



## LfU - Merkblatt Altlasten 2

Stand: September 2009

Ansprechpartner: Referat 95

### Hinweise zur Untersuchung und Bewertung von flüchtigen Stoffen bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen

Wirkungspfad Boden – Bodenluft – Mensch

#### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeine Hinweise</b>	<b>3</b>
1.1	Anwendungsbereich	3
1.2	Begriffsbestimmungen	4
<b>2</b>	<b>Untersuchung von flüchtigen Stoffen bei Altablagerungen und Altstandorten</b>	<b>6</b>
2.1	Hauptkomponenten und Spurenstoffe im Deponiegas	6
2.1.1	Hauptkomponenten	6
2.1.2	Spurenstoffe	6
2.2	Flüchtige Schadstoffe bei Altstandorten	7
2.3	Probenahmeplanung	7
2.3.1	Orientierende Untersuchung	8
2.3.2	Detailuntersuchung	9
<b>3</b>	<b>Bewertungsgrundlagen</b>	<b>10</b>
3.1	Szenarien der Ausbreitung von flüchtigen Schadstoffen	10
3.1.1	Szenarien Bodenluft – Außenluft	11
3.1.2	Szenarien Bodenluft – Innenraumluft	11
3.1.3	Migration von Deponiegas	13
3.1.4	Fazit	14
3.2	Orientierende Hinweise für die Bewertung von flüchtigen Stoffen in der Bodenluft	14
3.2.1	Bewertung von flüchtigen Schadstoffen im Bodenfeststoff	14
3.2.2	Bewertung von flüchtigen Schadstoffen in der Bodenluft	16
3.2.3	Vorgehensweise bei Vorliegen mehrerer Stoffe in der Bodenluft	18
3.3	Bewertung von flüchtigen Schadstoffen (Spurenstoffen) im Deponiegas	19
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>21</b>
	<b>Anhang A: Wertetabellen</b>	<b>24</b>
	<b>Anhang B: Physikalisch-chemische Daten ausgewählter Stoffe</b>	<b>31</b>
	<b>Anhang C: Umrechnungen Volumenanteil – Massenprozent</b>	<b>33</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenstellung von Verdünnungsfaktoren für den Übergang Bodenluft zu Innenraumluft für unterschiedliche Fallszenarien	12
Tabelle A1:	Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe in der Bodenluft nach LABO: Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug; Stand: 1. September.2008	24
Tabelle A2:	Beispiele für Konzentrationen von Spurenstoffen im Deponiegas	27
Tabelle A3:	Bodenluft-Beurteilungswerte und Spurenstoffkonzentrationen im Deponiegas	29
Tabelle A4:	Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe (stoffbezogene Berechnungen) bei Untersuchungen des Bodenfeststoffes nach LABO: Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug; Stand: 1. September.2008	30
Tabelle B1:	Physikalisch-chemische Daten ausgewählter organischer Verbindungen sowie der Hauptkomponenten im Deponiegas	31

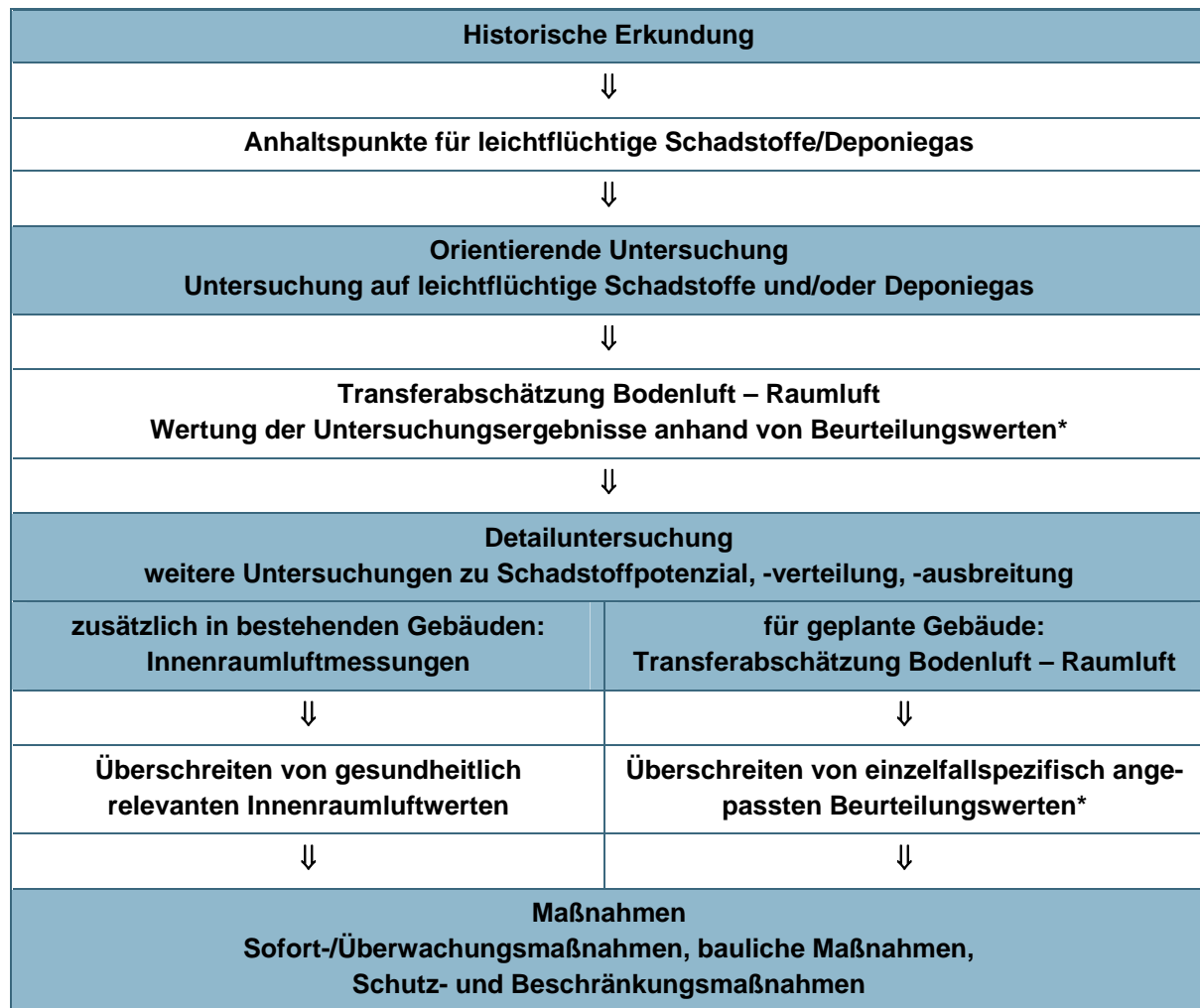
# 1 Allgemeine Hinweise

## 1.1 Anwendungsbereich

Dieses Merkblatt gibt Hinweise für die Untersuchung und Bewertung von flüchtigen Stoffen (vgl. § 3 Abs. 6 BBodSchV) und von Deponiegas bei Altablagerungen im Hinblick auf den Wirkungspfad Boden-Mensch. Diese Hinweise gelten für die Bearbeitung von altlastverdächtigen Flächen sowie Flächen mit Verdacht auf bestimmte stoffliche schädliche Bodenveränderungen. Im Folgenden werden diese Flächen stets verkürzt als Altlastverdachtsflächen bezeichnet. Damit werden in fachlicher Hinsicht die Vorgaben des BBodSchG [1], der BBodSchV [2], des BayBodSchG [3] und der BayBodSchVwV [4] für den Wirkungspfad Boden-Mensch (Pfad Bodenluft) konkretisiert. Die Untersuchung und Bewertung von Altlasten, schädlichen Bodenveränderungen und Gewässerverunreinigungen für den Wirkungspfad Boden – Mensch (direkter Kontakt) und den Wirkungspfad Boden – Gewässer sind Gegenstand eigener Merkblätter.

Die Vorgehensweise zur Untersuchung und Bewertung von Altlastverdachtsflächen im Vollzug des Bodenschutzrechts ist in der Verwaltungsvorschrift zum Vollzug des Bodenschutz- und Altlastenrechts in Bayern (BayBodSchVwV) festgelegt. Die folgenden Hinweise beziehen sich auf die Bearbeitungsphasen orientierende Untersuchung (Nr. 4.1.1.4 der BayBodSchVwV) und Detailuntersuchung (Nr. 4.1.2.2 der BayBodSchVwV). Beim Wirkungspfad Boden-Mensch beteiligt die Kreisverwaltungsbehörde die Gesundheitsverwaltung. Im Rahmen der orientierenden Untersuchung führt das Wasserwirtschaftsamt die erforderlichen Untersuchungen für die Gesundheitsverwaltung in Amtshilfe durch. In der Regel werden nach § 18 BBodSchG zugelassene Sachverständige und Untersuchungsstellen mit dieser Aufgabe beauftragt. Deren Zulassung erfolgt nach der Verordnung über Sachverständige und Untersuchungsstellen für den Bodenschutz und die Altlastenbehandlung in Bayern (VSU Boden und Altlasten [5]).

Die Ergebnisse der orientierenden Untersuchung und Detailuntersuchung sind grundsätzlich auch im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung der menschlichen Gesundheit zu bewerten. Die Ergebnisse von Bodenluftuntersuchungen können konkrete Anhaltspunkte für das Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast bieten und somit Anlass zu weiteren Maßnahmen im Rahmen einer Detailuntersuchung geben. Sollen auf Grundlage von Boden- und Bodenluftmessungen auch Innenraumlufmessungen erfolgen (vgl. § 3 Abs. 6 BBodSchV), dann soll dies im Rahmen der Detailuntersuchungen geschehen. Daneben ist bei Deponiegas die mögliche Gefährdung durch explosive Stoffe und Stoffgemische zu untersuchen und zu bewerten. Die Bewertungsmaßstäbe für Innenraumluftbelastungen ergeben sich aus dem für den Arbeitsschutz (gewerbliche Räume) und Gesundheitsschutz in Innenräumen anzuwendenden Recht. In nachfolgender Abbildung 1 sind die erforderlichen Untersuchungen und Maßnahmen dargelegt, die sich aus Sicht des Bodenschutzes bzw. aus Sicht des Gesundheitsschutzes bei Verdacht auf Ausbreitung flüchtiger Schadstoffe in Innenräume ergeben.



\* Beurteilungswerte sind anhand der orientierenden Hinweise (Kap 3.2) für den Einzelfall abzuleiten. Bei unzureichender Datenlage kann auf die in Tabelle A1 gelisteten Werte zurückgegriffen werden.

