

# > Probenahme und Analyse von Porenluft

*Ein Modul der Vollzugshilfe «Untersuchung von belasteten Standorten»*





# > Probenahme und Analyse von Porenluft

*Ein Modul der Vollzugshilfe «Untersuchung von belasteten Standorten»*

### **Stellenwert dieser Publikation**

Diese Publikation ist eine Vollzugshilfe des BAFU als Aufsichtsbehörde und richtet sich primär an die Vollzugsbehörden. Sie konkretisiert unbestimmte Rechtsbegriffe von Gesetzen und Verordnungen und soll eine einheitliche Vollzugspraxis fördern. Berücksichtigen die Vollzugsbehörden diese Vollzugshilfen, so können sie davon ausgehen, dass sie das Bundesrecht rechtskonform vollziehen; andere Lösungen sind aber auch zulässig, sofern sie rechtskonform sind. Das BAFU veröffentlicht solche Vollzugshilfen (bisher oft auch als Richtlinien, Wegleitungen, Empfehlungen, Handbücher, Praxishilfen u. ä. bezeichnet) in seiner Reihe «Umwelt-Vollzug».

### **Impressum**

#### **Herausgeber**

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

#### **Autoren**

Jürgen Abrecht, GEOTEST AG, Zollikofen; Eckard Drewes, UmweltMess GmbH, Lützelflüh; Peter Steffen, SJ GeoTec AG, Wolfwil; Jörg Meyer, NIUTEK AG, Winterthur

#### **Begleitung BAFU**

Bernhard Hammer, Abteilung Abfall und Rohstoffe; Christiane Wermeille, und Monika Schwab-Wyssler, Abteilung Boden und Biotechnologie

#### **Zitierung**

BAFU (Hrsg.) 2015: Probenahme und Analyse von Porenluft. Ein Modul der Vollzugshilfe «Untersuchung von belasteten Standorten». Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1521: 42 S.

#### **Gestaltung**

Karin Nöthiger, Niederrohrdorf

#### **Titelbild**

BAFU

#### **PDF-Download**

[www.bafu.admin.ch/uv-1521-d](http://www.bafu.admin.ch/uv-1521-d)

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer und italienischer Sprache verfügbar.

© BAFU 2015

# > Inhalt

<b>Abstracts</b>	<b>5</b>	<b>7 Auswertung der Resultate</b>	<b>30</b>
<b>Vorwort</b>	<b>7</b>	7.1 Allgemeines	30
<b>Zusammenfassung</b>	<b>8</b>	7.2 Die Porenluftkonzentration beeinflussende Faktoren	30
<hr/>		7.3 Natürliche Hintergrundbelastung durch flüchtige Stoffe	31
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>	7.3.1 Chlorierte Kohlenwasserstoffe	31
<hr/>		7.3.2 Kohlendioxid, Methan und Schwefelwasserstoff	32
<b>2 Rechtliche Grundlagen</b>	<b>10</b>	7.4 Altlastrechtliche Beurteilung	32
<hr/>		7.5 Rechnerische Abschätzung des Schadstoffgehalts im Sickerwasser und des Gesamtschadstoffgehalts aus den Gaskonzentrationen in der Porenluft	32
<b>3 Einsatzbereiche und Stoffe</b>	<b>12</b>	7.6 Qualitätssicherung	34
3.1 Ablagerungsstandorte	12	<hr/>	
3.2 Betriebsstandorte	13	<b>Anhang</b>	<b>35</b>
3.3 Unfallstandorte	13	A1 Physikalisch-chemische Eigenschaften von flüchtigen altlastenrelevanten Stoffen	35
3.4 Raumluftmessungen	14	A2 Durch Beprobung erfasstes Volumen	37
<hr/>		A3 Dokumentation der Probenahme	38
<b>4 Festlegung der Probenahmestellen</b>	<b>15</b>	A4 Methodenvergleich	39
4.1 Ablagerungsstandorte	15	<hr/>	
4.2 Betriebsstandorte	16	<b>Literatur</b>	<b>41</b>
4.3 Bauvorhaben	19	<b>Verzeichnisse</b>	<b>42</b>
<hr/>			
<b>5 Probenahme</b>	<b>20</b>		
5.1 Passives Verfahren	20		
5.2 Aktive Verfahren	20		
5.2.1 Probenahme mit Hohlsonden	21		
5.2.2 Probenahme mit Packer	24		
5.2.3 Membrane Interface Probe (MIP)	25		
5.3 Durch die Beprobung erfasstes Volumen	26		
5.4 Qualitätssicherung	26		
<hr/>			
<b>6 Analytik</b>	<b>27</b>		
6.1 Allgemeines	27		
6.2 Analysenmethoden	27		
6.2.1 Analyse mittels direktem Verfahren	28		
6.2.2 Analyse mittels anreicherndem Verfahren	28		
6.3 Qualitätssicherung	29		



