Frank Otto
Jürgen Kanitz

A First Step Towards Landfill Mining

The term "urban mining", which is now a well-known concept, refers to the reclamation of compounds and elements from man-made sources. When buildings are being demolished, e.g., any valuable materials encountered, such as copper pipes and cables or old lead piping, can be extracted separately and the metals re-used. Concrete rubble can also be recycled to produce new aggregate and scrap brick material can be turned into plant substrate.
A sub-type of urban mining is "landfill mining". Household waste dumps have been widely used over the years and sites of this kind are to be found in practically every major residential area. In Germany alone there are an estimated 106,000 abandoned installations of this kind as well as 372 old landfill sites (based on figures obtained for 1988). Until the year 2005 the latter were in some cases also allowed to be used for the storage of organic waste.
However, before old landfill sites and waste tips of this kind can be opened up again with a view to extracting the valuable materials they contain it will be necessary to carry out investigations into the biological activity of such installations. It must be assumed that most of these 100,000-plus abandoned sites will still be biologically active and will therefore contain huge quantities of reactive organic matter. Opening up a waste dump or landfill site of this kind will cause oxygen to be introduced into the system and this will in turn trigger chemical and biological reactions. This will inevitably result in the emission of gases and unpleasant odours. When combined with rainfall the outcome will be washouts and a contamination of the groundwater.
This is where the first step towards landfill mining begins. This procedure also has to distinguish between waste dumps without landfill gas capture and those with landfill gas capture. New, depth-filtered gas wells are installed at the waste sites and these are then subjected to a slight degree of over-suction in order to reactivate the anaerobic organic matter. In the case of old landfill sites the existing gas wells undergo suction along with depth-zonal sampling. This operation usually identifies near-surface leaks in the gas wells that then have to be sealed up. The newly repaired and depth-filtered wells then become operational again. In the case of both abandoned waste dumps and disused landfill sites it is possible to extract sufficient quantities of landfill gas of suitable quality for energy production. It is proposed that such projects will be able to extract gas for energy production purposes for a period of ten to 20 years. Only then will it be possible to open up the aerobically inertised waste sites so that recycable material can be safely extracted without any significant impact on the environment. By then the climate-relevant CH_4 will have been converted into energy and burnt in the form of less-damaging CO_2. Moreover, the sale of electricity and heat energy will help cover some of the costs of the operation.

Erster Schritt zum Deponiebergbau

Bekannt ist der Begriff des „Urban Mining". Zu verstehen ist darunter die Wertstoffgewinnung aus anthropogenen Hinterlassenschaften. So werden u.a. beim Rückbau von Gebäuden die darin verbauten Wertstoffe, wie z.B. Kupferleitungen und Kupferkabel oder alte Bleirohre, gesondert entnommen und die Metalle einer erneuten Nutzung zugeführt. Betonabbruch wird recycelt zu neuem Zuschlagstoff und aus Ziegelbruch wird Pflanzensubstrat.
Eine Unterart des Urban Mining stellt das „Landfill Mining" dar, weniger geläufig in deutscher Sprache „Deponiebergbau". Hausmülldeponien waren in früheren Jahren weit verbreitet und gehörten zu fast jeder Ansiedlung. Geschätzt werden allein in Deutschland ca. 106.000 Altablagerungen und ca. 372 Altdeponien (Stand 1988). Letztere durften z.T. noch bis zum Jahr 2005 organische Abfälle einlagern.
Bevor Altdeponien und -ablagerungen jedoch geöffnet werden können, um die darin enthaltenen Werte zu heben, muss die biologische Aktivität dieser Deponien geprüft werden. Es ist davon auszugehen, dass ein Großteil der über 100.000 Altablagerungen noch immer biologisch aktiv ist und dementsprechend viel reaktionsfähige Organik enthält. Wird eine solche Altablagerung oder Deponie geöffnet, versursacht der dadurch in das System eingebrachte Sauerstoff chemische und biologische Reaktionen. Ausgasungen und Geruchsbelästigungen sind dann unvermeidbar. Kombiniert mit Niederschlägen sind Auswaschungen und Kontaminationen des Grundwassers die Folge.
Hier setzt der erste Schritt zum Deponiebergbau an. Dabei wird auch bei der Vorgehensweise zwischen Altablagerungen ohne Deponiegasfassung und Altdeponien mit Deponiegasfassung unterschieden. In Altablagerungen werden neue, tiefenverfilterte Gasbrunnen installiert und anschließend geringfügig übersaugt, um die anaerobe Organik wieder zu aktivieren. In Altdeponien werden die bestehenden Gasbrunnen besaugt und tiefenzonal beprobt. Dabei werden in der Regel oberflächennahe Undichtigkeiten der Gasbrunnen gefunden, welche dann abgedichtet werden. Anschließend sind die so reparierten, mittlerweile tiefenverfilterten Gasbrunnen wieder funktionsfähig. In beiden Fällen – Altablagerung und Altdeponie – kann Deponiegas mit verwertbarer Qualität in ausreichender Menge für eine energetische Nutzung gefördert werden. Geplant sind Gasförderung und energetische Nutzung für einen Zeitraum von zehn bis 20 Jahren. Erst danach können die aerob inertisierten Altablagerungen und –deponien ohne größere Umweltbelastung zur Entnahme von Wertstoffen gefahrlos geöffnet werden. Bis dahin wurde das klimaschädliche CH_4 energetisch genutzt und in weniger klimaschädliches CO_2 verbrannt. Nebenbei kann mit dem Verkauf von Strom und Wärme ein Teil der Kosten gedeckt werden.

1 Introduction

The term "urban mining" is now a well-known concept. It means the reclamation of compounds and elements from man-made sources. When buildings are being demolished, e.g., any valuable materials encountered, such as copper pipes and cables or old lead piping, can be extracted separately and the metals reused. Concrete rubble can also be recycled to produce new aggregate and scrap brick material can be turned into plant substrate.