Abb. 1: Untersuchungen und Maßnahmen bei Verdacht auf Ausbreitung flüchtiger Schadstoffe in Innenräume

## 1.2 Begriffsbestimmungen

### Advektion

durch Konvektion (s. u.) in Gasen und Flüssigkeiten hervorgerufener Stofftransport

### Diffusion

Bewegung bzw. Vermischung von Stoffen aufgrund der Molekularbewegung

### Konvektion

durch Dichteunterschiede (z. B. auch infolge von Temperaturunterschieden) hervorgerufene Strömungen in Gasen und Flüssigkeiten

### Migration

Durchströmen von Spalten, Rissen und Porenhohlräumen, insbesondere von Gasen

### **Sorption**

Sammelbezeichnung für die selektive Aufnahme eines Stoffes (Sorbat) an/durch einem/n anderen Stoff (Sorbens), z. B. Schadstoffe an Bodenpartikeln

### **Transfer- bzw. Verdünnungsfaktor**

Verhältnis der gemessenen oder berechneten Konzentrationen eines Schadstoffes zwischen der Bodenluft und einem definierten Luftbereich (z. B. Innenraum Keller)

## 2 Untersuchung von flüchtigen Stoffen bei Altablagerungen und Altstandorten

Alle gasförmigen Stoffe im Untergrund, auch die in künstlichen Hohlräumen enthaltenen Gase, werden als Bodenluft bezeichnet. Eine spezielle Form der Bodenluft stellt das sogenannte Deponiegas dar, d. h. die in einer Deponie bzw. Altablagerung durch mikrobiellen Abbau entstehenden Gase mit den Hauptkomponenten Methan und Kohlendioxid. In der Regel spielt die Bodenluft als Transport- und Ausbreitungsmedium in rolligen Böden (z. B. sandige Kiese) und untergeordnet in Auflockerungszonen und geklüftetem Fels eine Rolle. In bindigen Böden wie Schluff oder Ton kann z. B. über Schrumpfungsrisse ein relevanter Gastransport erfolgen.

Über die Gasphase können sich flüchtige Stoffe ausgehend von der Schadstoffquelle mit vergleichsweise großer Geschwindigkeit ausbreiten. Wenn ein Austreten der Stoffe an der Bodenoberfläche und somit eine stetige Verdünnung erschwert ist, z. B. durch eine Bodenversiegelung, kann sich je nach Stärke der Kontamination die Konzentration in der Bodenluft erhöhen.

Beim Eindringen von Bodenluft in Gebäude durch Fugen oder Risse kann eine Gefahr für die Gesundheit oder die Sicherheit von Bewohnern oder Anwohnern resultieren.

### 2.1 Hauptkomponenten und Spurenstoffe im Deponiegas

#### 2.1.1 Hauptkomponenten

Altablagerungen, insbesondere solche mit Siedlungsabfällen, emittieren meist sogenanntes Deponiegas. Durch mikrobiellen Abbau entstehende Hauptbestandteile sind Kohlendioxid und das im Gemisch mit Luft explosionsfähige Methan. Deponiegas kann aus bis zu 80 % Volumenanteilen Methan, bis zu 60 % Volumenanteilen Kohlendioxid und einer Vielzahl von flüchtigen Schadstoffen, den sog. Spurenstoffen bestehen.

#### 2.1.2 Spurenstoffe

Die Spurenstoffe im Deponiegas liegen meist deutlich unter einem Volumenanteil von 1 %. Nach der VDI-Richtlinie 3790 [6] beträgt die Summe der Konzentrationen an Spurenstoffen in der Regel weniger als  $1.000 \text{ mg/m}^3$ , in Ausnahmefällen bis zu  $10.000 \text{ mg/m}^3$  (Umrechnung in Volumenanteile s. Anhang C).

Für die Bodenluftuntersuchungen sind vor allem Stoffe mit einem vergleichsweise hohen Dampfdruck und einer schädlichen Wirkung auf Mensch und Umwelt von Bedeutung. Die wesentlichen Stoffgruppen bzw. relevanten Vertreter von flüchtigen Schadstoffen im Deponiegas sind in der Tabelle A2 des Anhangs A aufgeführt. Dort finden sich in der 2. Spalte Messwerte für Spurenstoffe im Deponiegas von sechs bayerischen Deponien [7], in der 3. Spalte Literaturwerte für diese Stoffe [8-10].

Im Einzelfall sind folgende weitere Spurenkomponenten in Betracht zu ziehen:

- Phenole,
- aliphatische Kohlenwasserstoffe (Mineralölkohlenwasserstoffe),
- Schwefelkohlenstoff, Methanthiol, Ethanthiol, 2-Propanthiol, 2-Butanthiol, Dimethylsulfid und weitere Mercaptane,
- Ammoniak,
- hochtoxische Spurenkomponenten wie Phosphorwasserstoff (Phosphin, Phosphan) oder Arsenwasserstoff (Arsin, Arsan),
- Gesamt-Chlor, Gesamt-Fluor und Gesamt-Schwefel.

Die Stoffe Acrylnitril und Epichlorhydrin konnten an keinem der untersuchten bayerischen Standorte nachgewiesen werden [7].

## 2.2 Flüchtige Schadstoffe bei Altstandorten

Bodenverunreinigungen mit flüchtigen Schadstoffen (Dampfdrucke von 1 kPa und mehr) können an Altstandorten zu erhöhten Belastungen der Bodenluft führen. Häufig treten Benzol und Benzolderivate (BTEX), leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (LHKW), niedermolekulare polyzyklische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) auf, im Einzelfall können weitere flüchtige Schadstoffe von Bedeutung sein; diese ergeben sich aus der früheren Nutzung des Standorts. Methan kann durch anaeroben Abbau von organischen Schadstoffen im Boden entstehen.

Im Bereich des Kapillarsaumes in der Grundwasserwechselzone findet ein Eintrag in das bzw. ein Austrag von flüchtigen Stoffen aus dem Grundwasser statt. Das Grundwasser kann deshalb auch durch Bodenluftkontaminationen verunreinigt werden und umgekehrt die Bodenluft durch Grundwasserkontaminationen. Für Geländebedingungen gibt es jedoch keinen einfachen allgemein gültigen Zusammenhang zwischen den Konzentrationen in Bodenluft und Grundwasser bzw. in Bodenluft und Bodenfestsubstanz.

## 2.3 Probenahmeplanung

Altlastverdachtsflächen sind repräsentativ zu untersuchen. Ziel ist es, den Gefahrenverdacht zu klären und fachlich fundierte Entscheidungen über die weiteren Nutzungsmöglichkeiten bzw. ggf. erforderlichen Sanierungsmaßnahmen zu treffen. Die Untersuchungen erfolgen auf der Grundlage des BBodSchG [1] und der BBodSchV [2]. Um zu einer Gefährdungsabschätzung zu gelangen, sind eine qualifizierte historische Erkundung sowie eine orientierende und ggf. eine Detailuntersuchung erforderlich. Untersucht werden Boden, Bodenluft und/oder Grundwasser. Diese Untersuchungen sollen von Sachverständigen und Untersuchungsstellen gemäß der VSU Boden und Altlasten [5] durchgeführt werden.

Im Einzelfall sind im Rahmen der Detailuntersuchung auch die Innenraumluft bzw. die atmosphärische Umgebungsluft zu untersuchen.

Die Untersuchung von Altlastverdachtsflächen erfolgt stufenweise und richtet sich nach der Bearbeitungsphase (orientierende Untersuchung, Detailuntersuchung), den im Einzelfall berührten Wirkungspfaden, dem Schadstoffspektrum sowie der vermuteten horizontalen und vertikalen Schadstoffverteilung. Zur Probenahmeplanung, Entnahme und Untersuchung von Bodenluftproben wird auf das LfU-LfW-Merkblatt 3.8/4 „Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Boden-

Veränderungen für die Wirkungspfade Boden – Mensch und Boden – Gewässer“ [11], ferner auf die Arbeitshilfe zur „Qualitätssicherung bei der Gewinnung von Boden- Bodenluft- und Grundwasserproben“ der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) [12] verwiesen.

### 2.3.1 Orientierende Untersuchung

Bei der Probenahmeplanung im Rahmen der orientierenden Untersuchung sind vor allem nachfolgende standortbezogene Kriterien zu berücksichtigen:

- Nutzung (frühere, derzeitige, planungsrechtlich zulässige Nutzung): Aus der früheren und derzeitigen Nutzung können Hinweise auf zu erwartende Schadstoffe und Kontaminationsschwerpunkte abgeleitet werden.
- Bebauung, Oberflächenversiegelung: Da sich z. B. unter einer Bodenplatte eines Gebäudes oder in der Schottertragschicht einer Oberflächenversiegelung Schadstoffe in der Bodenluft anreichern können, kann an einem solchen Punkt die maximale Schadstoffkonzentration in der Bodenluft bestimmt werden.
- Bewuchs: Der Bewuchs kann Hinweise auf Schadstoffgehalte im Boden liefern (z. B. unterschiedliche Bewuchsdichte, geschädigte Pflanzen). Mehrjähriger Bewuchs kann anzeigen, wann zum letzten Mal die Bodenoberfläche künstlich verändert wurde.
- Erkennbare Schäden an Gebäuden: Setzungsschäden an Gebäuden, z. B. Risse in Wänden, Fußböden oder Fundamenten, können Hinweise auf den Umgriff von Altablagerungen oder mögliche Schadstoffwegsamkeiten im Untergrund von Altstandorten liefern.
- Geländeform: Die Geländeform kann Hinweise auf im Untergrund vorhandene Altablagerungen geben.

Es hängt wesentlich von den Informationen aus der historischen Erkundung ab, welche Stoffe untersucht werden. So können beispielsweise Hinweise über abgelagerte Abfälle vorliegen, die auf bestimmte toxische Stoffe hindeuten. Alternativ können auch bereits toxische Verbindungen in Innenräumen nachgewiesen worden sein.

Bei Verdacht auf organische und/oder hausmüllähnliche Ablagerungen sind als sogenannte Feldparameter die typischen Deponiegashauptkomponenten Methan und Kohlendioxid sowie Sauerstoff im Deponiekörper bzw. im Boden zu ermitteln, ggf. auch Schwefelwasserstoff.

Liegen keine Informationen hierzu, jedoch ein Verdacht auf leichtflüchtige Schadstoffe vor, sind grundsätzlich LHKW einschließlich Vinylchlorid und BTEX zu untersuchen. Diese Beschränkung ist insofern fachlich gerechtfertigt, als damit wichtige Vertreter der kanzerogenen Stoffpalette erfasst werden und es sich um Stoffe handelt, die – wie in der Tabelle A3 des Anhangs A dargelegt – in relevanten Konzentrationen vorkommen können. Ergibt sich aus den vorliegenden Ergebnissen ein Verdacht auf weitere gasförmige Schadstoffe, ist das Schadstoffspektrum um diese zu erweitern [13].

Ergeben sich bei der orientierenden Untersuchung **Methangehalte von mehr als 1 Vol.-%** in der Bodenluft nahe an Gebäuden, sollte im nächsten Schritt eine **unverzögliche Überprüfung der Innenraumluft** und ggf. eine weitere Überwachung erfolgen. Es muss zu jeder Zeit sichergestellt werden, dass Methangehalte in Innenräumen die untere Explosionsgrenze von 5 Vol.-% nicht überschreiten. Die Anwesenheit von weiteren Spurenstoffen sollte bei positivem Methan-Befund ebenfalls geprüft werden.



### 2.3.2 Detailuntersuchung

Der Probenahmeplanung im Rahmen der Detailuntersuchung liegen die Gutachten und Ergebnisse der orientierenden Untersuchung zugrunde. Sie ist jeweils auf den Einzelfall abzustimmen, wobei auch hier ein schrittweises Vorgehen zweckmäßig ist. Nach Anhang 1 BBodSchV umfasst die Detailuntersuchung vor allem die Ermittlung der räumlichen Ausdehnung der Kontaminationsbereiche, die Verfügbarkeit der Schadstoffe sowie die Ermittlung der Exposition der Schutzgüter.

Zur Abschätzung des Transmissionspotenzials ist der Schadstofftransport im Boden zu untersuchen, der u. a. wesentlich von der Gasdurchlässigkeit des Bodens abhängt (s. auch Abschnitt 3.1.2). Auch der Versiegelungsgrad der Altlast, die Mächtigkeit und Durchlässigkeit, ggf. Oberflächenabdeckung und Basisabdichtung, die Tiefe der Kontamination und die Länge des Transportweges vom Emissions- zum Immissionsort sind für das Transmissionspotenzial einer Altlast von Bedeutung.