## > Abstracts

The “Sampling and Analysis of Pore Air” module described in the “Examination of polluted Sites” enforcement aid, provides information about the areas of application of pore air measurement and includes instructions for selecting sampling sites. It also describes the sampling methodology and the analysis of pore air studies of contaminated sites. The module reflects the current status of technology, and the report also addresses the evaluation of the findings, as well as the aspect of quality assurance.

**Keywords:**

Pore air,  
Polluted sites,  
Contaminated site

Das Modul Probenahme und Analyse von Porenluft der Vollzugshilfe Untersuchung von belasteten Standorten gibt Auskunft über die Einsatzbereiche von Porenluftmessungen und enthält Anleitungen für die Festlegung der Probenahmestellen. Darüber hinaus werden die Probenahmetechnik und die Analytik von Porenluftuntersuchungen im Bereich der Altlasten beschrieben. Dabei gibt das Modul den heutigen Stand der Technik wieder. Zum Schluss wird auf die Auswertung der Resultate und die Qualitätssicherung eingegangen.

**Stichwörter:**

Porenluft,  
Belastete Standorte,  
Altlast

Le module Air interstitiel – Prélèvement d'échantillons et analyse qui fait partie de l'aide à l'exécution Investigation de sites pollués fournit des informations sur le domaine d'application des mesures d'air interstitiel et sur le choix des points de prélèvement. Il décrit également les techniques d'échantillonnage et les méthodes d'analyse de l'air interstitiel dans le domaine des sites contaminés, et reflète l'état actuel de la technique. La dernière partie est consacrée à l'interprétation des résultats et à l'assurance de la qualité.

**Mots-clés:**

air interstitiel,  
sites pollués,  
sites contaminé

Il modulo Prelievo di campioni e analisi dell'aria interstiziale dell'aiuto all'esecuzione Indagine sui siti inquinati fornisce indicazioni sui campi d'applicazione delle misurazioni dell'aria contenuta nei pori del suolo e istruzioni per scegliere i punti di prelievo. Descrive inoltre la tecnica di campionamento e i metodi di analisi dell'aria interstiziale nell'ambito dei siti inquinati, riflettendo lo stato attuale della tecnica. Il modulo si sofferma infine sull'interpretazione dei risultati e sulla garanzia della qualità.

**Parole chiave:**

aria interstiziale,  
siti inquinati,  
siti contaminati





---

## > Vorwort

Das Schadstoffspektrum von belasteten Standorten umfasst oft auch flüchtige Stoffe, welche besonders leicht in die Gasphase des Bodens gelangen. Sind geeignete Ausbreitungspfade vorhanden, können die Schadstoffe aus der Porenluft des Bodens an Orte strömen, an denen sich Personen aufhalten, und diese Personen potenziell gefährden.

Bei der Untersuchung und Beurteilung von belasteten Standorten spielen deshalb Porenluftuntersuchungen eine wichtige Rolle. Damit wird eine der Zielsetzungen der Altlasten-Verordnung (AltIV) erfüllt, nämlich die Beurteilung eines belasteten Standortes hinsichtlich des Schutzes von Personen vor Luftverunreinigungen.

Die vorliegende Vollzugshilfe soll mit ihren Anforderungen an die Festlegung der Probenahmestellen, die Probenahme und die Analytik von Porenluftuntersuchungen zur Harmonisierung, Qualitätssicherung und Rechtsgleichheit beitragen. Eine dem Stand der Technik entsprechende Probenahme und Analytik ist nicht zuletzt auch Voraussetzung dafür, dass Abgeltungen gemäss der Verordnung über die Abgabe zur Sanierung von Altlasten (VASA) gewährt werden können.