A sub-type of urban mining is "landfill mining". Household waste dumps have been widely used over the years and sites of this kind are to be found in practically every major residential area. In Germany alone there are an estimated 106,000 abandoned installations of this kind (waste dumps that were officially closed prior to 1st June 1993) as well as 372 old landfill sites (as at 1988) (1). Until the year 2005 the latter were in some cases continued to be used for the storage of organic waste.

It is thought that Germany's disused waste dumps contain at least 60 bn € worth of raw materials, namely metals, minerals such as phosphate and energy-rich waste material that can be converted into highly productive landfill gas with a methane content of as much as 65 % by volume using a targeted process of bacterial degradation (2).

However, before these waste dumps and landfill sites can be opened up in order to extract the useful materials they contain an assessment has to be made of the activity associated with the decomposition of any remaining organic compounds within the body of the site. The current thinking in respect of the half-life period of organic processes in waste dumps holds that the percentage of organic material is halved every six to eight years as a result of bacterial conversion (degradation). It is therefore assumed that the bioavailable organic matter present within the body of the site will for the most part have been transformed after a period of 30 years or so. After this time has passed the products resulting from the conversion of organic compounds should no longer pose any risk in the form of leachate and air from the waste dump and the site can be released from supervisory control. However, the projected half-life period of just six years referred-to above has been determined under ideal conditions and will rarely apply in reality. Generally speaking, landfill bodies of this kind are too dry for biological and chemical reactions, or these reactions take place at a much slower pace, because the area concerned achieves nowhere near the optimal temperature of around 37 °C that is required for anaerobic bacteria (without oxygen). The half-life periods that apply under real conditions can therefore last several decades. As a consequence of this it must be assumed that most of the 100,000 or more waste dumps referred-to above are still biologically active at a very low level and accordingly will contain large amounts of reactive organic matter. If such a waste dump or landfill site is opened up the oxygen thereby introduced into the system will in turn trigger chemical and biological reactions. This will inevitably result in the emission of gases and unpleasant odours and in combination with rainfall could potentially lead to washouts and a contamination of the groundwater.

2 Basic principles

Landfill gas is a microbiological degradation product composed mainly of solid organic components. It is made up of methane and carbon dioxide ($CH_4 + CO_2$). Under ideal circumstances it would be

1 Einleitung

Bekannt ist der Begriff des „Urban Mining". Zu verstehen ist darunter die Wertstoffgewinnung aus anthropogenen Hinterlassenschaften. So werden u. a. beim Rückbau von Gebäuden die darin verbauten Wertstoffe, wie z.B. Kupferleitungen und Kupferkabel oder alte Bleirohre, gesondert entnommen und die Metalle einer erneuten Nutzung zugeführt. Betonabbruch wird recycelt zu neuem Zuschlagstoff und aus Ziegelbruch wird Pflanzensubstrat.

Eine Unterart des Urban Mining stellt das „Landfill Mining" dar, weniger geläufig in deutscher Sprache „Deponiebergbau". Hausmülldeponien waren in früheren Jahren weit verbreitet und gehörten zu fast jeder Ansiedlung. Geschätzt werden allein in Deutschland ca. 106.000 Altablagerungen (Deponien mit Stilllegungsanzeige vor dem 01. Juni 1993) und ca. 372 Altdeponien (Stand 1988) (1). Letztere durften z.T. noch bis zum Jahr 2005 organische Abfälle einlagern.

Mindestens 60 Mrd. € an Rohstoffen – Metalle, Mineralstoffe wie Phosphat oder energiereiche Abfälle, die durch bakteriellen Abbau gezielt in energiereiches Deponiegas mit einem Methangehalt bis zu ca. 65 Vol.-% umgewandelt werden können – sollen bundesweit in alten Deponien stecken (2).

Bevor Altdeponien und -ablagerungen jedoch geöffnet werden können, um die darin enthaltenen Werte zu heben, muss die Aktivität des Abbaus verbliebener organischer Verbindungen dieser Deponien geprüft werden. Die gängige Theorie bezüglich der Halbwertszeit organischer Prozesse in Deponien ging davon aus, dass der Anteil an Organik durch bakterielle Umsetzung (Abbau) alle sechs bis acht Jahre halbiert wird. Somit wurde davon ausgegangen, dass nach 30 Jahren die bioverfügbare Organik innerhalb eines Deponiekörpers weitestgehend umgesetzt ist. Danach sollte keine Gefährdung mehr durch Umsetzungsprodukte der organischen Verbindungen in Richtung Sickerwasser und Luft vom Müll ausgehen und die Ablagerung könnte aus der Aufsicht entlassen werden. Die oben prognostizierten Halbwertszeiten von nur ca. sechs Jahren wurden allerdings unter Idealbedingungen ermittelt und treffen in der Wirklichkeit kaum zu. Im Allgemeinen sind Deponiekörper zu trocken für biologische und chemische Reaktionen oder diese Reaktionen sind stark verlangsamt, weil die für anaerobe Bakterien (ohne Sauerstoff) optimale Temperatur von ca. 37 °C weit unterschritten wird. Somit kommen unter realen Bedingungen Halbwertszeiten von Jahrzehnten zustande. Als Folge ist davon auszugehen, dass ein Großteil der o.g. über 100.000 Altablagerungen auf sehr niedrigem Niveau noch immer biologisch aktiv ist und dementsprechend viel reaktionsfähige Organik enthält. Wird eine solche Altablagerung oder Deponie geöffnet, verursacht der dadurch in das System eingebrachte Sauerstoff chemische und biologische Reaktionen. Ausgasungen und Geruchsbelästigungen sind dabei unvermeidbar. Kombiniert mit Niederschlägen sind Auswaschungen und Kontaminationen des Grundwassers eine mögliche Folge.