**Bei bestehenden Gebäuden** sollte die Überprüfung der Innenraumluft durch **Raumluftmessungen** im Rahmen der Detailuntersuchung erfolgen.

Wenn (im Ausnahmefall) Innenraumluftmessungen bereits vorliegen, kann umgekehrt die Bodenluftuntersuchung ein Baustein bei der Ursachenermittlung der Innenraumluftbelastung sein.

Hat sich der Verdacht eines Schadstoffeintrages aus der Bodenluft in Innenräume erhärtet, empfiehlt es sich, den Gebäudezustand durch Bausachverständige überprüfen zu lassen. Ziel ist es dabei, offensichtliche bauliche und technische Mängel festzustellen, die für den Schadstoffeintrag aus der Bodenluft in Innenräume verantwortlich sein können. Sind Erfolge bei der Gefahrenabwehr kurzfristig nicht zu erzielen, können wiederholte Messungen zur Überwachung der Schadstoffbelastung in Innenräumen angebracht sein.

### 3 Bewertungsgrundlagen

#### 3.1 Szenarien der Ausbreitung von flüchtigen Schadstoffen

Nachfolgend wird der Wirkungspfad Boden – Bodenluft – Mensch betrachtet. Andere Pfade sind nicht Gegenstand dieses Merkblatts.

Eine Beeinträchtigung des Schutzgutes menschliche Gesundheit durch kontaminierte Bodenluft kann vor allem über die folgenden beiden Wirkungspfade stattfinden:

- Bodenluft – Atmosphärenluft (bodennahe Außenluft) – Mensch
- Bodenluft – Innenraumluft – Mensch

Für die Stoffaufnahme ist sowohl im freien Gelände als auch in umbauten Räumen die inhalative Aufnahme von Gasen maßgeblich. Staubgebundene Schadstoffe werden hier nicht betrachtet; sie werden mit dem Wirkungspfad Boden – Mensch (direkter Kontakt) erfasst (siehe LfU-Merkblatt Altlasten 1 [14]). Als Quellen für Schadstoffe in der Bodenluft kommen sowohl Kontaminationen der ungesättigten Bodenzone als auch Grundwasserverunreinigungen mit flüchtigen Stoffen infrage.

Die Ausgasung aus einer Schadstofffahne im Grundwasser in einen nach oben durchlässigen Bodenkörper erfolgt kontinuierlich; eine solche "Sekundärquelle" kann sich auf wesentlich größere Flächen auswirken als eine meist lokal begrenzte Kontamination der ungesättigten Bodenzone [15].

Ein Gleichgewicht zwischen der Schadstoffkonzentration  $c_W$  im Grundwasser und  $c_{BL}$  in der Bodenluft lässt sich theoretisch durch den Henry-Koeffizienten beschreiben [16]. Danach würde z. B. eine Grundwasserkonzentration von 10 µg/l Trichlorethen (Prüfwert der BBodSchV für Summe LHKW im Sickerwasser) gemäß  $H=c_{BL}/c_W$  eine Bodenluft-Konzentration von 2,8 mg/m<sup>3</sup> bewirken ( $H = 0,28$  bei 15°C). Die tatsächlich in der Bodenluft sich einstellende Konzentration wird allerdings infolge von Transportvorgängen im ungesättigten Bodenkörper und durch mikrobielle Umwandlung (z. B. bei Benzinkohlenwasserstoffen und alkylierten Benzolen (BTEX und verwandte Verbindungen) [17, 18]) zu niedrigeren Werten verschoben.

Der horizontale und vertikale Gastransport in der ungesättigten Bodenzone erfolgt durch Advektion und Diffusion. Diese haben ihre Ursache in Luftdruckschwankungen, Temperaturunterschieden, Schwankungen der Grundwasseroberfläche, dem Versickern von Niederschlag und ggf. in der verstärkten mikrobiellen Produktion von Gasen in Altablagerungen und an Altstandorten. Die Diffusion sorgt stets für einen Konzentrationsausgleich von höher belasteten zu weniger bzw. nicht belasteten Bereichen und mithin für eine Vergrößerung des Schadensbereichs.

Der Umfang des Gastransports im Boden wird im Wesentlichen von der Durchlässigkeit des Bodens bestimmt, d. h. von der Korngrößenverteilung, der Struktur des Bodenmaterials und seiner Lagerungscharakteristik, dem Wassergehalt und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff des Bodens sowie der u. a. davon abhängigen Sorptionsfähigkeit für Schadstoffe. Als zeitlich variable Größe hat der Bodenwassergehalt den größten Einfluss. In der Regel findet durch Advektion ein stärkerer Stofftransport statt als durch Diffusion.

Neben dem Gastransport im Boden ist für den Wirkungspfad Boden – Mensch der Übertritt der Bodenluft an der Grenze zwischen Boden und Außen- bzw. Innenraumluft von entscheidender Bedeutung. Die Bandbreite eines Transportwiderstandes reicht von einer unbefestigten Bodenoberfläche (starker Konzentrationsgradient im Boden infolge schnellen Abtransportes ausgasender Stoffe) bis zu

einem ausgebauten Keller mit wasserdichtem Beton ohne Risse und Fugen (sog. „weiße Wanne“; durch das Porenwasser des Betons wird die Diffusion potenziell stark verlangsamt; hier ist eher eine Anreicherung in der Bodenluft unter der Bodenplatte gegeben). Die Bandbreite der resultierenden Konzentrationen in der Außen- oder Innenluft umfasst deshalb viele Größenordnungen.

Wegen des möglichen Einflusses vieler Faktoren auf die Konzentration von Schadstoffen in der Bodenluft sollte die Aussagekraft einzelner Messwerte nicht zu hoch bewertet werden. Es ist in jedem Fall sinnvoll, bei Vorkommen flüchtiger Stoffe mehrere Untersuchungen durchzuführen, um eine höhere statistische Sicherheit zu erhalten. Für eine Bewertung sind in erster Linie die Bodenluftkonzentrationen in Nachbarschaft zu Gebäuden maßgebend, vorzugsweise in der Nähe möglicher Fugen und Leitungsdurchführungen sowie unter versiegelten Flächen. Eine Verfälschung der Messergebnisse durch Ansaugen von Außenluft bei der Probenahme muss vermieden werden.

Zum Transfer von Schadstoffen aus der Bodenluft in die bodennahe Außenluft bzw. die Luft von Innenräumen werden im Folgenden plausibel erscheinende Szenarien dargestellt, aus denen sich Verdünnungsfaktoren ableiten lassen.

### 3.1.1 Szenarien Bodenluft – Außenluft

Betrachtet wird die Emission flüchtiger organischer Stoffe (VOC) aus der Bodenluft in die Atmosphäre. Als Transportmechanismus wird ausschließlich die Diffusion angesetzt.

Seeger [19] unterscheidet Emissionsszenarien für freies Gelände und offene Gruben.

Für das **freie Gelände** errechnet Seeger unter bestimmten Annahmen ein Verdünnungsverhältnis Bodenluft : Außenluft von rd. 70.000. Dieser im Szenario Bodenluft – Außenluft ermittelte Verdünnungsfaktor stimmt mit den aus Immissionsmessungen von Rettenberger [20] bzw. Bruckmann und Mülder [21] ermittelten Verdünnungsfaktoren von ca. 10.000 gut überein, sodass für den Regelfall ein **Verdünnungsfaktor von 10.000** gelten kann.

Offene Gruben werden in der Praxis der Altlastenbearbeitung fast ausschließlich durch Personen begangen, die dem Arbeitsschutz unterliegen. Die Exposition gegenüber Gefahrstoffen, die aus dem Boden mit meist unregelmäßig verteilten Schadstoffen ausgasen, kann durch Berechnungen nicht abgeschätzt werden. Offene Baugruben im Bereich von Altlasten müssen deshalb grundsätzlich messtechnisch überwacht werden.

### 3.1.2 Szenarien Bodenluft – Innenraumluft

Für aus Bodenluftbelastungen resultierende Stoffkonzentrationen in der Raumluft werden nachfolgend einige Szenarien nach Seeger [19] aufgelistet. Als Transportmechanismus wird außer der Diffusion je nach Fallgestaltung auch die Advektion berücksichtigt.

Die Szenarien unterscheiden sich in der Art der betrachteten Gebäude/Gebäudeteile, der Gebäude-sole (unbefestigter Boden, Betonplatte), der Raumhöhen, der Lüftung (schlecht-gering: Luftwechsellzahl 0,1–0,5; mittel/normale Wohngebäude: ca. 1; gut/Arbeitsstätten: >4) sowie der Annahmen zu durch Wind- und Temperatureinfluss verursachte Druckströmungen.

Zusammenfassend können aus den Szenarien folgende Verdünnungsfaktoren für den Übergang von der Bodenluft in die Innenraumluft abgeleitet werden (s. Tabelle 1):

Tabelle 1:  
Zusammenstellung von Verdünnungsfaktoren für den Übergang Bodenluft zu Innenraumluft für unterschiedliche Fallszenarien nach Seeger [19]

Gebäude	Situation	Transport	Verdünnungsfaktor
Industriegebäude	durchlässiger Boden, gute Lüftung	diffusiv	3000
Kellerraum	durchlässiger Boden, schlechte Lüftung	diffusiv	25
Wohngebäude A1	durchlässiger Boden, mittlere Lüftung	diffusiv	350
Wohngebäude A2	durchlässiger Boden, mittlere Lüftung, Heizperiode	diffusiv und advektiv	80
Wohngebäude B	dichter Boden, sehr geringe Lüftung	diffusiv	3500
Wohngebäude C1	rissiger Boden, geringe Lüftung	diffusiv	5000
Wohngebäude C2	rissiger Boden, geringe Lüftung, Heizperiode	diffusiv und advektiv	40

Bei bewohnten Kellern (Souterrain-Wohnungen) ist von einem höheren Luftwechsel und damit entsprechend geringeren Raumlufkonzentrationen auszugehen. Infolge von Temperaturdifferenzen zum umgebenden Erdreich kann aber eine Druckdifferenz durch aufsteigende Wärme zusätzlich einen advektiven Transport von Bodenluft in den Kellerraum bewirken (s. Beispiele Wohngebäude A2 und C2). Damit ist vor allem bei Wohngebäuden zu rechnen. Auch durch eine Beton-Bodenplatte ohne Risse kann bei Temperaturdifferenz zwischen außen und innen ein Schadstofftransport erfolgen [22].

Aus den ausgewerteten Untersuchungen verschiedener Arbeitsgruppen [23-29] lässt sich, wie auch gemäß Tabelle 1, ein Verdünnungsfaktor von lediglich 25 für Kellerräume ableiten, der für ungünstige, aber noch realistische Bedingungen gelten kann. Hempfling et al. [30] leiten einen Faktor 100 u. a. aus Modellergebnissen von Garbesi et al. [31, 32] ab; er wird zur Abschätzung der Innenraumbelastung in Kellerräumen für einzelfallspezifische Risikoabschätzungen im sog. UMS-System („Umwelt – Mensch – Schadstoff“) angesetzt.

Kellerräume sind – von Souterrainwohnungen abgesehen – nicht für den ständigen Aufenthalt von Personen gedacht. Allerdings gelangen Schadstoffe auch aus dem Keller in Erdgeschosswohnungen, die im Allgemeinen dauerhaft bewohnt sind; hier ist eine um etwa den Faktor 3-4 größere Verdünnung gegeben als in den Kellerräumen [33].