Gérard Poffet  
Vizedirektor  
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

## > Zusammenfassung

Gemäss Altlasten-Verordnung (AltIV) ist ein belasteter Standort hinsichtlich des Schutzes von Personen vor Luftverunreinigungen sanierungsbedürftig, wenn seine Porenluft einen festgelegten Konzentrationswert überschreitet und die vom Standort ausgehenden flüchtigen Schadstoffe an Orte gelangen, an denen sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten können.

Für die Untersuchung und Beurteilung von belasteten Standorten in Bezug auf Luftverunreinigungen sind deshalb Porenluftmessungen notwendig. Die Resultate sollten nach Möglichkeit durch weitere quantitative Untersuchungsmethoden sowie eine Plausibilitätsprüfung (z. B. historische Untersuchung, Hydrogeologie, Geologie) verifiziert werden.

Porenluftmessungen können für leicht- und mittelflüchtige Stoffe mit einem Siedepunkt von bis zu rund 200 °C eingesetzt werden. Die Entnahme von Porenluft bedingt eine minimale Durchlässigkeit des zu beprobenden Untergrunds. Grundsätzlich geeignet sind kiesige bis feinsandige Schichten im ungesättigten Bereich.

Bei Deponiestandorten ist ein gleichmässiges Beprobungsmuster zweckdienlich, wobei potenzielle Ausbreitungspfade (z. B. Leitungsgräben) zu berücksichtigen sind. Porenluftuntersuchungen dienen insbesondere dazu, Rückschlüsse auf den Abbauzustand der Deponie zu ziehen. Bei Betriebsstandorten steht der direkte Nachweis von Belastungen mit leichtflüchtigen Lösungsmitteln oder Betriebsstoffen im Vordergrund. Die Messstandorte sind eher punktuell unter Berücksichtigung der Ergebnisse der historischen Untersuchung (z. B. Lagerung, Umschlag, Versickerung, Abluft, Abwasser) zu wählen.

Es wird zwischen aktivem und passivem Verfahren zur Probenahme von Porenluft unterschieden. Beim passiven Verfahren sind nur qualitative Aussagen möglich und der Einsatz von Passivsammlern hat sich nicht durchgesetzt. Das aktive Verfahren zur Entnahme von Porenluftproben erfolgt entweder über das Ansaugen mittels Hohlsonde oder über das Ansaugen durch den Packer (in Verbindung mit Kernentnahmen). Beim aktiven Verfahren wird weiter zwischen direktem und anreicherndem Verfahren unterschieden. Beim direkten Verfahren erfolgt die Probenahme direkt in ein Headspace-Gläschen, eine Gasmaus oder einen Gasbeutel. Beim anreichernden Verfahren strömt die Porenluft in ein Adsorptionsröhrchen. Porenluftanalysen erfolgen in der Regel mittels Gaschromatograph.

Bei der Interpretation der Porenluftwerte gilt es, verschiedene Faktoren zu berücksichtigen, beispielsweise die Witterungsverhältnisse, Oberflächenversiegelung, Geologie, Lithologie und die natürliche Hintergrundbelastung.

Zur Qualitätssicherung ist es wichtig, dass die Probenahme fachkundig geplant, durchgeführt und nachvollziehbar dokumentiert wird. Im Zusammenhang mit der Analyse von Porenluft wird für Labors eine Akkreditierung nach ISO/IEC 17025 empfohlen.

# 1 > Einleitung

---

Die Porenluftuntersuchung ist ein wichtiges und häufig eingesetztes Verfahren zur Eingrenzung von leichtflüchtigen Schadstoffen im Untergrund.

Wichtige Grundlagen für aussagekräftige Porenluftuntersuchungen sind gute Kenntnisse vom Aufbau des Untergrunds und eine sorgfältig abgeklärte Standortgeschichte. Die Sondierstrategie wird an die örtlichen Verhältnisse angepasst.

Im Rahmen der altlastenrechtlichen Beurteilung eines belasteten Standorts sind die Resultate der Porenluftuntersuchungen nach Möglichkeit durch weitere quantitative Untersuchungsmethoden zu verifizieren. Eine Standortbeurteilung allein über die Porenluft kann ausnahmsweise vorgenommen werden, wenn keine Grundwasser- oder Sickerwasserbeprobung möglich ist. Plausibilitätsüberlegungen unter Berücksichtigung von historischer Untersuchung sowie der Geologie und Hydrogeologie des Standorts sind in jedem Fall erforderlich.