2 Grundlagen

Deponiegas ist ein mikrobiologisches Abbauprodukt vorwiegend fester organischer Komponenten, ein Gas aus Methan und Kohlenstoffdioxid ($CH_4 + CO_2$). Im Idealfall lässt sich folgender Ansatz wählen: Die CH_4-Konzentration liegt dabei bei ca. 55 Vol.-% oder höher, die CO_2-Konzentration liegt dann entsprechend bei ca.

formulated as follows: the CH_4 concentration should be about 55 % by volume or higher, the CO_2 concentration would then be around 35 % by volume or lower. The remaining 10 % or so would be made up of water vapour and other gases. It is generally assumed that domestic waste contains between 150 and 300 kg/t of bio-available organic matter. The gas generation should therefore amount to around 150 to 300 m^3/t of landfill gas.

Landfill gas with a methane concentration lower than 60 to 65 % by volume is not generally formed. Of course landfill gas with lower CH_4 concentration levels than this has been measured, in this case a gas containing around 40 % by volume CH_4 and 25 % by volume CO_2. However, this was not pure landfill gas but rather a mixture of around 40 + 25 = 65 % by volume landfill gas and 25 % by volume nitrogen making up the difference to 90 % by volume This nitrogen can only have come from the air. The gas well from which this sample was taken was found to have a leak and was drawing in ambient air. The atmospheric oxygen incorporated in it, 6 to 7 % by volume, was converted into CO_2.

The following relationship generally applies: the sum of the percentage figures of CH_4 and CO_2 subtracted from 90 gives the percentage share of atmospheric nitrogen in the gas being examined. The atmospheric nitrogen calculated in this way always comes from the outside air.

However, this knowledge is usually only of limited use since in the case of gas wells with leaks of this kind it is often only the flow that is reduced. The actual leak is disregarded. In such cases much more information is obtained by taking special gas measurements and then using these data to derive a process by which leakages of this kind can be eliminated to a large degree.

It is then that a very important, though generally overlooked factor comes into play. In the upper well zone the conversion of the deposited material is well advanced with gas flowpaths leading to the surface having developed as a result of organic decomposition. These flowpaths allow air from the outside environment to enter into the gas being extracted.

In the deeper lying parts of the waste dump organic decomposition is less well advanced. The overlying weight tends to compact the material, the pore space is reduced and the suction pressure is insufficient to extract the gas. Leaks in the upper well zones mean that the suction pressure is reduced in these areas and the operation consequently has little impact further down into the body of the dump (Figure 1, right).

This is not the case when it comes to depth-filtered gas wells (Figure 1, left). Because of the fairly large distance between the filter and the surface of the tip the negative pressure applied around the filter path in the gas well is able to build up inside the deposited material. The risk of a short circuit to the surface is fairly low. The extracted gas is mostly undiluted. Depth-filtered gas wells can usually only be set up as part of a new installation, although it is also possible to retrofit existing wells to achieve the same outcome (see below 'Renovation options for leaking gas wells').

3 Two problems to resolve: abandoned waste dumps and disused landfill sites

The existence of 100,000 or more abandoned waste dumps and 400 or so disused landfill sites creates two distinct problems. Many of the former waste dumps have no ground seal or leach-

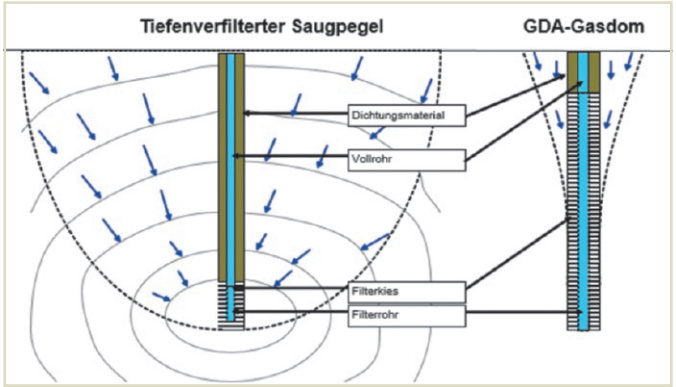

Fig. 1. Suction radii applying to depth-filtered and standard gas wells.
Bild 1. Saugradien von tiefenverfiltertem und normalem Gasbrunnen.

35 Vol.-% oder niedriger. Die restlichen ca. 10 % zu 100 Vol.-% sind Wasserdampf und andere Gase. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass Hausmüll einen Anteil von ca. 150 bis 300 kg/t an bioverfügbarer Organik aufwies. Die Gasbildung sollte damit ca. 150 bis 300 m^3/t Deponiegas betragen.

Deponiegas mit niedrigeren Methankonzentrationen als 60 bis 65 Vol.-% wird im Allgemeinen nicht gebildet. Es wird selbstverständlich Deponiegas mit niedrigeren CH_4-Konzentrationen gemessen, wie z. B. ein Gas mit ca. 40 Vol.-% CH_4 und ca. 25 Vol.-% CO_2. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um reines Deponiegas, sondern um ein Gasgemisch aus ca. 40 + 25 = 65 Vol.-% Deponiegas und ca. 25 Vol.-% Stickstoff als Differenz zu 90 Vol.-%. Dieser Stickstoff kann nur aus der Luft kommen. Der Gasbrunnen, aus dem die Probe genommen wurde, weist eine Leckage auf, er zieht Außenluft an. Der mit eingetragene Luftsauerstoff, ca. 6 bis 7 Vol.-%, wurde zu CO_2 veratmet.

Dieser Zusammenhang gilt generell: Die Summe der Prozentzahlen von CH_4 und CO_2 subtrahiert von 90 ergibt den prozentualen Anteil von Luftstickstoff im untersuchten Gas. Das so berechnete Stickstoffvolumen kommt immer aus der Außenluft.