Die Luftzufuhr in Wohnräume setzt sich aus drei Komponenten zusammen [34]:

- Infiltration von Außenluft und Bodenluft durch unkontrollierte Leckagen, durch Ritzen und Löcher im Gebäude, ggf. über den Keller,
- Ventilation durch offene Türen und Fenster,
- mechanische Belüftung durch Klimaanlage, Ventilatoren o. Ä.

Die Luftwechselzahlen liegen für Wohnräume in Deutschland bei  $0,4-1,5 \text{ h}^{-1}$  [35]. Nach Hodgson et al. [36] kann die über den Keller in ein Gebäude gelangte Bodenluft bei vollständiger Durchmischung um den Faktor 1.000 verdünnt werden. Es wird allerdings eingeräumt, dass im untersuchten Modellhaus das konvektive Eindringen von Bodenluft in das Hausinnere durch eine geringe Durchlässigkeit des Bodens und einen relativ kleinen Belastungsbereich zwischen Boden und Keller limitiert war. Die Autoren verweisen auf eine Studie mit einem mittleren Verdünnungsfaktor für Radon von 25 (Medianwert für 15 Häuser). Weitere Untersuchungen zum Verdünnungsfaktor Bodenluft – Innenraumlufte für Radon und organische Schadstoffe werden in „PBA“ (Umweltbundesamt [Hrsg]: Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten [37]) referiert. Albering et al. [33] fanden eine gute Korrelation zwischen den Radonkonzentrationen in der Bodenluft und den Innenräumen; größere Schwankungen in den Faktoren wurden beobachtet, wenn die Radon-Konzentrationen außen einen zu niedrigen Hintergrund aufwiesen oder wenn kleinräumige Uranvorkommen vorlagen. Trotz der großen Unsicherheiten (Schwankungsbereich für die organischen Stoffe 100-10.000, für Radon auch kleinere Werte) wird ein Faktor 1000 für hinreichend konservativ gehalten [37].

Zu beachten ist allerdings auch, dass flüchtige Schadstoffe wie LHKW nach Eindringen in Kanäle oder Schächte je nach Quellstärke auch noch in mehrere hundert Meter entfernte Gebäude eindringen können. Dies lässt sich durch Modelle nicht erfassen. Das Gleiche gilt für eine etwaige Anreicherung unpolarer Stoffe in Fetten von Lebensmitteln. Dieser Prozess war maßgebend für die Ableitung eines Innenraumlufte-Grenzwertes für Tetrachlorethen in Nachbarschaft zu Chemisch-Reinigungen (gemäß 2. BImSchV [38]).

### 3.1.3 Migration von Deponiegas

Deponiegas und aus anderen Bodenverunreinigungen sich entwickelndes Methan können infolge eines sich ausbildenden Überdrucks über erhebliche Distanzen hinweg in den angrenzenden Untergrund gelangen. Lockere Böden mit geringem Wassergehalt fördern die Gaswanderung, während bindige, wassergesättigte Böden diese behindern. In feinkörnigen, lehmig-tonigen Böden beispielsweise ist eine seitliche Gasmigration nur über wenige Meter möglich, während in Lockersedimenten durchaus Migrationen über mehrere hundert Meter vorkommen können.

Für eine überschlägige Ermittlung der maximalen Entfernung von einer Ablagerungsgrenze, ab der in der Bodenluft die untere Explosionsgrenze bei Methan-Luftgemischen von 5 % Volumenanteilen unterschritten wird, kann die folgende Faustformel nach [39] angewandt werden:

$$D = 10 \cdot h$$

D: Reichweite der Migration (in m)

h: Ablagerungsmächtigkeit des Hausmülls oberhalb des Grundwasserspiegels (in m)

Neben den o. g. Möglichkeiten der horizontalen und vertikalen Ausbreitung von Deponiegas stellen – ebenso wie bei den flüchtigen Schadstoffen – außerhalb einer Ablagerung befindliche Kabelkanäle,

Rohrleitungen, Abwasserkanäle, Straßenentwässerungen o. ä. bevorzugte Gasleitwege dar, durch die das Gas über erhebliche Strecken weitertransportiert werden kann. Deponiegas kann somit u. U. auch in entfernte (vor allem unterkellerte) Bauwerke und in Schächte eindringen, wenn zwischen ihnen und der Altablagerung eine gute Gaswegsamkeit im Untergrund gegeben ist.

#### **3.1.4 Fazit**

Die Abschätzung des Schadstofftransfers aus dem Boden in die Innenraumluft ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Die modellhaften Annahmen werden sehr stark von standortspezifischen Faktoren wie Bodeneigenschaften (Porosität, Durchlässigkeit) und Gebäudecharakteristika (Art und Beschaffenheit der Bausubstanz) bestimmt.

Die ausgewerteten Literaturstellen mit experimentellen Untersuchungen ergeben beim Szenario Bodenluft – Innenraumluft Verdünnungsfaktoren zwischen 25 und 5.000.

Für das Szenario Bodenluft – bodennahe Außenluft lässt sich eine Verdünnung in der Größenordnung von 10.000 angeben. Nach Ausgasung aus der Bodenluft tragen Schadstoffe nur bei hohen Bodenluftkonzentrationen zu einer messbaren Belastung der Außenluft bei. Bei üblichen Bedingungen ist davon auszugehen, dass sich die Konzentrationen im Bereich der Hintergrundbelastung bewegen.

### **3.2 Orientierende Hinweise für die Bewertung von flüchtigen Stoffen in der Bodenluft**

Zur Bewertung flüchtiger Schadstoffe für den Wirkungspfad Boden – Bodenluft – Mensch können die von der LABO im Papier „Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug; Stand: 1. September 2008“ [40] veröffentlichten „Orientierende Hinweise“ herangezogen werden. Die tabellierten Werte sind in Anhang A, Tabelle A4 und Tabelle A1 aufgeführt. Diese Werte sind in ihrer rechtlichen Verbindlichkeit nicht mit den Prüfwerten der BBodSchV gleichzusetzen, können jedoch als Bewertungshilfe dienen.

Da die „Orientierende Hinweise“ nicht ohne die im LABO-Informationsblatt [40] gegebenen Erläuterungen verwendet werden sollten, sind im Folgenden auch Angaben aus dem LABO-Informationsblatt wiedergegeben.

#### **3.2.1 Bewertung von flüchtigen Schadstoffen im Bodenfeststoff**

Bei ungünstigen Randbedingungen wie z. B. geringer Durchlässigkeit oder hohem Resorptionsvermögen des Bodens sind Bodenluftuntersuchungen entweder nicht zielführend oder die Aussagekraft daraus gewonnener Ergebnisse ist stark eingeschränkt. In diesen besonderen Fällen erfolgt die Untersuchung von flüchtigen Stoffen im Boden (Festsubstanz). Für die Bewertung können die Werte aus Tabelle A4, Anhang A, herangezogen werden.

#### **Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe – Bodenfeststoffwerte**

(zitiert aus LABO: „Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug; Stand: 1. September 2008“ [40])

##### Zum Wertebegriff und zur Bedeutung

Die Berechnungen der orientierenden Hinweise erfolgten nicht ausschließlich auf Grundlage der Bekanntmachung der Ableitungsmethoden und -maßstäbe im Bundesanzeiger Nr. 161a vom 28. August

1999 [41], sondern auch auf Grundlage der „Ergänzenden Ableitungsmethoden und -maßstäbe bei weiteren Stoffen (flüchtige Stoffe)“ (als Teil 2 PBA) [37]. Die Ableitung verwendet Expositionsszenarien mit höherer Abhängigkeit von den Randbedingungen des Einzelfalls.

Das für flüchtige Stoffe entwickelte neue Szenario beschreibt unter bestimmten, bisher nicht festgelegten Expositionsannahmen den Übergang von Schadstoffen über die Bodenluft in Gebäude hinein und die Anreicherung in geschlossenen Räumen. Bei diesem Expositionsszenario können unter den Randbedingungen des Einzelfalls auch bei Unterschreitung der abgeleiteten Werte Gefährdungen nicht ausgeschlossen werden. Stoffbezogene Berechnungen, denen weitere Expositionsszenarien (gegenüber den Ableitungsmethoden und -maßstäben im Bundesanzeiger Nr. 161 a) zugrunde liegen, werden im PBA [37] als ‚orientierende Hinweise auf Prüfwerte‘ bezeichnet. Um das unterschiedliche Wertenniveau noch deutlicher zu machen, wird hier ausschließlich der Begriff ‚**orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe**‘ verwendet.

Es wird darauf hingewiesen, dass die ergänzenden Ableitungsmethoden und -maßstäbe für flüchtige Stoffe zu orientierenden Hinweisen führen, die in ihrer rechtlichen Verbindlichkeit nicht denen gleichzusetzen sind, die auf Grundlage der für den Anhang 2 BBodSchV herangezogenen Methoden und Maßstäben abgeleitet wurden. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Verallgemeinerungsfähigkeit des Expositionsszenarios für flüchtige Stoffe als geringer eingeschätzt werden muss, da der Eintrag von flüchtigen Stoffen aus dem Boden in die Raumluft weitgehend von standortspezifischen Faktoren abhängig ist.

Die humantoxikologischen Bewertungsmaßstäbe (TRD-Werte) für die Stoffe bzw. Stoffgruppen der Tabelle „Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe (stoffbezogene Berechnungen) bei Untersuchungen des Bodenfeststoffes“ (s. Anhang A, Tabelle A4) sind wie bei den Stoffen, die bereits in der BBodSchV geregelt sind, konsentiert worden.

Hinweis: Korrespondierende Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft sind unter Berücksichtigung einer Kappungsgrenze in Tabelle „Orientierende Hinweise (stoffbezogene Berechnungen) für flüchtige Stoffe in der Bodenluft“ (s. Anhang A, Tabelle A1) aufgeführt.

#### Zur Ableitung

In der Tabelle **Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe (stoffbezogene Berechnungen)** werden diejenigen Stoffe geführt, bei denen beim Vergleich verschiedener Aufnahmepfade (oral, inhalativ, dermal) der Expositionspfad „Anreicherung in geschlossenen Räumen“ und inhalative Aufnahme den Ausschlag für die Ableitung eines Wertes für die angegebenen Nutzungen gibt. Bei diesen Stoffen ist aufgrund der starken Verdünnung von Bodenluft in die Außenluft bzw. bei oraler Bodenaufnahme eine Gefährdung von Kindern im Außenbereich (Nutzungskategorien Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitanlagen) erst bei hohen Konzentrationen möglich. Die im Einzelnen berechneten Konzentrationen sind hier nicht aufgeführt und aufgrund ihrer Höhe in der Regel nicht bewertungsrelevant (Näheres siehe „Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten“, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1999 [37]).

**Soweit Kinderspielflächen an Wohngebäude angrenzen, sind die Flächen bezüglich einer möglichen Innenraumbelastung als 'Wohngebiete' zu untersuchen und zu bewerten.**

Für den Transfer Bodenluft -> Kellerinnenraumluft wird ein Transferfaktor von 1:1.000 zu Grunde gelegt, der für viele Fälle als ausreichend konservativ beschrieben wird. Das heißt, es wird davon ausgegangen, dass sich die (Schadstoff)-Konzentration beim Übergang in die Innenraumluft um den Faktor 1.000 verdünnt. Zu beachten ist, dass dieser Transferfaktor im Einzelfall bei sehr ungünstigen Bedingungen niedriger liegen kann (z. B. 1:200), was dann zu einer Risikounterschätzung führen würde. Er kann aber auch – je nach Bausubstanz – deutlich höher liegen (z.B. 1:10.000). Die Anwendung der Werte für die flüchtigen Stoffe bedarf der Einzelfallprüfung.