Die vorliegende Vollzugshilfe soll

- > die Möglichkeiten und Grenzen aufzeigen, innerhalb denen Porenluftuntersuchungen sinnvoll und zielorientiert eingesetzt werden können,
- > einen kurzen Überblick über die Techniken zur Probenahme und Analyse von Porenluft geben,
- > Standards für die Durchführung von Porenluftuntersuchungen definieren und
- > die minimalen Anforderungen an die Dokumentation der Probenahme und Analytik festhalten.

Die vorliegende Vollzugshilfe richtet sich daher an

- > Messlabors, welche Porenluftsondierungen und -analysen mit eigenen Geräten durchführen,
- > Gutachterbüros, welche mit der Untersuchung belasteter Standorte beauftragt sind und Messlabors mit Porenluftuntersuchungen beauftragen, und
- > Fachbehörden, welche gestützt auf Ergebnisse von Porenluftuntersuchungen Belastungen beurteilen und falls erforderlich weitere Massnahmen anordnen.

## 2 > Rechtliche Grundlagen

---

Gemäss Artikel 32c Absatz 1 des Bundesgesetzes vom 7. Oktober 1983 über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG; SR 814.01) sorgen die Kantone dafür, dass Deponien und andere durch Abfälle belastete Standorte saniert werden, wenn sie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen führen oder die konkrete Gefahr besteht, dass solche Einwirkungen entstehen. Die Verordnung vom 26. August 1998 über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV; SR 814.680) konkretisiert Artikel 32c Absatz 1 USG.

Gemäss Artikel 11 AltIV ist ein belasteter Standort hinsichtlich des Schutzes von Personen vor Luftverunreinigungen sanierungsbedürftig, wenn seine Porenluft einen Konzentrationswert nach Anhang 2 AltIV überschreitet und die vom Standort ausgehenden Emissionen an Orte gelangen, wo sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten können.

Verursacht der Standort Emissionen, für die keine Konzentrationswerte bestehen, namentlich Gerüche oder Staub, so ist er sanierungsbedürftig, wenn die Emissionen zu übermässigen Immissionen im Sinne der Luftreinhalte-Verordnung (LRV; SR 814.318.142.1) führen können (Anh. 2 Abs. 1 AltIV).

Betreffend die Durchführung der Probenahme sowie die Analyse von Porenluftproben gelten gemäss Anhang 2 Absatz 2 AltIV folgende Anforderungen:

- a) Die Probenahme muss anhand von Bodengassonden (sog. Porenluftsonden) an einer für die Belastung des Standortes repräsentativen Anzahl von Messstellen erfolgen. Es muss sichergestellt werden, dass bei der Probenahme keine Fremdluft (sog. Umgebungsluft) angesaugt wird.
- b) In der Porenluft müssen nur diejenigen Stoffe analysiert werden, mit deren Vorkommen am Standort aufgrund der historischen Untersuchung zu rechnen ist. Werden bloss Summenparameter analysiert, so gilt als Beurteilungskriterium stets der niedrigste Konzentrationswert der Einzelstoffe.

Auf die Entnahme von Porenluftproben kann verzichtet werden, wenn ein anderweitiger Nachweis vorliegt, dass die Konzentrationswerte in der Porenluft nicht überschritten werden können, namentlich auf Grund der genauen Kenntnis der Zusammensetzung und Herkunft des Materials des Standortes (Anh. 2 Abs. 3 AltIV).

Die in Anhang 2 AltIV aufgeführten Konzentrationswerte für die Porenluft sind nur dann für die altlastenrechtliche Einstufung des Sanierungsbedarfs von Belang, wenn **gleichzeitig** nachgewiesen werden kann, dass die belastete Porenluft an Orte gelangt, wo sich «Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten können» (Art. 11 AltIV).

---

Für die Beurteilung der Einwirkungen leichtflüchtiger Stoffe auf die Gewässer wird das Sickerwasser als Eluat betrachtet. Falls keine Sickerwasserproben entnommen werden können, so wird die Sickerwasserkonzentration aufgrund der in der Porenluft gemessenen Konzentrationen berechnet (vgl. Anh. 1 Abs. 4 AltIV).

Das Bundesamt für Umwelt erlässt die dazu notwendigen Vollzugshilfen über die Probenahme und Analyse der Porenluft sowie über die Beurteilung der Einwirkungen leichtflüchtiger Stoffe (vgl. Anh. 1 Abs. 6 und Anh. 2 Abs. 4 AltIV).