Dieses Wissen hilft im Regelfall jedoch nur wenig, da bei Gasbrunnen mit derartigen Leckagen häufig nur der Fluss reduziert wird. Das eigentliche Leck wird nicht weiter betrachtet. Dabei lässt sich mit speziellen Gasmessungen deutlich mehr an Informationen erzielen und daraus auch ein Vorgehen ableiten, dass Leckagen zumindest weitgehend beseitigt werden können.

Hier zeigt sich ein ganz wichtiger, aber im Allgemeinen nicht beachteter Umstand. Im oberen Gasbrunnenbereich ist einerseits die Umsetzung des Deponats weit fortgeschritten, wobei sich durch den Abbau der Organik Gaswegsamkeiten zur Oberfläche entwickelt haben, durch die Außenluft in das abgesaugte Gas mit eindringt.

In tieferen Schichten ist der Abbau der Organik noch nicht so weit fortgeschritten. Durch die Auflast wird das Deponat verdichtet, der Porenraum ist geringer und der Saugdruck reicht nicht aus, Gas abzusaugen. Die Undichtigkeiten im oberen Brunnenbereich sorgen dafür, dass der Saugdruck im oberen Bereich abgebaut wird und somit eine Wirkung in der Tiefe ausbleibt (Bild 1 rechts).

Bei tiefenverfilterten Gasbrunnen (Bild 1 links) ist das anders. Aufgrund des weiten Abstands des Filters zur Oberfläche wird sich der angelegte Unterdruck um die Filterstrecke des Gasbrunnens im Deponat aufbauen. Die Gefahr eines Kurzschlusses zur Ober-

ate collection system and most of these also lack a surface sealing system and gas collection station. Dumps containing more than 500,000 m^3 of material therefore merit closer examination. This would be called for when near-surface measurements have identified CH_4 emissions and damage to vegetation, particularly to deeply rooted trees, suggests the presence of CH_4 in the body of the landfill. Such abandoned waste dumps will pose a danger when the gas begins to migrate through the soil surrounding the body of the dump and towards local buildings, where it can enter poorly ventilated areas such as cellars.

Several hundred of the country's abandoned landfill sites are equipped with ground seals and leachate collection systems along with surface seals and gas collection stations. In this context gas collection can merely mean the existence of gas wells, an extraction plant and a gas power station. Gas extraction is often either much reduced or has stopped completely as the gas quality is no longer adequate for energy production purposes. Usually the gas will contain little CH_4, a lot of CO_2 and nitrogen, along with some amounts of oxygen. The site operators then anticipate that the methanogenesis process will come to an end.

3.1 Starting situation based on the example of a specific waste dump

The waste dump in question is located in the Ruhr region. This former municipal landfill site is a dump-type installation with no surface sealing system. The site covers an area of 13 hectares and at its highest point reaches up to about 35 m above the surrounding land (80 m above sea level). The site borders an industrial area to the south and adjoins a recycling depot at its western end. A stream flows along its south-western limit and there is a disused railway track running along its southern border. The landfill site can be divided into a north-eastern and a south-western section. These zones are separated by the route of a gas pipeline. A loop road runs from the recycling depot across the north-eastern section to the highest point of the former tip. Between 1925 and 1952 there was a waste-water treatment plant operating in the area of the south-eastern section. The settling ponds were filled-in in the 1960s (3). After the installation closed local waste began to be deposited at the site in a random and irregular way and it is known that extensive dumping took place there between 1959 and 1963. From 1963 on the dump assumed ever greater dimensions until, in 1983, a halt was called to the tipping. The entire site was then covered with several layers of soil and rubble and planted with trees. Today this densely wooded area has been designated as a nature reserve. Aerial photographs taken in 2009 show that the forest site contained a high proportion of dead wood, a development that can be attributed to a disturbance of wood growth, and even a number of dead trees. These clearly recognisable growth impairments are indicative of a high build-up of landfill gas in the soil.

3.2 Investigating this distinctive waste dump

This abandoned waste dump was most recently the subject of investigations carried out as part of four bachelor theses for the Technical University of Applied Sciences Georg Agricola (THGA) in Bochum/Germany. With support from Celler Brunnenbau GmbH an exploratory borehole was sunk in February 2013 and this was then lined to create a gas well (Figure 2).

fläche ist gering. Das geförderte Gas ist meist unverdünnt. Tiefenverfilterte Gasbrunnen sind nur im Rahmen einer Neuerstellung zu erzielen oder es lassen sich vorhandene Gasbrunnen durch Ertüchtigung (s. u. Sanierungsmöglichkeiten undichter Gasbrunnen) in solche überführen.

3 Zwei Problemstellungen: Altablagerungen und Altdeponien

Die über 100.000 Altablagerungen und die fast 400 Altdeponien führen zu zwei unterschiedlichen Problemstellungen. Es gibt eine Vielzahl von Altablagerungen ohne Basisabdichtung, ohne Sickerwasserfassung, weitgehend ohne Oberflächenabdichtung und ohne Gasfassung. Hier lohnt sich ab einem Müllvolumen größer 500.000 m^3 eine nähere Untersuchung. Diese ist dann geboten, wenn mittels oberflächennaher Messungen CH_4-Ausgasungen erkannt werden und Vegetationsschäden, insbesondere an tiefer wurzelnden Bäumen, CH_4 im Deponiekörper vermuten lassen. Zur Gefahr wird eine solche Altablagerung, wenn das Gas durch den Boden des den Deponiekörper umgebenden Erdreichs in Richtung Bebauung migriert und in schlecht belüftete Räume, z. B. Keller, eindringt.

Es gibt einige hundert Altdeponien mit Basisabdichtung samt Sickerwasserfassung und Oberflächenabdichtung samt Gasfassung. Gasfassung bedeutet hierbei oftmals das bloße Vorhandensein von Gasbrunnen, einer Absauganlage und eines Gaskraftwerks. Dabei ist die Gasabsaugung häufig entweder stark reduziert oder mittlerweile komplett abgestellt, weil die Gasqualität für eine energetische Nutzung nicht mehr ausreicht. Meistens enthält das Gas dann wenig CH_4, viel CO_2 und Stickstoff sowie gewisse Anteile an Sauerstoff. Die Deponiebetreiber gehen dann in der Regel vom Ende der Methanogenese aus.