**Bei der Bewertung eines möglichen Übergangs von Schadstoffen des Bodens über die Bodenluft in die Raumluft ist zu beachten, dass die gemessenen Werte und die verwendeten Faktoren nur Größenordnungen darstellen können.**

#### Zur Untersuchung

Bei flüchtigen Stoffen ist zu berücksichtigen, dass das entnommene Probenmaterial möglichst repräsentativ für den zu bewertenden Bodenbereich sein muss; im Zusammenhang mit dem Expositionspfad „Anreicherung in geschlossenen Räumen“ bedeutet dies, dass das Bodenmaterial aus dem möglichen Kontaminationsbereich, in der dem Übertritt von Bodenluft in Innenraumluft entsprechenden Tiefe (ggf. tiefer) entnommen werden sollte.

Bodenmaterial aus dem oberen Bodenmeter ist für eine Bewertung in der Regel ungeeignet.

**Es handelt sich daher um eine von der in Tabelle 1, Anhang 1 der BBodSchV aufgeführten notwendigerweise begründet abweichenden Probennahme.**

Bei der Entnahme und Vorbereitung von Bodenmaterial für die Analyse von flüchtigen Stoffen ist das Handbuch Altlasten des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Band 7, Analyseverfahren – Fachgremium Altlastenanalytik –, Teil 4 Bestimmung von BTEX/LHKW in Feststoffen aus dem Altlastenbereich [42], zu beachten (insbesondere die Übersichtung von Probenmaterial mit entsprechendem Lösungsmittel vor Ort).

### **3.2.2 Bewertung von flüchtigen Schadstoffen in der Bodenluft**

In der Regel sollen der Bewertung flüchtiger Schadstoffe für den Wirkungspfad Boden – Bodenluft – Mensch Untersuchungen der Bodenluft zugrunde gelegt werden. Die im Rahmen der orientierenden Untersuchung ermittelte Schadstoffbelastung der Bodenluft ist ggf. Ausgangspunkt für eine Untersuchung der Innenraumluft gemäß § 3 Abs. 6 BBodSchV. Dabei können für die Bewertung, ob eine im Umfeld von Gebäuden vorhandene Bodenluftbelastung eine relevante Innenraumluftbelastung verursacht, hilfsweise (d. h. wenn keine Einzelfall-spezifisch ermittelten Werte vorliegen) die in Anhang A, Tabelle A1 genannten Orientierenden Hinweise für flüchtige Schadstoffe in der Bodenluft herangezogen werden.

Es **muss** jedoch beachtet werden, dass auch bei Unterschreitung der Bodenluft-Beurteilungswerte eine Gefährdung nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Dies ist begründet durch Unsicherheiten, die mit der Verallgemeinerung des Expositionsszenarios verbunden sind.

#### **Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe – Bewertungshinweise für Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft bezüglich einer Anreicherung in der Innenraumluft (Szenario „Wohngebiete“)**

(zitiert aus\_LABO: „Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug; Stand: 1. September 2008“ [40])

Bei den stoffbezogenen Berechnungen zu Tabelle „Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe (stoffbezogene Berechnungen) bei Untersuchungen des **Bodenfeststoffes**“ (s. Anhang A, Tabelle A4) wird von einem Gleichgewicht zwischen den Schadstoffen am Feststoff und in der Bodenluft ausgegangen. Daher kann für die Stoffe aus [dieser] Tabelle [...] auch die im Gleichgewicht stehende Bodenluftkonzentration des jeweiligen Schadstoffes angegeben werden.

In Tabelle „Orientierende Hinweise (stoffbezogene Berechnungen) für flüchtige Stoffe in der **Bodenluft**“ (s. Anhang A, Tabelle A1) sind unter Verwendung der gleichen toxikologischen Daten und des



gleichen Expositionsszenarios (Transferfaktor von 1:1.000 zwischen Bodenluft und Innenraumlufte) die entsprechenden Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft aufgeföhrt.

Weiter gelten alle zu Tabelle „Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe (stoffbezogene Berechnungen) bei Untersuchungen des **Bodenfeststoffes**“ (s. Anhang A, Tabelle A4) gehörigen Hinweise und Randbedingungen, soweit sie sich nicht auf die Probennahme oder Analytik von Bodenmaterial (Benzol) beziehen.

Auf die Notwendigkeit der Einzelfallprüfung wird nochmals verwiesen.

**Bei der Bewertung eines möglichen Übergangs von Schadstoffen der Bodenluft in die Raumluft ist zu beachten, dass die gemessenen Werte und die verwendeten Faktoren nur Größenordnungen darstellen können.**

Die Verwendung der Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft nach Tabelle „Orientierende Hinweise (stoffbezogene Berechnungen) für flüchtige Stoffe in der **Bodenluft**“ (s. Anhang A, Tabelle A1) für eine Bewertung setzt die Entnahme möglichst repräsentativer Bodenluft an einem Standort voraus. Die Schadstoffgehalte in der Bodenluft werden von verschiedenen Randbedingungen wie jahreszeitlichen (Temperatur-) und meteorologischen Schwankungen, der Bodenfeuchte sowie der Bodenart- und Feuchteverteilung im Boden beeinflusst. Auch die Entnahmeverfahren beeinflussen in hohem Maße die Messergebnisse. Es ist daher zu beachten, dass entnommene Bodenluft in der Regel nur für einen begrenzten zeitlichen und räumlichen Bereich repräsentativ sein kann und bei der Bewertung zeitliche, räumliche und durch das Entnahmeverfahren bedingte Schwankungen der Schadstoffkonzentration in der Bodenluft zu berücksichtigen sind. Einzelwerte sind für eine Bewertung in der Regel ungeeignet.

Bezüglich der Entnahmetiefe und Entnahmeart von Bodenluft ist zu berücksichtigen, dass die entnommene Bodenluft möglichst repräsentativ für den zu bewertenden Bodenbereich sein muss; im Zusammenhang mit dem Expositionspfad „Anreicherung in geschlossenen Räumen“ bedeutet dies, dass die Entnahme aus dem möglichen Kontaminationsbereich in der dem Übertritt von Bodenluft in Innenraumlufte entsprechenden Tiefe (ggf. tiefer) erfolgen sollte. Soweit Bodenluft aus dem oberen Bodenneter entnommen wird oder auch bei tieferen Entnahmen durch Kurzschlüsse über nicht oder mangelhaft abgedichtete Bohrlöcher außenluftbeeinflusste Bodenluft analysiert wird, treten Minder- bis Fehlbefunde auf.

Die Orientierungswerte sind daher insbesondere zur Bewertung festgestellter Belastungen und Auslösung der in § 3 Abs. 6 BBodSchV aufgeführten Maßnahmen (Innenraumluftemessungen) geeignet. Das Risiko falsch negativer Befunde ist im Einzelfall abzuschätzen, und entlastende Aussagen sind entsprechend (gut) zu begründen. In der Regel sind dazu auch Untersuchungen anderer Medien notwendig.

Bei der tabellarischen Darstellung von Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft (Tabelle „Orientierende Hinweise (stoffbezogene Berechnungen) für flüchtige Stoffe in der **Bodenluft**“ (s. Anhang A, Tabelle A1)) wurde eine Obergrenze von 1.000 mg/m<sup>3</sup> als Kappungsgrenze festgelegt, die als Hinweis auf massive Verunreinigungen gewertet wurde. Bei einer solchen Größenordnung von Schadstoffen in der Bodenluft ist ggf. das Vorhandensein von Begleitsubstanzen (z. B. Verunreinigung mit diversen Lösungsmitteln) oder die Verteilung der Schadstoffe (ggf. Phasen) zu prüfen.

Die Höhe der Kappungsgrenze orientiert sich auch an umweltmedizinischen Zielen (mit einem gefahrenverknüpfenden Faktor)<sup>1</sup>.

### 3.2.3 Vorgehensweise bei Vorliegen mehrerer Stoffe in der Bodenluft

Die Werte in Anhang A, Tabelle A1 beziehen sich auf Einzelstoffe und berücksichtigen mögliche Kombinationswirkungen nicht. Wird der bewertungsrelevante Wert für einen Schadstoff fast erreicht, sollte immer geprüft werden, ob weitere Stoffe mit gleichartigen Wirkungsendpunkten und/oder Wirkungsmechanismen in relevanten Konzentrationen vorliegen. Ein solcher Fall kann z. B. gegeben sein, wenn verschiedene Alkylaromaten (Toluol, Xylol, Ethylbenzol, Styrol) in relativ hohen Konzentrationen im Deponiegas oder in der Bodenluft vorkommen.

In diesen Fällen sollte die Additionsregel gelten, d. h. unter Annahme voneinander unabhängiger (additiver) Wirkungen sollte zusätzlich die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$C_1 / PW_1 + C_2 / PW_2 + C_3 / PW_3 + \dots + C_n / PW_n \leq 1$$

$C_n$  = Konzentration des Stoffes n in der Luft

$PW_n$  = einzelstoffbezogener „orientierender Hinweis-Wert“ des Stoffes n

Krebserzeugende und nicht krebserzeugende Stoffe sind getrennt zu betrachten.

---

<sup>1</sup> Eine ad-hoc-Arbeitsgruppe aus Mitgliedern der Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) des Umweltbundesamtes und des Ausschusses für Umwelthygiene der Arbeitsgemeinschaft der Leitenden Medizinalbeamtinnen und -beamten der Länder (AGLMB) hat als langfristiges Ziel vorgeschlagen, stoffunabhängig einen Konzentrationsbereich von 200-300 µg/m<sup>3</sup> für die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) in der Innenraumluft zu erreichen. Unter Verwendung eines Transferfaktors von 1:1.000 und einem ‚gefahrenverknüpfenden‘ Faktor von 5 entspricht dies einer Bodenluftkonzentration von 1.000 – 1.500 mg/m<sup>3</sup>. Die Untergrenze dieses Bereichs von 1.000 mg/m<sup>3</sup> wurde als Kappungsgrenze gewählt.

### 3.3 Bewertung von flüchtigen Schadstoffen (Spurenstoffen) im Deponiegas

Die Beurteilung der flüchtigen Schadstoffe im Deponiegas erfolgt analog der Beurteilung flüchtiger Schadstoffe in der Bodenluft.

Um aus der Vielzahl von Spurenstoffen die wichtigsten Vertreter herauszufiltern, werden die maximalen, in Untersuchungen vorgefundenen Konzentrationen gemäß Tabelle A2 des Anhangs A mit den Bodenluft-Beurteilungswerten gemäß Tabelle A1, Anhang A verglichen.

Dieser Vergleich in Tabelle A3 des Anhangs A zeigt, dass insbesondere die krebserzeugenden bzw. krebserregenden Stoffe Benzol, Trichlor- und Tetrachlorethen, Trichlormethan (Chloroform) und Vinylchlorid kritisch zu sehen sind. Unter ungünstigen Umständen (kein mikrobieller Abbau, durchlässiger Boden, geringe Verdünnung etc.) können bei diesen Stoffen bedenkliche Immissionskonzentrationen in Innenräumen resultieren.

Bei den nicht kanzerogenen Stoffen können vor allem Überschreitungen bei Alkylaromaten, insbesondere Toluol auftreten. Auf die Problematik von Kombinationswirkungen wurde im Abschnitt 3.2.4 hingewiesen.