## 3 > Einsatzbereiche und Stoffe

Im Bereich der Altlastenuntersuchungen sind heute Porenluftmessungen zur Erfassung von Kontaminationen durch gasförmige Stoffe eine verbreitete und etablierte Methodik. Sie stellen eine orientierende Messmethode dar, welche es erlaubt, sehr schnell und mit vergleichsweise geringem Aufwand Aussagen über die Art der vorhandenen Kontamination und deren Ausbreitung zu machen. Obwohl die resultierenden Analyseergebnisse meist sehr genaue Konzentrationsangaben beinhalten, sind diese nur beschränkt für eine verbindliche altlastrechtliche Standortbeurteilung nutzbar. Die Gründe dafür werden weiter unten eingehender erläutert.

Orientierende Messmethode  
mit geringem Aufwand

Porenluftmessungen können zu unterschiedlichen Zwecken und mit unterschiedlichen Zielsetzungen eingesetzt werden. Die Porenluftentnahme bedingt eine minimale Durchlässigkeit des zu beprobenden Untergrundes, d. h., sie ist grundsätzlich für kiesige bis feinsandige Schichten im ungesättigten Bereich geeignet. In siltigen bis tonigen Schichten oder in stark wasserhaltigen Torflagen ist die Durchlässigkeit für eine Probenahme zu gering. In den Fällen, wo keine Porenluftproben entnommen werden können, wird empfohlen, Feststoffproben zu entnehmen und zu analysieren.

Am häufigsten kommen Porenluftuntersuchungen im Rahmen der Voruntersuchung zur Anwendung. Aber auch im Rahmen von Detailuntersuchungen, oder zur Überprüfung des Sanierungserfolgs bei Sanierungen der ungesättigten Zone wird das Verfahren verwendet.

Die Porenluftuntersuchung wird für leichtflüchtige und mittelflüchtige Stoffe mit einem Siedepunkt von bis zu rund 200 °C eingesetzt. Abhängig von der jeweiligen Analysemethode lassen sich verschiedene Stoffgruppen mit unterschiedlicher Bestimmungsgrenze erfassen.

Die Art der Schadstoffe, die betroffenen Schutzgüter wie auch die Fragestellungen bzw. Zielsetzungen von Porenluftmessungen sind von der Art des Standortes abhängig (Ablagerungsstandort, Betriebsstandort etc.).

### 3.1 Ablagerungsstandorte

Bei Multikomponenten- und Gemeindedeponien, aber auch bei Deponien, wo zumindest ein Verdacht auf die Ablagerung von organischen Materialien oder von leichtflüchtigen Organika besteht, stellen Porenluftmessungen eine standardisierte Erkundungsmethode dar. Hier dienen sie dem Nachweis der typischen Deponiegase, aber auch der Suche nach abgelagerten leichtflüchtigen organischen Stoffen (z. B. Lösungsmittel).

Abfallablagerungen:  
vor allem Deponiegase

Die beiden wichtigsten Deponiegase Kohlendioxid und Methan (brennbares Gas), von welchen Letzteres mit Konzentrationen bis gegen 100 % vorhanden sein kann, sind typische Produkte von biogenen Abbauvorgängen in Ablagerungsstandorten mit organischen Anteilen. Daneben können in Deponien auch weitere Gase entstehen. Schwefelwasserstoff bildet sich beispielsweise, wenn Siedlungsabfälle und Gips vorliegen. Kohlenmonoxid entsteht bei Schwelbränden im Deponiekörper. Diese Gase wie auch Wasserstoff und Ammoniak entstehen im Gegensatz zu den leichtflüchtigen Organika, die als Abfälle in die Deponie eingebracht worden sind, erst vor Ort infolge von Reaktionen, welche stark von den physiko-chemischen Verhältnissen abhängen. Ihr Auftreten erlaubt deshalb auch Rückschlüsse auf den Abbauzustand der Deponie. Grundsätzlich geben die Art und Anteile der verschiedenen Deponiegase oft wichtige Hinweise auf deponierte Stoffe sowie den Abbauzustand der organischen Anteile.

Eine Gefährdung von Mensch und Tier durch Deponiegase kann direkt durch Atemgifte wie Kohlendioxid oder Schwefelwasserstoff vorhanden sein, oder aber indirekt durch brennbare bzw. explosive Gase (Methan) entstehen.