3.1 Ausgangssituation am Beispiel einer speziellen Altablagerung

Diese spezielle Altablagerung befindet sich im Ruhrgebiet. Bei der ehemaligen Siedlungsabfalldeponie handelt es sich um eine Haldendeponie ohne Oberflächenabdichtung. Das Areal erstreckt sich über eine Fläche von 13 ha und hat den höchsten Punkt bei einer Höhe von ca. 35 m über Gelände bzw. 80 m NHN. Das Gebiet grenzt südlich an ein Industriegebiet, am westlichen Ende der Deponie grenzt ein Wertstoffhof an, an der südwestlichen Begrenzung des Areals fließt ein Bach und an der südlichen Grenze verläuft ein stillgelegtes Bahngleis. Die Deponie lässt sich in einen nordöstlichen und einen südwestlichen Abschnitt einteilen. Diese werden durch die Trasse einer Gasleitung getrennt. Vom Wertstoffhof aus verläuft ein befahrbarer Rundweg über den nordöstlichen Abschnitt zum höchsten Punkt der ehemaligen Deponie. Zwischen den Jahren 1925 und 1952 wurde im Bereich des südöstlichen Abschnitts eine Kläranlage betrieben. Deren Klärteiche wurden in den 1960er Jahren verfüllt (3). Nach der Schließung der Anlage begannen erste ungeordnete lokale Abfallablagerungen. Großflächigere Ablagerungen sind aus den Jahren 1959 bis 1963 bekannt. Ab dem Jahr 1963 nahmen dann die Verfüllungen der Fläche immer größere Dimensionen an, bis im Jahr 1983 der Endstand der Deponierung erreicht wurde. Danach wurde das Deponat mit mehreren Schichten Boden und Bauschutt überdeckt und aufgeforstet. Heute ist die stark bewaldete Fläche als Landschaftsschutzgebiet ausgewiesen.

An examination of the drill cuttings (Figure 3) revealed an average organic content of over 15 %, this representing more than 150 kg of reactive organic matter per tonne of landfill material. Measurements taken from the lined gas well revealed a volume flow of 18 m^3/h of landfill gas with more than 60 % CH_4 and around 35 % CO_2, and this without any suction being applied. This contradicts the current theories on organic conversion in landfill sites but it also suggests that abandoned waste dumps of this kind are a potential source of energy and shows that there is a need for action in respect of hazard prevention and environmental protection.

3.3 Starting situation of the disused Celje landfill site in Slovenia

The household waste dump at Celje in Slovenia is divided into a disused section, this dating back to the time when it was used to store untreated organic waste, and a still functioning new section that is only used for pre-treated material. The disused part of the site has no ground seal and the surface has been covered with a fine-grained soil, though this has not been sealed. There are quite a number of gas wells currently providing gas of low quality, some of it containing oxygen. The two installed generators of 1,000 and 600 kW electrical output are now only run intermittently with just a single unit ever in operation at any one time. A survey of the gas wells using an electric light gauge and borehole camera showed that some of them had been completely destroyed as a result of the settlement of the waste material. The well pipes were buckled and crushed a few metres below the surface. A number of other wells underwent a process of suction and depth-zonal investigation. This involved measuring the temperature, the CH_4, CO_2 and O_2 concentration levels and the gas velocity every metre. This particular survey showed that the upper zones contained small quantities of CH_4 and amounts of oxygen, with the gas moving at relatively high flow rates. In the deeper lying areas the flow rate was much reduced, the oxygen content was 0 % and the CH_4 and CO_2 concentration levels were typical for a landfill gas composition, namely around 65 % CH_4 and 30 % CO_2. The investigations also highlighted a quite significant but generally overlooked fact. In the upper well zone the conversion of the deposited material is well advanced with gas flowpaths leading to the surface having developed as a

Fig. 3. Drill cuttings taken from a depth of about 20 m with a high remnant content of biogenic organic matter (about 25%).
Bild 3. Bohrgut aus ca. 20 m Tiefe mit hohem Restanteil an biogener Organik (ca. 25%). Photo/Foto: THGA

Fig. 2. Drilling the gas well.
Bild 2. Bohrung des Gasbrunnens.
Photo/Foto: THGA

Eine Luftbildaufnahme aus dem Jahr 2009 lässt einen hohen Totholzanteil der Bewaldung erkennen, welcher auf Wachstumsstörungen im Baumbestand bis hin zu einigen toten Bäumen zurückzuführen ist. Diese deutlich erkennbaren Wuchsstörungen lassen auf einen hohen Deponiegasanteil im Boden schließen.

3.2 Untersuchungen dieser speziellen Altablagerung

Diese Altablagerung wurde zuletzt im Rahmen von vier Bachelorarbeiten der Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum, untersucht. Dank Unterstützung durch die Celler Brunnenbau GmbH konnte im Februar 2013 eine Forschungsbohrung abgeteuft und zum Gasbrunnen ausgebaut werden (Bild 2).

Untersuchungen des Bohrguts (Bild 3) ergaben einen durchschnittlichen Organikanteil von über 15 %, was über 150 kg reaktionsfähiger Organik pro Tonne Deponieinhalt entspricht. Messungen am ausgebauten Gasbrunnen ergaben, völlig ohne jede Besaugung, einen Volumenstrom von 18 m^3/h Deponiegas mit mehr als 60 % CH_4 und ca. 35 % CO_2. Dies widerspricht den gängigen Theorien zum Organikumsatz in Deponien, führt aber zur Überlegung einer energetischen Nutzung solcher Altablagerungen und zeigt den Handlungsbedarf im Rahmen von Gefahrenabwehr und Umweltschutz.