Im Fall von Methan ist zu beachten, dass in Innenräumen auf keinen Fall und zu keinem Zeitpunkt die untere Explosionsgrenze von 5 Vol% Methan erreicht werden darf. Bei erhöhten Methan- oder Spurengaskonzentrationen in der Nähe der unteren Explosionsgrenze sind Sofortmaßnahmen zu ergreifen. Darüber hinaus sollte bei positivem Methan-Befund die Anwesenheit von Spurenstoffen ebenfalls geprüft werden.

Für den Ausbreitungspfad Bodenluft – Außenluft sind zwar rechnerisch (mit einem Verdünnungsfaktor von 10.000 oder mehr) ebenfalls Überschreitungen der „orientierenden Hinweis-Werte“ denkbar. Da jedoch bei höheren Windgeschwindigkeiten (als für einen ungünstigen Fall angenommen) die Zusatzbelastung durch Schadstoffe aus der Bodenluft infolge der Verdünnung an den meisten Tagen gegen Null geht, ist die Exposition von Menschen meist erheblich geringer als in Gebäuden. Dieser Pfad ist daher nur in Ausnahmefällen relevant (z. B. bei sehr starker Deponiegasentwicklung).

## 4 Zusammenfassung

Die Gefährdungsabschätzung bei Altlastverdachtsflächen muss beim Vorhandensein flüchtiger Schadstoffe auch den Wirkungspfad Boden – Bodenluft – Mensch umfassen. Altablagerungen mit Siedlungsabfällen können infolge von Zersetzungsprozessen Deponiegas emittieren, das neben seinen Hauptkomponenten Methan und Kohlendioxid auch gesundheitsschädliche Spurengase enthalten kann. Bodenverunreinigungen mit flüchtigen Stoffen (z. B. LHKW, BTEX) können ebenso wie schadstoffbelastetes Grundwasser zu einer Bodenluftverunreinigung führen. Diese kann sich in durchlässigen Böden über vergleichsweise große Reichweiten ausbreiten. Beim Eindringen in Gebäude (z. B. durch Fugen oder Risse) kann daraus eine Gefahr für die Gesundheit von Bewohnern oder Anwohnern solcher Flächen resultieren.

Das vorliegende Merkblatt gibt Hinweise zur Untersuchung sowie zur nutzungs-, wirkungspfad- und stoffbezogenen Bewertung solcher Bodenluftverunreinigungen. Dabei steht die menschliche Gesundheit als Schutzgut im Vordergrund.

Aus Fallstudien lässt sich ableiten, dass Schadstoffe nach Ausgasung aus der Bodenluft nur in Ausnahmefällen zu einer messbaren Belastung der Außenluft beitragen.

Beim Eindringen in Innenräume können dagegen gesundheitlich bedenkliche Konzentrationen auftreten. Hier trägt insbesondere der Stofftransport infolge von Wärmeströmungen der Luft (Advektion) zu einer erhöhten Schadstoffbelastung bei.

Im vorliegenden Merkblatt werden für zahlreiche altlastenrelevante flüchtige Stoffe Bewertungshilfen zur Verfügung gestellt. Bei der Bewertung eines möglichen Übergangs von Schadstoffen der Bodenluft in die Raumluft ist jedoch zu beachten, dass die gemessenen Werte und verwendeten Faktoren nur Größenordnungen darstellen können!

Ergeben die bei der orientierenden Untersuchung durchgeführten Bodenluftmessungen Überschreitungen der in Tabelle A1 des Anhangs A genannten Orientierenden Hinweise für die Bewertung von Bodenluft, soll zur Gefährdungsabschätzung beim Pfad Boden – Mensch unter Beachtung der derzeitigen und planungsrechtlich zulässigen Nutzung eine Detailuntersuchung durchgeführt werden. Dabei ist auch das Migrationsverhalten der Schadstoffe zu berücksichtigen. Wesentliches Element einer Detailuntersuchung bei bestehender Bebauung kann eine Untersuchung der Innenraumluft sein. Bei erhöhten Methan- oder Spurengaskonzentrationen in der Nähe der unteren Explosionsgrenze sind Sofortmaßnahmen zu ergreifen.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17. März 1998; BGBl I S. 502
- [2] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999; BGBl I S. 1554
- [3] Bayerisches Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (Bayerisches Bodenschutzgesetz – BayBodSchG) vom 23. Februar 1999; GVBl Nr. 5/1999, S. 36 ff.
- [4] Verwaltungsvorschrift zum Vollzug des Bodenschutz- und Altlastenrechts in Bayern – BayBodSchVwV – vom 11. Juli 2000; AllMBI 2000 S. 473; ber. S. 534
- [5] Verordnung über Sachverständige und Untersuchungsstellen für den Bodenschutz und die Altlastenbehandlung in Bayern (VSU Boden und Altlasten) vom 3. Dezember 2001, GVBl 2001, S. 938, zuletzt geändert am 4. August 2003, GVBl 2003, S. 645
- [6] Umweltmeteorologie – Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen – Deponien. VDI-Richtlinie 3790, Blatt 2; Dezember 2000
- [7] Rettenberger G.; Urban-Kiss S. et al.: Durchführung von Messungen zur Bestimmung von Schadstoffen im Deponiegas sowie im Abgas von deponiegasbetriebenen Fackeln und Verwertungsanlagen; Ingenieurgruppe RUK im Auftrag des LfU; November 1994
- [8] Laugwitz R.; Poller T.; Stegmann R.: Entstehen und Verhalten von Spurenstoffen im Deponiegas sowie umweltrelevante Auswirkungen von Deponiegasemissionen. In: Deponiegasnutzung: Emissionsminimierung, neuere Planungen und Technologien. Dokumentation einer Fachtagung in Lübeck-Travemünde. Hamburger Berichte: Abfallwirtschaft 1 (1988) 153-163; Bonn: Economica-Verlag
- [9] Rippen G.:  
a) Handbuch Umweltchemikalien. Stoffdaten – Prüfverfahren – Vorschriften. 3. Auflage, Landsberg: ecomed. Loseblattsammlung, 1990. 56. Erg.-Lfg. 09/2001  
b) Umweltchemikalien. Landsberg: ecomed. CD-ROM. 5. Aktualisierung, 10/2001
- [10] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesärztekammer: Gesundheitsgefährdung der Bevölkerung durch Mülldeponien (Siedlungsabfall). Dt. Ärzteblatt 92 (1995) C-2313-C2320
- [11] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz und Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: Probennahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für die Wirkungspfade Boden – Mensch und Boden – Gewässer; Merkblatt Nr. 3.8/4; 2003
- [12] Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) – Altlastenausschuss (ALA), Unterausschuss „Arbeitshilfe für Qualitätsfragen bei der Altlastenbearbeitung“: Arbeitshilfe für die Qualitätssicherung bei der Altlastenbearbeitung; Kapitel 2: Gewinnung von Boden-, Bodenluft- und Grundwasserproben, (2002)
- [13] Bartetzko G.; Rippen G.; Wiesert P.: Erarbeitung von Programmen zur Überwachung von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten; ARCADIS Trischler & Partner Consult GmbH, Erfurt; im Auftrag des Umweltbundesamtes.; UBA – Texte 96/99 (1999), Band 1 und 2
- [14] Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Merkblatt „Untersuchung und Bewertung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen – Wirkungspfad Boden – Mensch (direkter Kontakt)“ – LfU-Merkblatt Altlasten 1, Augsburg, 2002
- [15] Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites. Guide ASTM – E1739-95e1, 51 S.; West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials (ASTM)

- [16] Waitz M.F.W.; Freijer J.I.; Kreule P.; Swartjes F.A.: The VOLASOIL Risk Assessment Model Based on CSOIL for Soils Contaminated with Volatile Compounds. RIVM Rapport No. 715810014 (1996) 189 S.; National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), NL-Bilthoven
- [17] Johnson P.C.; Kemblowski M.W.; Johnson R.L.: Assessing the Significance of Subsurface Contaminant Vapor Migration into Enclosed Spaces. Site-Specific Alternative to Generic Estimates. American Petroleum Institute Health and Environmental Sciences Department Report No. 4674., December 1998, 55 S.; API Publ. Services, Washington, D.C., Order No. I46740
- [18] Environmental Quality Management, Inc.: User's Guide for the Johnson and Ettinger (1991) Model for Subsurface Vapor Intrusion into Buildings (Revised). Prepared for the U.S. Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, Washington D.C., USA; December 2000, 98 S.
- [19] Seeger K.-J.: Fachliche Grundlagen zur Beurteilung von flüchtigen organischen Substanzen in der Bodenluft bei Altlasten. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft 263 (1999) 138 S.; Wiesbaden: Hessische Landesanstalt für Umwelt (HLfU)
- [20] Rettenberger G.: Entstehung, Folgen, Erfassung und Verwertung von Deponiegas. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft 9 (1978) 1-36; Berlin: Erich Schmidt Verlag
- [21] Bruckmann P.; Mülder W.: Der Gehalt an organischen Spurenstoffen in Deponiegasen. Müll und Abfall 14 (1982) 339-346
- [22] Minkin L.: Thermoeffusion in Concrete Slab as a Driving Force of Indoor Radon Entry. Health Physics 80 (2001) 151-156
- [23] Williams D.R.; Paslawski J.C.; Richardson G.M.: Development of a Screening Relationship to Describe Migration of Contaminant Vapors into Buildings. J. Soil Contam. 5 (1996) 141-156
- [24] Grimsrud D.T.; Sonderegger M.H.; Sherman R.C.: A Framework of a Construction Quality Survey for Air Leakage in Residential Buildings. Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings (1983) 422-452; New York: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (ASH-RAE)
- [25] Little J.C.; Daisey J.M.; Nazaroff W.W.: Transport of Subsurface Contaminants into Buildings – An Exposure Pathway for Volatile Organics. Environ. Sci. Technol. 26 (1992) 2058-2066
- [26] Fischer M.L.; Bentley A.J.; Dunkin K.A.; Hodgson A.T.; Nazaroff W.W.; Sextro R.G.; Daisey J.M.: Factors Affecting Indoor Air Concentrations of Volatile Compounds at a Site of Subsurface Gasoline Contamination. Environ. Sci. Technol. 30 (1996) 2948-2957
- [27] Symms K.G.; Lawrence K.G.; Wardrop D.H.; Vitale R.J.: Modeling VOC Migration and Vapor Intrusion into Building Air from Subsurface Soil Sources. In: W.J. van den Brink, R. Bosman, F. Arendt (Hrsg.): "Contaminated Soil '95", NL-Dordrecht: Kluwer (1995) 551-556.
- [28] Albering H.J.; Hoogewerff J.A.; Kleinjans J.C.S.: Survey of <sup>222</sup>Rn Concentrations in Dwellings and Soils in the Dutch Belgian Border Region. Health Phys. 70 (1996) 64-69
- [29] Fugler D.; Adomait M.: Indoor Infiltration of Volatile Organic Contaminants: Measured Soil Gas Entry Rates and other Research Results for Canadian Houses. J. Soil Contam. 6 (1997) 9-13
- [30] Hempfling R.; Doetsch P.; Stubenrauch S.; Mahr A; Bauer D.; Koschmieder H.J.; Grünhoff D.: Wissenschaftliche Begleitung und Fortentwicklung eines Gefährdungsabschätzungsmodells für Altlasten – UMS-System zur Altlastenbeurteilung. Instrumente für die pfadübergreifende Abschätzung und Beurteilung von altlastenverdächtigen Flächen. F+E-Vorhaben Umweltbundesamt – UBA-FB 98-016 (1997) Band 1-6.
- [31] Garbesi K.; Sextro R.G.: Modeling and field evidence of pressure-driven entry of soil gas into a house through permeable below-grade walls. Environ. Sci. Technol. 23 (1989) 1481-1487