Deponiegase stellen somit erst eine Gefährdung dar, wenn sie an Orte gelangen, wo sich Menschen oder Tiere aufhalten (z. B. Kellerräume, Leitungskanäle und -gräben, Baugruben) und die Gasvolumina gross sind.

### 3.2 Betriebsstandorte

Die Zielsetzung bei der Untersuchung von Betriebsstandorten ist in der Regel der direkte Nachweis von Belastungen durch leichtflüchtige Lösungsmittel und/oder durch Betriebsstoffe (Benzin, Petrol, Diesel, Heizöl).

**Betriebsstandorte:**  
vor allem leichtflüchtige  
Lösungsmittel und Betriebsstoffe

Bei technischen Untersuchungen von Tankstellen oder Tanklagern wird die Methode zur Messung von Mineralölinhaltsstoffen in Kraftstoffen verwendet (Aliphate, Aromate, MTBE).

Leichtflüchtige Organika stellen bereits aufgrund ihres Vorhandenseins wichtige Indikatoren für potenzielle Verschmutzungen durch Kohlenwasserstoffverbindungen dar. Die Gasvolumina sind dabei in der Regel klein, hohe Konzentrationen (d. h. in der Regel im ppm-Bereich) zeigen aber eine Verschmutzung an, die – im Gegensatz zu den Deponiegasen – sowohl die Feststoffe als auch das Grundwasser betrifft. Die Gaskonzentration ist hier ein direkter Hinweis auf das Gefährdungspotenzial.

Ergänzende Messungen dienen bei Detailuntersuchungen häufig dazu, belastete Bereiche bzw. Schadenherde möglichst genau einzugrenzen.

### 3.3 Unfallstandorte

Bei Unfällen und Havarien, bei welchen leichtflüchtige Stoffe (CKW, Benzin, Diesel, Heizöl) freigesetzt werden, können Porenluftmessungen Hinweise auf die Ausbreitung dieser Stoffe im Untergrund liefern.

3.4

## Raumluftmessungen

Die in Anhang 2 der Altlasten-Verordnung aufgeführten Konzentrationswerte für die Porenluft sind nur dann für die altlastrechtliche Einstufung der Sanierungsbedürftigkeit von Belang, wenn gleichzeitig nachgewiesen werden kann, dass die belastete Bodenluft an Orte gelangt, wo sich «Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten können». Liegen somit hohe Porenluftkonzentrationen über den Konzentrationswerten vor und kann aufgrund der lokalen geologischen und baulichen Gegebenheiten eine Emission an solche Orte nicht ausgeschlossen werden, sind Raumluftmessungen sowohl zur Beurteilung des Sanierungsbedarfes als auch zur Klärung der direkten Gefährdung von Menschen an den betroffenen Orten angebracht oder gar notwendig. Neben geschlossenen Räumen (z. B. Kellerräume) sind auch nur teilweise offene Räume wie Leitungsgräben und Baugruben einzubeziehen. (vgl. Kap. 4.3).

Gassicherheitsmessungen auf brennbare Gase (v. a. Methan), Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff können in diesen Fällen mit Handmessgeräten vor Ort durchgeführt werden.

Für Raumluftmessungen sind die Probenahme- und Analysenmethoden für Porenluft ungeeignet. Die dort eingesetzten Messverfahren richten sich nach eigenen Richtlinien und Normen des BAG bzw. der SUVA. Sie werden durch spezialisierte Firmen durchgeführt.

**Regelmässiger Aufenthalt von  
Personen während längerer Zeit**

**Gassicherheitsmessungen**



## 4 > Festlegung der Probenahmestellen

Die Art der Schadstoffe, die betroffenen Schutzgüter wie auch die Fragestellungen bzw. Zielsetzungen von Porenluftmessungen sind auf Ablagerungsstandorten und Betriebsstandorten meist verschieden und erfordern eine entsprechende Beprobungsstrategie.