3.3 Ausgangssituation der Altdeponie Celje in Slowenien

Die Siedlungsabfalldeponie bei Celje in Slowenien ist gegliedert in einen Altteil aus der Zeit, als noch unbehandelte Organikabfälle deponiert wurden sowie einen noch in Betrieb befindlichen Neuteil, in dem nur vorbehandelte Abfälle deponiert werden. Der Altteil der Deponie besitzt keine Basisabdichtung. Die Oberfläche wurde mit feinkörnigem Boden abgedeckt, nicht abgedichtet. Eine Vielzahl von Gasbrunnen lieferte zuletzt Gas geringer Qualität, z.T. mit Sauerstoff. Die beiden Generatoren – 1.000 und 600 kW elektrische Leistung – wurden zuletzt nur noch sporadisch betrieben, in der Regel nur einer von beiden. Untersuchungen der Gasbrunnen mittels Lichtlot und Bohrlochkamera zeigten, dass einige von ihnen infol-

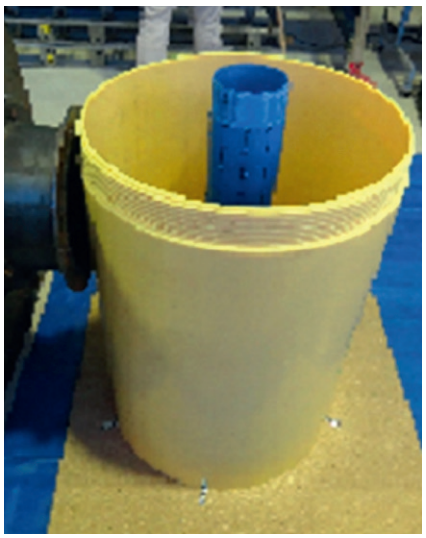

Fig. 4. Test set-up used for the model well.
Bild 4. Aufbau des Modellbrunnens.
Photo/Foto: THGA

Fig. 5. Lower section partly filled with filter gravel.
Bild 5. Unterteil teilweise mit Filterkies befüllt. Photo/Foto: THGA

result of organic decomposition. These flowpaths allow air from the outside environment to enter into the gas being extracted. In the deeper layers, on the other hand, organic decomposition is still less well developed. The overlying weight tends to compact the material, the pore space is reduced and the suction pressure is insufficient to extract the gas. Leaks in the upper well zones mean that the suction pressure is reduced in these areas, with the result that there is little impact further down into the body of the dump.

3.4 Renovation options for leaking gas wells

The THGA has developed and successfully tested a process for the renovation of leaking gas wells of this type. Here it is important that the gravel filter and inner filter pipe around it are sealed gas-tight over a specified distance. The inner filter pipe must then be completely free in order to ensure the functional efficiency of the gas well.

In the THGA laboratory blue plastic pipes type DN 125 were set up to replicate a gas well installed in a landfill site (Figures 4, 5). The outer structure of the test arrangement was composed of yellow DN 600 plastic pipes that were designed to simulate the walls of a well borehole in a landfill. The annulus between the two pipes was filled with filter gravel in the particle range 16/32 (Figures 4, 5, 6).

Fig. 6. The completed model well.
Bild 6. Modellbrunnen fertiggestellt. Photo/Foto: THGA

ge von Müllsetzungen komplett zerstört waren. Die Brunnenrohre waren wenige Meter unter der Oberfläche abgeknickt und zusammengedrückt. Andere Brunnen wurden besaugt und tiefenzonal untersucht. Gemessen wurden dabei je Meter die Temperatur, die Konzentrationen an CH_4, CO_2 und O_2 sowie die Gasgeschwindigkeit. Dabei zeigten sich im oberen Bereich geringe Anteile an CH_4 und Anteile an Sauerstoff bei relativ hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Gases. In tieferen Bereichen ging die Strömungsgeschwindigkeit des Gases stark zurück, der Sauerstoffgehalt betrug 0 % und die Konzentrationen für CH_4 und CO_2 entsprachen der typischen Deponiegaszusammensetzung von ca. 65 % CH_4 zu ca. 30 % CO_2. Hier zeigt sich ein ganz wichtiger, aber im Allgemeinen nicht beachteter Umstand. Im oberen Gasbrunnenbereich ist einerseits die Umsetzung des Deponats weit fortgeschritten, wobei sich durch den Abbau der Organik Gaswegsamkeiten zur Oberfläche entwickelt haben, durch die Außenluft in das abgesaugte Gas mit eindringt. In tieferen Schichten ist der Abbau der Organik noch nicht so weit fortgeschritten. Durch die Auflast wird das Deponat verdichtet, der Porenraum ist geringer und der Saugdruck reicht nicht aus, Gas abzusaugen. Die Undichtigkeiten im oberen Brunnenbereich sorgen dafür, dass der Saugdruck im oberen Bereich abgebaut wird und somit eine Wirkung in der Tiefe ausbleibt.

3.4 Sanierungsmöglichkeit undichter Gasbrunnen

An der THGA wurde ein Verfahren zur Sanierung undichter Gasbrunnen entwickelt und versuchstechnisch verifiziert. Dabei ist es wichtig, dass der Kiesfilter um das innere Filterrohr herum auf einer vorgegebenen Strecke gasdicht verschlossen wird. Das innere Filterrohr muss für die Funktionstüchtigkeit des Gasbrunnens anschließend wieder komplett frei sein.

Im Labor der THGA wurden blaue Kunststoffrohre DN 125 wie in einem Gasbrunnen einer Deponie mit Bohrlöchern versehen (Bilder 4, 5). Den äußeren Rahmen des Versuchsaufbaus bildeten gelbe Kunststoffrohre DN 600, welche die Bohrlochwand einer Brunnenbohrung auf einer Deponie simulierten. Der Ringraum zwischen beiden Rohren wurde mit Filterkies der Korngruppe 16/32 gefüllt (Bilder 4, 5, 6).