- [32] Garbesi K.; Sextro R.G.; Fisk W.J.; Modera M.P.; Revzan K.L.: Soil-gas entry into an experimental basement: Model measurement comparisons and seasonal effects. *Environ. Sci. Technol.* 27 (1993) 466-473
- [33] Albering H.J.; Hoogewerff J.A.; Kleinjans J.C.S.: Survey of <sup>222</sup>Rn Concentrations in Dwellings and Soils in the Dutch Belgian Border Region. *Health Phys.* 70 (1996) 64-69
- [34] Nazaroff W.W.: Radon Transport from Soil to Air. *Rev. Geophys.* 30 (1992) 137-160
- [35] Fischer M.; Wegner J.: Workshop "Produktbewertung". *VDI-Ber.* 1122 (1994) 549-557
- [36] Hodgson A.T.; Garbesi K.; Sextro R.G.; Daisey J.M.: Soil Gas Contamination and Entry of Volatile Organic Compounds into a House Near a Landfill. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 42 (1992) 277-283
- [37] Umweltbundesamt, Berlin (Hrsg.): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. *Lo-seblattsammlung, Grundwerk 12/99*. Berlin: Erich-Schmidt-Verlag; 4. Erg.-Lfg. 04/2007
- [38] Zweite Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen – 2. BImSchV) vom 10. Dezember 1990. *BGBl I*, S. 2694; zuletzt geändert am 05. Juni 1991, *BGBl I* S. 1218
- [39] Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen. Vorgehensweise und Technik zu seiner Erkundung und Bewertung (Leitfaden Deponiegas; Handbuch Altlasten). *Materialien zur Altlastenbearbeitung 10* (1992) 150 S.; Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
- [40] Ständiger Ausschuss Altlasten der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO): Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug; Stand: 01. September 2008
- [41] Bekanntmachung über Methoden und Maßstäbe für die Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte nach der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 18. Juni 1999. *Bundesanzeiger* 51, Nr. 161a, vom 28. August 1999, 1-43
- [42] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg): Handbuch Altlasten, Band 7, Teil 4: Analyseverfahren – Fachgremium Altlastenanalytik –, Bestimmung von BTEX/LHKW in Feststoffen aus dem Altlastenbereich, 2000
- [43] Daten aus: <http://hazmap.nlm.nih.gov> und nach Brauer L., *Gefahrstoffsensork*, Ecomed-Verlag, 1988
- [44] Müller, F.; Both, R.: Ermittlung von Geruchsschwellen für flüchtige Stoffe bei Altlasten, LANUV NRW, Juni 2008



## Anhang A: Wertetabellen

Tabelle A1:

Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe in der Bodenluft nach LABO: Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug; Stand: 01. September 2008 [40]

(bei Anwendung Erläuterungen in Kap. 3.2.1 und 3.2.2 beachten)

Stoffe	[mg/m <sup>3</sup> ]	Bemerkung
Acetophenon	<b>1.000</b>	Kappungsgrenze*; toxikologische Ableitung: 20.000 mg/m <sup>3</sup> ggf. sind geruchliche Belästigungen möglich: <i>Geruchsschwelle</i> : 0,041 mg/m <sup>3</sup> -> entspr. <b>10-100 mg/m<sup>3</sup></b> in der Bodenluft
Benzol	<b>10</b>	
Chlorbenzol	<b>1.000</b>	Kappungsgrenze*; toxikologische Ableitung: 1500 mg/m <sup>3</sup> ggf. sind geruchliche Belästigungen möglich: <i>Geruchsschwelle</i> : 0,025 mg/m <sup>3</sup> -> entspr. <b>10-100 mg/m<sup>3</sup></b> in der Bodenluft
Chloroform	<b>2</b>	
o-Dichlorbenzol	<b>1.000</b>	Kappungsgrenze*; toxikologische Ableitung: 10.000 mg/m <sup>3</sup> ggf. sind geruchliche Belästigungen möglich: <i>Geruchsschwelle</i> : 0,067 mg/m <sup>3</sup> -> entspr. <b>20-200 mg/m<sup>3</sup></b> in der Bodenluft
m-Dichlorbenzol	<b>1.000</b>	Kappungsgrenze*; entspr. o-Dichlorbenzol
p-Dichlorbenzol	<b>1.000</b>	Kappungsgrenze*; toxikologische Ableitung: 6.500 mg/m <sup>3</sup> ggf. sind geruchliche Belästigungen möglich: <i>Geruchsschwelle</i> : 0,025 mg/m <sup>3</sup> -> entspr. <b>10-100 mg/m<sup>3</sup></b> in der Bodenluft
'cis' 1,2-Dichlorethen	<b>900</b>	
Dichlormethan	<b>80</b>	
1,2-Dichlorpropan	<b>150</b>	
Ethylbenzol	<b>200</b>	
Naphthalin	<b>10</b>	
Nitrobenzol	<b>1</b>	
3-Nitrotoluol	<b>1.000</b>	Kappungsgrenze*; toxikologische Ableitung: 1.500 mg/m <sup>3</sup> ggf. sind geruchliche Belästigungen möglich: <i>Geruchsschwelle</i> : 0,062 mg/m <sup>3</sup> -> entspr. <b>20-200 mg/m<sup>3</sup></b> in der Bodenluft
4-Nitrotoluol	<b>250</b>	ggf. sind geruchliche Belästigungen möglich: <i>Geruchsschwelle</i> : 0,084 mg/m <sup>3</sup> -> entspr. <b>25-250 mg/m<sup>3</sup></b> in der Bodenluft
Phenol	<b>200</b>	ggf. sind geruchliche Belästigungen möglich: <i>Geruchsschwelle</i> : 0,271 mg/m <sup>3</sup> -> entspr. <b>80-800 mg/m<sup>3</sup></b> in der Bodenluft
Stoffe	[mg/m <sup>3</sup> ]	Bemerkung



Styrol	<b>100</b>	ggf. sind geruchliche Belästigungen möglich: <i>Geruchsschwelle:</i> 0,09 mg/m <sup>3</sup> -> entspr. <b>30-300 mg/m<sup>3</sup></b> in der Bodenluft
1,1,2,2-Tetrachlorethan	<b>1</b>	
Tetrachlorethen (PER)	<b>70</b>	
Tetrachlormethan	<b>3</b>	
Toluol	<b>1.000</b>	Kappungsgrenze*; toxikologische Ableitung: 2.500 mg/m <sup>3</sup>
1,2,4-Trichlorbenzol	<b>70</b>	
1,1,1-Trichlorethan	<b>1.000</b>	Kappungsgrenze*; toxikologische Ableitung: 22.000 mg/m <sup>3</sup>
Trichlorethen (TRI)	<b>20</b>	
1,3,5-Trimethylbenzol(e)	<b>1.000</b>	Kappungsgrenze*; toxikologische Ableitung: 2.200 mg/m <sup>3</sup> ggf. sind bei höheren Konzentrationen geruchliche Belästigungen möglich: <i>Geruchsschwelle:</i> 1,577 mg/m <sup>3</sup> -> entspr. <b>4.500-45.000 mg/m<sup>3</sup></b> in der Bodenluft
Vinylchlorid (VC)	<b>4</b>	
Xylole	<b>1.000</b>	Kappungsgrenze*; toxikologische Ableitung: 4.000 mg/m <sup>3</sup> ggf. sind geruchliche Belästigungen möglich: <i>Geruchsschwelle:</i> 0,055 mg/m <sup>3</sup> -> entspr. <b>15-150 mg/m<sup>3</sup></b> in der Bodenluft

### Hinweise:

\* Bei der tabellarischen Darstellung von Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft wurde eine Obergrenze von 1000 mg/m<sup>3</sup> als **Kappungsgrenze** festgelegt, die als Hinweis auf massive Verunreinigungen gewertet wurde. Bei einer solchen Größenordnung von Schadstoffen in der Bodenluft ist ggf. das Vorhandensein von Begleitsubstanzen (z. B. Verunreinigung mit diversen Lösungsmitteln) oder die Verteilung der Schadstoffe (ggf. Phasen) zu prüfen.

Die Höhe der Kappungsgrenze orientiert sich auch an umweltmedizinischen Zielen: Eine ad-hoc-Arbeitsgruppe aus Mitgliedern der Innenraumlufthygiene-Kommission (IRK) des Umweltbundesamtes und des Ausschusses für Umwelthygiene der Arbeitsgemeinschaft der Leitenden Medizinalbeamtinnen und -beamten der Länder (AGLMB) hat als langfristiges Ziel vorgeschlagen, stoffunabhängig einen Konzentrationsbereich von 200-300 µg/m<sup>3</sup> für die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC) in der Innenraumluft zu erreichen. Unter Verwendung eines Transferfaktors von 1:1000 und einem „gefahrenverknüpfenden“ Faktor von 5 entspricht dies einer Bodenluftkonzentration von 1.000 – 1.500 mg/m<sup>3</sup>. Die Untergrenze dieses Bereichs von 1.000 mg/m<sup>3</sup> wurde als Kappungsgrenze gewählt.

In der Bemerkungsspalte wird auf die Geruchsschwellen einzelner Stoffe verwiesen. Soweit die abgeleiteten Konzentrationen 30 % des geometrischen Mittels der in der Literatur [43] genannten Geruchsschwellen \*1.000 (Transferfaktor) überschritten, wurde der Stoff als geruchsproblematisch eingeschätzt. Bei diesen Stoffen wurden die Geruchsschwellen nach DIN 13725 ermittelt [44]. Die Ergebnisse dieser Geruchsschwellenbestimmung (Mittelwerte) und entsprechende Bodenluftkonzentrationen sind in der Bemerkungsspalte aufgeführt. Im angegebenen Bereich kann es (bei klimatisch bedingt variablen Transferfaktoren von 1:300-1:3.000) zu – ggf. kurzfristigen – geruchlichen Belästigungen im Innenraum kommen. Bei Überschreitung der oberen Schwelle des Konzentrationsbereichs sind (je nach Bausubstanz und sonstigen Randbedingungen des Einzelfalls) auch häufige geruchliche Belästigungen im Winterhalbjahr möglich. Die Bewertung solcher potenziellen Belästigungen bezüglich ihrer Erheblichkeit ist mit den zuständigen Gesundheitsbehörden abzustimmen.

**Hinweis:** Es wurden für 10 Substanzen Geruchsschwellen nach DIN 13725 ermittelt. Bei den Stoffen, die nach der durchgeführten Literaturlauswertung nicht als geruchsproblematisch eingeschätzt wurden, ist in der Tabelle keine Bemerkung oder Literaturangabe bezüglich des Geruchs aufgeführt, da Literaturangaben teils erhebliche Schwankungen (über Größenordnungen) aufweisen. Es ist zu beachten, dass auch bei diesen nicht als geruchsproblematisch eingestufenen Stoffen geruchliche Belastungen möglich sind. Dies ist insbesondere dann wahrscheinlich, wenn eine Geruchsschwellenbestimmung nach DIN 13725 zu deutlich niedrigeren Werten als die (bisherigen) Angaben der Literaturlauswertung führen würde.

