf. Die unter 3.5 aufgeführten Schwankungen in Pegelbrunnen bis hin zur Größe der jeweiligen Luftdruckänderung können

nicht mit den tatsächlichen Schwankungen des Stauflüssigkeitsspiegels übereinstimmen, denn bei einer Luftdruckänderung von 30 hPa beträgt die theoretisch größtmögliche Schwankung bei einem mittleren Pegelstand von 8 m etwa 24 cm (wenn die umliegende Flüssigkeitssäule zu 100 % aus Gaseinschlüssen bestünde). Die festgestellte Schwankung von 30 cm ist damit zu erklären, dass sie auf die unter 3.5 beschriebenen Verfälschungen zurückzuführen ist. Es hat den Anschein, dass ein Großteil der Pegelbrunnen diesen Verfälschungen unterliegt. Eine Aussage über die tatsächliche Schwankungsbreite ist mangels geeigneter Pegel schwierig. Geht man davon aus, dass die tatsächlichen vom Luftdruck ausgehenden Stauflüssigkeitsschwankungen im Mittel größenordnungsmäßig ein Viertel der Luftdruckänderungen ausmachen, so würde z.B. bei einer Luftdrucksteigerung von 1000 hPa auf 1020 hPa der Stauflüssigkeitsspiegel um etwa 5 cm zurückweichen. Bei der o.a. mittleren Höhe des Stauflüssigkeitsspiegels und einem angenommenen mittleren hydrostatischen Vordruck von 200 hPa errechnen sich die Gaseinschlüsse von dieser 8 m hohen Flüssigkeitssäule nach dem „Boyle-Mariottesche Gesetz“ wie folgt:

$p_2 / p_1 = v_1 / v_2$ ; das Volumen „V“ ist proportional zur Höhe „h“, dementsprechend ist:

$$p_2 / p_1 = h_1 / h_2 = h_1 / (h_1 - \Delta h) \quad \text{es gilt: } h_2 = h_1 - \Delta h$$

$$(h_1 - \Delta h) p_2 / p_1 = h_1$$

$$h_1 - \Delta h = h_1 p_1 / p_2$$

$$h_1 (1 - p_1 / p_2) = \Delta h$$

$$h_1 = \Delta h / (1 - p_1 / p_2)$$

somit ist die Ausgangshöhe „h<sub>1</sub>“ der insgesamt eingeschlossenen Gassäule =

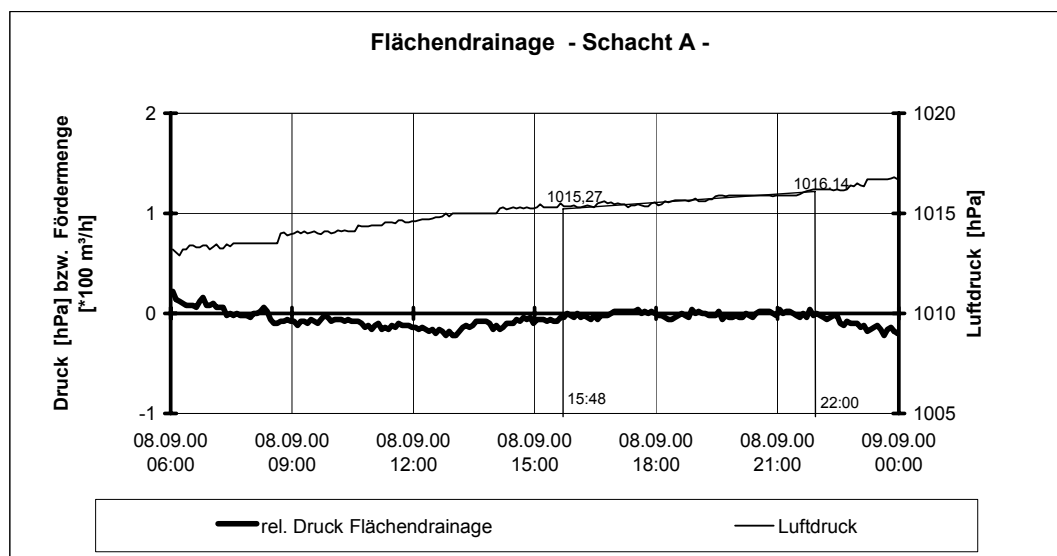
$$0,05 \text{ m} / (1 - 1200 \text{ hPa} / 1220 \text{ hPa}) = \underline{\underline{3,05 \text{ m}}}$$

Da diese von Gas durchsetzte Flüssigkeitssäule sich im Deponiekörper befindet, macht sie wie unter 3.1 dargelegt nur etwa 25 % des Volumen des Deponiekörpers unterhalb des Stauflüssigkeitsspiegels aus. Diese Berechnung ist selbstverständlich nur eine Überschlagsrechnung, aber es wird deutlich, dass auch unter dem Stauflüssigkeitsspiegel ein erheblicher Teil des Porenraumes mit Gas gefüllt ist. Damit ist entsprechend weniger Stauflüssigkeit vorhanden.