Anschließend wurde der Mittelteil des 3 m hohen Filterrohrs mittels Schaumpfropfen aus Polyurethan nach oben und unten abgesperrt. Zwischen die beiden Pfropfen wurde dann ein spe-

Fig. 7. The outer 600-mm pipe has been removed after the foaming process: the 1 to 2.2 m-long section of gravel is embedded in foam.
Bild 7. Nach Ausschäumen äußeres 600 mm-Rohr entfernt: ausgeschäumter Kies von ca. 1 m – 2,2 m. Photo/Foto: THGA

The centre section of the 3 m-high filter pipe was then blocked off above and below using polyurethane foam plugs. A special mixture of two components and a catalyst was then introduced between the two plugs. After a short period this mixture generated a foaming reaction. The foaming factor of around 17 produced a completely gastight seal around the filter gravel. When the foam had set hard the inner blue filter pipe was cut free. In order to be able to see the results of the test the outer yellow pipe was removed and any unattached gravel was cleared away. This revealed a 1 m-long plug of gravel and polyurethane (Figure 7).

This technique has been employed to renovate gas wells not only at the Celje landfill site but also at another similar installation in Bavaria. The leaks identified by depth-zonal sampling in suction tests were successfully sealed up. Almost all gas wells repaired in this way went on to deliver oxygen-free landfill gas suitable for use in energy production plant. In both cases the generators were put back into operation.

4 Research efforts

In addition to the 324 mm-diameter gas well installed at the specific waste dump investigated by the THGA there are now plans to set up a further seven wells with borehole diameters of 600 mm. To this effect a small machine container is erected at each of the eight well sites. This accommodates a side channel condenser along with measuring equipment designed to record the vacuum pressure being applied, the volume flow, the gas temperature and the gas composition. The gas obtained from the individual wells is compressed and sent by pipeline to a gas utilisation plant at the foot of the landfill.

Figures 8 and 9 show the timeline for the aerobic conversion of the organic matter contained in the landfill material. The boundary between aerobic conversion (blue arrows on yellow background) and anaerobic conversion (red arrows on violet

zielles Gemisch aus zwei Komponenten und einem Katalysator gebracht, das nach kurzer Zeit aufschäumte. Mit einem Schaumfaktor von ungefähr 17 wurde der Filterkies komplett gasdicht versiegelt. Nach Aushärtung des Schaums wurde das innere blaue Filterrohr frei gefräst. Um das Versuchsergebnis sehen zu können, wurde das äußere gelbe Rohr entfernt und der ungebundene Kies beiseite geräumt. Als Ergebnis wurde ein Pfropfen bestehend aus Kies und Polyurethan von ca. 1 m Länge sichtbar (Bild 7).

Sowohl auf der Deponie in Celje als auch auf einer weiteren Deponie in Bayern wurden Gasbrunnen mithilfe der o. g. Methode saniert. Die mittels tiefenzonaler Beprobung im Saugversuch ermittelten Undichtigkeiten konnten erfolgreich versiegelt werden. Fast sämtliche so sanierte Gasbrunnen lieferten anschließend wieder sauerstofffreies Deponiegas zur energetischen Verwertung. In beiden Fällen wurden die Generatoren anschließend wieder betrieben.

4 Forschungsbedarf

Auf der bereits von der THGA untersuchten speziellen Altablagerung werden neben dem bereits erstellten Brunnen mit einem Bohrdurchmesser von 324 mm weitere sieben Brunnen mit Bohrdurchmessern von 600 mm geplant. Auf jedem der acht Brunnen wird ein kleiner Maschinencontainer errichtet. Dieser enthält einen Seitenkanalverdichter sowie Messgeräte zur Erfassung des angelegten Unterdrucks, des Volumenstroms, der Gastemperatur und der Gaszusammensetzung. Das Gas der einzelnen Brunnen wird mittels Rohrleitung zu einer Gasverwertung am Fuß der Deponie gepresst.

In den Bildern 8 und 9 wird der zeitliche Verlauf der aeroben Umsetzung der Organik im Deponat gezeigt. Die Grenze zwischen aerober Umsetzung (blaue Pfeile auf gelbem Untergrund) und anaerober Umsetzung (rote Pfeile auf violettem Untergrund) ist hier als relativ glatte Linie gezeichnet. In der Realität ist davon auszugehen, dass diese Linie deutlich ungleichmäßiger verläuft. Auch sind den Autoren bisher keine Feldversuche bekannt, welche die Dynamik dieser Grenzschicht untersuchen.

Aus wissenschaftlichen Gründen zur Untersuchung der Dynamik dieser Grenze werden um jeden Brunnen herum Hilfsmesspegel errichtet. Geplant sind 20 Pegel pro Brunnen. In jedem Pegel sind mindestens zehn Messstellen für Temperatur, Unterdruck und Gaszusammensetzung in verschiedenen Tiefen geplant. Mit Hilfe dieser insgesamt ca. 1.600 Messstellen soll die Dynamik des Frontverlaufs zwischen aeroben und anaeroben Bakterien erstmals erforscht werden. Mit diesen Erkenntnissen kann dann andernorts und zukünftig die Produktivität und Laufzeit von Gasbrunnen, und somit kompletter Gasnutzungen, besser prognostiziert werden. Die Auswertung dieser Datenmengen soll im Rahmen einer kooperativen Doktorarbeit an der THGA erfolgen.

Es wird davon ausgegangen, dass jeder der acht Brunnen langfristig mindestens 25 m^3 weitgehend unverdünntes Deponiegas mit mehr als 40 Vol.-% Methan liefert. Diese 200 m^3 Gas sollen dann über eine Gasturbine mit einem Generator mit 400 kW elektrischer Leistung verarbeitet werden. Sowohl Strom als auch Wärme sollen im näheren Umfeld genutzt werden, um einen Teil der Betriebskosten wieder einzubringen.