Tabelle A2:  
Beispiele für Konzentrationen von Spurenstoffen im Deponiegas

Stoff	Messwerte bayerischer Deponien [mg/m <sup>3</sup> ]	Literaturwerte [8-10] [mg/m <sup>3</sup> ]
<b>Alkane</b>		
n-Butan	k. A.	0,3-23
n-Hexan	max. 1,7	3-18
n-Oktan	k. A.	0,05-75
n-Dekan	k. A.	45-51
<b>Aldehyde</b>		
Formaldehyd	max. 6,1	0,005
Acetaldehyd	max. 0,02	0,008
<b>Leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe (LCKW)</b>		
Chlormethan	k. A.	k.A.
Dichlormethan	0,07-1,5	0,5-230, max. 2.400
Trichlormethan	0,17	0,02-1.100
Tetrachlormethan	0,03	0,06-63
1,1-Dichlorethan	0,1-1,5	0,002-21
1,2-Dichlorethan	max. 0,17	0,02-78
1,1,1-Trichlorethan	max. 0,3	0,2-590
1,1,2-Trichlorethan	k. A.	0,3-9
1,1,2,2-Tetrachlorethan	k. A.	0,4-110
Vinylchlorid	0,6-9,8	0,03-264
1,1-Dichlorethen	max. 0,1	0,4-280
<i>cis/trans</i> -1,2-Dichlorethen	0,1-8,1	0,1-700
Trichlorethen	0,2-1,0	0,4-250
Tetrachlorethen	0,4-2,2	0,1-340
<b>Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)</b>		
Trichlorfluormethan (R 11)	0,1-2	1-84
Dichlordifluormethan (R 12)	3,9-14	4-120
1,1,2-Trichlortrifluorethan (R 113)	max. 1	max. 6

<b>Stoff</b>	<b>Messwerte bayerischer Deponien [mg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Literaturwerte [8-10] [mg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Aromaten</b>		
Benzol	0,7-1,8	0,03-30
Toluol	12-47	0,2-620
Ethylbenzol	14-39	0,5-240
o-Xylol	10-175	0,1-7
p- + m-Xylol	27-52	0,2-380
1,3,5-Trimethylbenzol	k. A.	10-25
<b>Andere aromatische Verbindungen</b>		
Styrol	0,2-2,9	10-25
Chlorbenzol	0,02-0,8	0,1-8
o-Dichlorbenzol	k. A.	0,7
Naphthalin	k. A.	0,1
<b>Anorganische Gase</b>		
Schwefelwasserstoff	40-240	max. 630

k. A.: keine Angaben verfügbar

Tabelle A3:  
Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe und Spurenstoffkonzentrationen im Deponiegas  
(Stoffe mit erheblicher Überschreitung der Bodenluft-Beurteilungswerte lt. Tab. A1 sind 'fett' markiert)

<b>Stoff</b>	<b>Maximale gemessene Konzentration im Deponiegas [mg/m<sup>3</sup>] lt. Tab. A2</b>	<b>Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe in der Bodenluft [mg/m<sup>3</sup>] lt. Tab. A1</b>
<b>Benzol</b>	<b>30</b>	10
<b>Ethylbenzol</b>	<b>240</b>	200
Styrol	25	400
Toluol	620	1.000
Xylole	380	1.000
1,3,5-Trimethylbenzol	25	1.000
Chlorbenzol	8	1.000
o-Dichlorbenzol	0,7	1.000
<b>Dichlormethan</b>	<b>230</b>	80
<b>Trichlormethan</b>	<b>1.100</b>	2
<b>Tetrachlorethen</b>	<b>340</b>	70
<b>Trichlorethen</b>	<b>250</b>	20
<b>Vinylchlorid</b>	<b>264</b>	4
1,1,1-Trichlorethan	590	1.000

Tabelle A4:  
Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe (stoffbezogene Berechnungen) bei Untersuchungen des Bodenfeststoffes nach LABO: Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug; Stand: 01. September 2008 [40]

Stoffe	Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe im Feststoff in [mg/kg TM]	
	Wohngebiete	Industrie- u. Gewerbegrundstücke
Benzol	0,1 (=Bestimmungsgrenze)	0,4
Ethylbenzol	3	30
Chlorbenzol	15	170
Chloroform	0,1	0,5
Dichlorbenzol; o-	450 <sup>G</sup>	unpraktikabel hoch
Dichlorbenzol; m-	200 <sup>G</sup> (entspr. p-Dichlorbenzol)	unpraktikabel hoch
Dichlorbenzol; p-	200 <sup>G</sup>	unpraktikabel hoch
Dichlormethan	0,1	2
Dichlorpropan; 1,2	1	5
Nitrobenzol	1	15
Phenol	4.500 <sup>G</sup> (ggf. oral*)	unpraktikabel hoch
Tetrachlorethan; 1,1,2,2-	0,03	0,3
Tetrachlorethen (PER)	1,5	25
Toluol	10	120
Trichlorbenzol; 1,2,4-	25	300
Trichlorethan; 1,1,1-	15	180
Trichlorethen	0,3	5
Trimethylbenzol; 1,3,5- u. andere TMB-Isomere	200	2.000
Xylole	10	100

<sup>G</sup> Anmerkung: Bei den mit G bezeichneten Stoffen sind – auch bei Unterschreitung der Orientierenden Hinweise – in Gebäuden Geruchswahrnehmungen möglich.

\* Für die langfristige orale Aufnahme von Phenol liegt kein TRD-Wert vor. Mit Bezug auf Daten zur kurzfristigen oralen Exposition und im Vergleich zu der Ableitung von Prüfwerten für den Direktpfad von PCP sollte jedoch bei Überschreitung von 1.000 mg/kg Phenol im Oberboden bei Wohngebieten auch die Gefährdung durch orale Bodenaufnahme geprüft werden (siehe PBA, H 767 [37])

## Anhang B: Physikalisch-chemische Daten ausgewählter Stoffe

Tabelle B1:  
Physikalisch-chemische Daten ausgewählter organischer Verbindungen sowie der Hauptkomponenten im Deponiegas

Stoff	Molmasse	Schmelzpunkt	Siedepunkt	Sättigungskonz. bei 20°C	Dampfdruck bei 20°C	Dichte bei 20°C	Wasserlöslichkeit bei 20°C	Verteilungskoeffizient* $K_{as}$
Einheit	[g/mol]	[°C]	[°C]	[g/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[g/ml]	[mg/l]	[g/cm <sup>3</sup> ]
n-Hexan (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	86,2	-95	68,9	566	16,4	0,66	13	
Benzol (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	78,1	5,5	80,0	320	10,1	0,88	1760	
Ethylbenzol (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	106,2	-95	136,2	41	0,94	0,87	170	
Styrol (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> )	104,2	-31	145,1	31	0,63	0,91	300	
Toluol (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	92,1	-95	110,6	102,7	2,7	0,87	515	0,2627
o-Xylol (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	106,2	-25,2	144,4	29	0,67	0,88	175	0,3111
m-Xylol (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	106,2	-47,8	139,1	35	0,80	0,86	160	0,1618
p-Xylol (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	106,2	13,3	138,1	36	0,87	0,86	180	0,3863
Dichlormethan (CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	84,9	-95	40,1	1570	47	1,33	17000	1,1948
Trichlormethan (CHCl <sub>3</sub> )	119,4	-63,3	61,4	1045	20	1,48	8300	0,1455
Tetrachlormethan (CCl <sub>4</sub> )	153,8	-23,0	76,7	754	11,8	1,59	800	
1,1-Dichlorethan (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> )	99,0	-97,3	57,3	985	24	1,18	5100	
1,2-Dichlorethan (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> )	99,0	-35,5	83,6	350	8,5	1,25	8500	
1,1,1-Trichlorethan (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> )	133,4	-31	73,9	730	13,3	1,34	890	1,4517
1,1,2-Trichlorethan (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> )	133,4	-37	113,6	159	2,6	1,44	4500	
1,1,1,2-Tetrachlorethan (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> )	167,9	-70,2	130	91,8	1,33	1,54	1100	

Stoff	Molmasse	Schmelzpunkt	Siedepunkt	Sättigungskonz. bei 20°C	Dampfdruck bei 20°C	Dichte bei 20°C	Wasserlöslichkeit bei 20°C	Verteilungskoeffizient* $K_{\text{HS}}$
Einheit	[g/mol]	[°C]	[°C]	[g/m <sup>3</sup> ]	[kPa]	[g/ml]	[mg/l]	[g/cm <sup>3</sup> ]
1,1,2,2-Tetrachlorethan (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> )	167,9	-41	146,3	45	0,67	1,60	3300	0,0220
Vinylchlorid (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl)	62,5	-153,8	-13,7		330	0,91	1600	
1,1-Dichlorethen (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	96,9	-122	31,7	2655	67	1,22	2500	
cis-1,2-Dichlorethen (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	96,9	-81	60	955	22	1,26	5100	
trans-1,2-Dichlorethen (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	96,9	-50	48	1405	34	1,28	6300	
Trichlorethen (C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> )	131,4	-73	87	420	7,8	1,46	1100	0,0768
Tetrachlorethen (C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> )	165,8	-22	121,1	129	1,87	1,62	140	0,0451
Formaldehyd (CH <sub>2</sub> O)	30	-92	-20		440		vollständig mischbar	
Acetaldehyd (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	44,1	-123	20,5	1810	100	0,78	vollständig mischbar	
Methan (CH <sub>4</sub> )	16	-182,5	-161,5					
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	44	-57	-78,5 (subl.)					
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	32	-218,8	-183					
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	28	-210	-195,8					

\* nach [37]



## Anhang C: Umrechnungen Volumenanteil – Massenprozent

$$a_s [\text{Vol. - \%}] = \frac{p_s \cdot 24}{M_s \cdot 10^4}$$

$$a_s [\text{Vol. - \%}] = \frac{V_s \cdot 100}{V} = \frac{m_s \cdot V_N \cdot 100}{V \cdot M_s \cdot 10^6}$$

$$a_s [\text{ppm}] = a_s [\text{Vol. - \%}] \cdot 10^4$$

$$p_s [\text{mg/m}^3] = \frac{a_s \cdot M_s \cdot 10^4}{24}$$

$$p_s [\text{mg/m}^3] = \frac{m_s}{V} = \frac{a_s \cdot M_s \cdot 10^6}{V_N \cdot 100} = \frac{a_s \cdot M_s \cdot 10^4}{V_N}$$

- $a_s$       Volumenanteil des gasförmigen Stoffes [Vol.-%]  
 $p_s$       Massenkonzentration des gasförmigen Stoffes [ $\text{mg/m}^3$ ]  
 $m_s$       Masse des gasförmigen Stoffes [mg]  
 $V_s$       Volumen des gasförmigen Stoffes [ $\text{m}^3$ ]  
 $V$         Gesamtvolumen des Gasgemisches [ $\text{m}^3$ ]  
 $M_s$       Molare Masse des gasförmigen Stoffes [g/mol] (s. auch Anhang B)  
 $V_N$       Molares Volumen [l/mol] ( $V_N = 24$  l/mol bei Bedingungen von 20 °C und 1013 hPa)

---

### Impressum:

Herausgeber:  
 Bayerisches Landesamt für Umwelt  
 Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
 86179 Augsburg

Postanschrift:  
 Bayerisches Landesamt für Umwelt  
 86177 Augsburg

Bildnachweis:

Telefon: (08 21) 90 71-0  
 Telefax: (08 21) 90 71-55 56  
 E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
 Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Bearbeitung:  
 Ref. 95 / Dr. Haas, Dr. Hofmann  
 Stand:  
 September 2009