### 4.3 Das Gasvolumen in der Deponie

Wenn bei abgeschalteter Gasförderung kein Gas aus der Deponie entweicht und keine Luft eindringt, findet in der Deponie eine Drucksteigerung statt, die nur von der Gasbildungsrate ausgeht. Zur Ermittlung dieser Drucksteigerung wurde der Luftdruck und der Differenzdruck zur Umgebungsluft so lange aufgezeichnet, bis eine Situation gefunden wurde, bei der zwischen der Deponie und dem umgebenden Luftdruck über einen gewissen Zeitraum ein Druckausgleich bestand (siehe Bild 8). Bei dieser Situation stimmt der Gradient des Druckanstiegs im Deponiekörper mit dem der umgebenden Atmosphäre überein. Mit der ermittelten Gasbildungsrate (unter 4.1 beschrieben) und der davon ausgehenden

Drucksteigerungsrate besteht nun die Möglichkeit, das gasgängige Porenvolumen zu berechnen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei dieser Berechnung die in der Staufflüssigkeit eingeschlossenen „Gasblasen“ nicht, wie unter 4.2 beschrieben, mit einem erhöhten Vordruck in das Ergebnis eingehen. Zusätzlich wird dabei auch der dämpfende Einfluss von Strömungswiderständen vernachlässigt. Damit ist das tatsächliche Gasvolumen etwas größer als das berechnete Volumen. Die mit der Druckerhöhung einhergehende Erhöhung der Löslichkeit von Gas in Flüssigkeit ist bei diesen Drucksteigerungen vernachlässigbar gering.



**Bild 8:** Druckausgleich bei steigendem Luftdruck ohne Gasentnahme

Überschlagsrechnung zum gesamten gasgängigen Deponievolumen:

Vom neu entstehenden Gas geht eine Drucksteigerung aus, dabei werden die Temperatur und das Deponievolumen als konstant angesehen und die Zustände werden wie folgt definiert:

Es gilt die „Allgemeine Gasgleichung“:

$$\text{Zustand 1} = p_1 \times V = m_1 \times R \times T$$

$$\text{Zustand 2} = p_2 \times V = m_2 \times R \times T$$

Daraus folgt:

$$p_1 / p_2 = m_1 / m_2 = V_1 \times \delta / V_2 \times \delta$$

$$p_2 / p_1 = V_2 / V_1 = (V_1 + \Delta V) / V_1 = 1 + \Delta V / V_1$$

$$V_1 (p_2 / p_1 - 1) = \Delta V$$

$$V_1 = \Delta V / (p_2 / p_1 - 1)$$

somit ist das Gesamtvolumen des gasgängigen Porenvolumens der Deponie

$$V_1 = 1116 \text{ m}^3 / ((1016,14 / 1015,27) - 1) = \mathbf{1.3 \times 10^6 \text{ m}^3}$$

## 6. Zusammenfassung

Die Deponie wird als Gasbehälter betrachtet.

Der relative Gasdruck unter der Deponieoberfläche pendelt zur umgebenden Atmosphäre hin um den Nullpunkt. Es besteht eine direkte Abhängigkeit zur Ganglinie des Luftdrucks. Durch die Gasbildung in der Deponie wird diese jedoch zum positiven Bereich hin verschoben. So entweicht das Deponiegas hauptsächlich bei fallendem Luftdruck. Bei einem entsprechend starken Luftdruckanstieg strömt umgekehrt Luft in die Deponie hinein.

Unter der Deponieoberfläche besteht eine Übergangszone, in der sich je nach den Druckverhältnissen sowohl Gas als auch Luft bzw. ein Gemisch daraus befinden kann. Diese Zone kann in einem begrenzten Umfang als Gasspeicher genutzt werden.

Aus dem Vergleich der Luftdruckganglinie und Situationen, bei denen ein Druckausgleich zwischen Deponiekörper und der umgebenden Atmosphäre besteht, werden Rückschlüsse über die Gasproduktionsrate und das gasgängige Porenvolumen gezogen. Die Gasbildungsrate beträgt z.Zt. (im Jahr 2001) etwa 180 m<sup>3</sup> pro Stunde. Das gasgängige Porenvolumen in der Deponie wurde überschlägig mit  $1,3 \times 10^6$  m<sup>3</sup> ermittelt.

Schwankungen in Stauflüssigkeitspegeln, die sich genau gegenläufig zur Luftdruckganglinie bewegen, deuten auf Gaseinschlüsse im Stauflüssigkeitskörper hin. Damit wäre entsprechend weniger Stauflüssigkeit im Deponiekörper vorhanden, als dies von den Stauflüssigkeitsständen her zu erwarten ist.

Die Flüssigkeitsstände in den Pegelbrunnen können durch Gaseinschlüsse unterhalb des Stauflüssigkeitsspiegels und auch in Folge von Gasbildung von den tatsächlichen Stauflüssigkeitsständen abweichen. Zusätzlich können Abweichungen auch durch die mit der Errichtung von Pegelbrunnen geänderten Verhältnisse im Deponiekörper einhergehen. Es deutet sich an, dass die verfügbaren Pegelstände häufig einen zu niedrigen Stauflüssigkeitsspiegel widerspiegeln und trotzdem noch den Rückschluss auf ein eher zu großes Flüssigkeitsvolumen im Deponiekörper zulassen.

Hans Lewitz

Literaturhinweis:

Bild 1 und Bild 2 – aus der Broschüre „Deponie Georgswerder Sanierung 1984-95“

Bild 5 und Bild 6 - Sokollek / Lindenbeck - 2000, unveröffentlicht

Bild 3, Bild 4, Bild 7 und Bild 8 - Figueroa / Lewitz, unveröffentlicht