Bei der eingeplanten Turbine handelt es sich um eine neu entwickelte Gasturbine der Fa. Aurelia GmbH, Berlin und Lappeenranta/

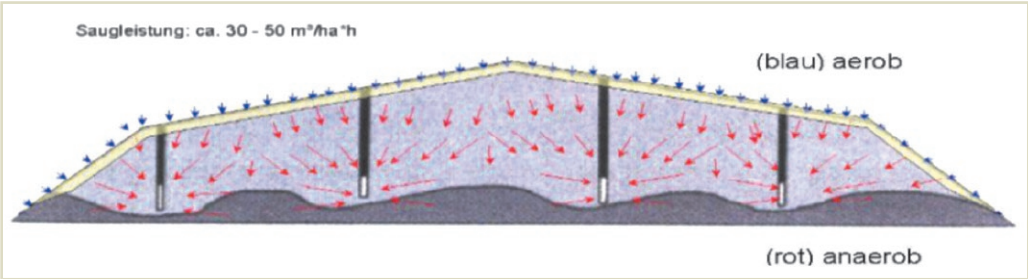

Fig. 8. Aerobic and anaerobic zones according to the landfill+- process in phase I. (4)
Bild 8. Aerobe und anaerobe Bereiche nach dem Depo+-Verfahren in Phase I. (4)

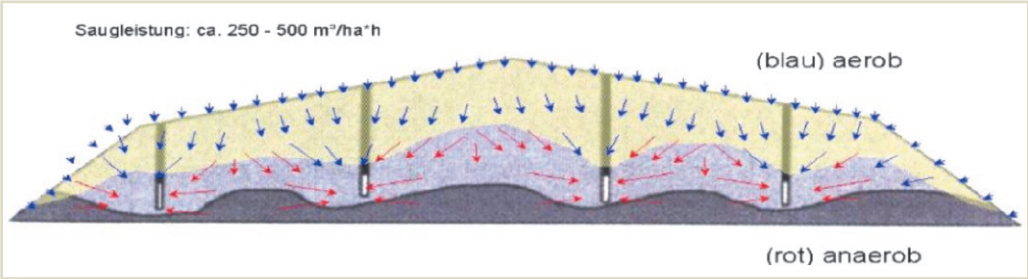

Fig. 9. Phase II of the aerobic and anaerobic conversion processes. (4)
Bild 9. Phase II der aeroben und anaeroben Umsetzungen. (4)

background) is plotted here as a smooth line. In reality it has to be assumed that this line takes a much more irregular course. The authors are unaware at present of any field tests that seek to investigate the dynamics of this interface.

Auxiliary measurement stations are to be established around each well in order to investigate the dynamics of this interface for scientific purposes. It is planned to install 20 such stations per well. Each station will feature at least ten measurement points for temperature, vacuum pressure and gas composition at different depths. With the help of these 1,600 or so measuring points it should be possible, for the first time, to investigate the dynamics of the frontline between aerobic and anaerobic bacteria. These findings can then be used elsewhere to enable better forecasting of the productivity and operating life of gas wells, and therefore of complete gas utilisation plants. An analysis of these datasets is to be carried out as part of a joint doctoral theses at the THGA in Bochum.

It is expected that each of the eight wells will in the long term provide at least 25 m^3 of largely undiluted landfill gas containing more than 40 % by volume of methane. This 200 m^3 of gas will then feed a gas turbine driving a generator with 400 kW of electrical output. The electricity and heat energy produced will be used locally as a way of offsetting part of the operating costs.

The proposed turbine is a newly developed gas turbine system from Aurelia GmbH, Berlin/Germany and Lappeenranta/Finland. This installation boasts an electrical efficiency of ≥ 40 %. In the case of gas containing 60 % by volume of CH_4 a flow rate of around 170 m^3/h – and in the case of 40 % by volume CH_4 a flow rate of about 200 m^3/h – will be sufficient to drive the turbine at full power. About 10 to 12 % of the generated energy will be used to operate the turbine. An output of around 350 kWh at 400 V should be achievable for feeding into the grid.

Finnland. Diese weist einen elektrischen Wirkungsgrad ≥ 40 % auf. Bei einem Gas mit 60 Vol.-% CH_4 reichen ca. 170 m^3/h aus – bei 40 Vol.-% CH_4 ca. 200 m^3/h – um die Turbine mit voller Leistung laufen zu lassen. Ca. 10 bis 12 % der erzeugten Energie werden für den Betrieb der Turbine genutzt. Eine Leistung von ca. 350 kWh bei 400 V sollte zur Einspeisung erzielbar sein.

References / Quellenverzeichnis

(1) Heyer, K.-U.; Ritzkowski, M.; Hupe, K.; Stegmann, R.: Zukünftige Einordnung von alten Deponiestandorten: Formale Situation, Gefährdungspotenziale, Nachsorge. Deutsche Umwelthilfe e.V., 24.03.2015, Berlin.
(2) Abraham, O.: Der Milliardenschatz unter alten Mülldeponien. DIE WELT, 20.09.2013.
(3) Conzept Umweltberatung GmbH: Gefährdungsabschätzung – Altdeponie Blücherstraße in Bochum. Mülheim, 2011.
(4) Kanitz, J.: Aerobe Stabilisierung der Kehrichtdeponie Sass Grand, Gemeinde Bever/Graubünden aus der Sicht des Verfahrensingenieurs. 3. ÖVA Technologieworkshop, Innsbruck 28. und 29. April 2011.

Authors / Autoren

Prof. Dr. rer. nat. Frank Otto, Geotechnik und Angewandte Geologie, Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Bochum,
Dipl.-Chem. Jürgen Kanitz, GGT GbR, Bochum