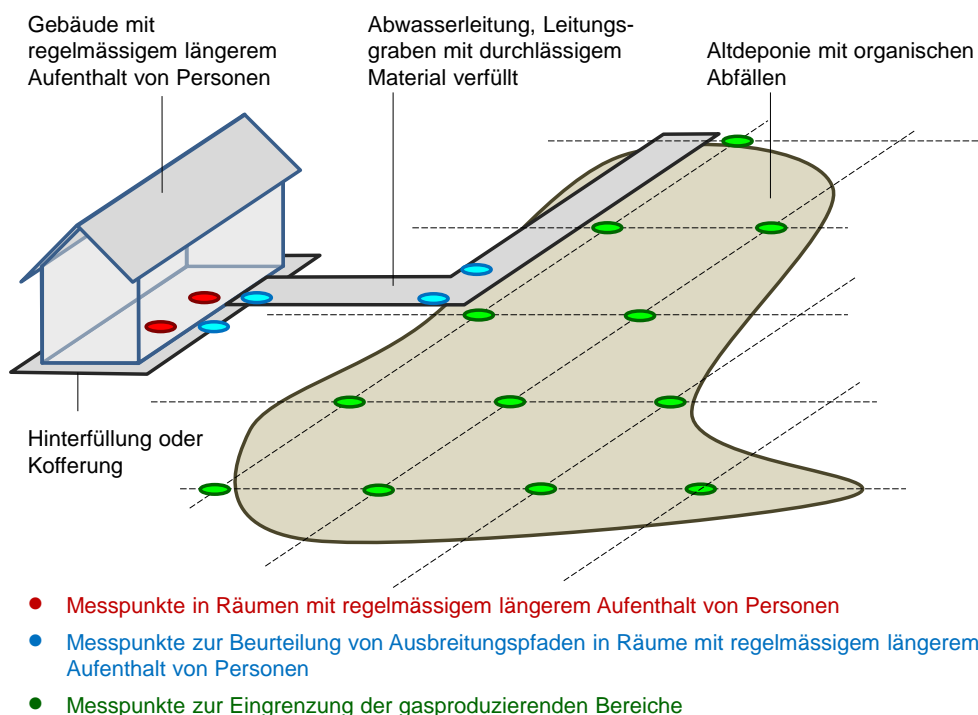
Beprobungsstrategien

### 4.1 Ablagerungsstandorte

Erweisen sich Porenluftmessungen aus den oben erwähnten Gründen als notwendig und zweckmässig, muss ein Beprobungskonzept entsprechend der Fragestellung erstellt werden. Sind bestehende oder geplante Bauten potenziell gefährdet, sind u. U. Messungen auch ausserhalb des Deponieperimeters erforderlich.

Bei Altdeponien ist meist nicht bekannt, welche Materialien wo abgelagert wurden. Es empfiehlt sich deshalb, über die mutmassliche Deponiefläche ein Raster mit Gasentnahmepunkten zu legen. (Abb. 1 grüne Punkte). Hinsichtlich des Schutzes von Personen sind weitere Messpunkte zu definieren (Abb. 1 blaue und rote Punkte).

Abb. 1 > Probenahmeraster auf Deponien



Es soll nach Möglichkeit eine *flächendeckende* Erfassung des Untersuchungsareals angestrebt werden. Zweckmässig ist dabei oft ein etappiertes Vorgehen, indem – ausgehend von den Ergebnissen einer ersten Rastermessung – in einem 2. Schritt der Raster in ausgesuchten Arealbereichen verfeinert wird. Der zu wählende Punkteabstand wird aufgrund der lokalen Situation und der Zielsetzung der Messungen festgelegt. Je nach Rasterweite können so Bereiche mit hoher Deponiegasproduktion zumindest näherungsweise eingegrenzt werden.

Etappiertes Vorgehen

Falls hohe Gaskonzentrationen gemessen werden und hoch belastete Zonen ausgeschlossen werden können, können sich im Hinblick auf Massnahmen gegen das Eindringen von Gas in Gebäude Pumpversuche als zweckmässig erweisen. Diese geben Auskunft über die zu erwartenden Gasvolumina und geben Hinweise auf die zu treffende Massnahmen.

Die früher häufig durchgeführten flächendeckenden Messungen auf Deponiestandorten mit der sog. «Teppichsonde» zur Erfassung von aus der Oberfläche austretenden Gasemissionen sind wenig aussagekräftig. Die Messergebnisse sind stark von den äusseren Rahmenbedingungen abhängig. Eine Verdünnung durch Atmosphärenluft ist kaum vermeidbar. Der Einsatz dieser Methode ist deshalb problematisch. In landwirtschaftlich genutzten Gebieten können Beobachtungen des Bewuchses (Wachstumsstörungen) zu eindeutigeren Aussagen über Gasaustritte führen.

4.2

## Betriebsstandorte

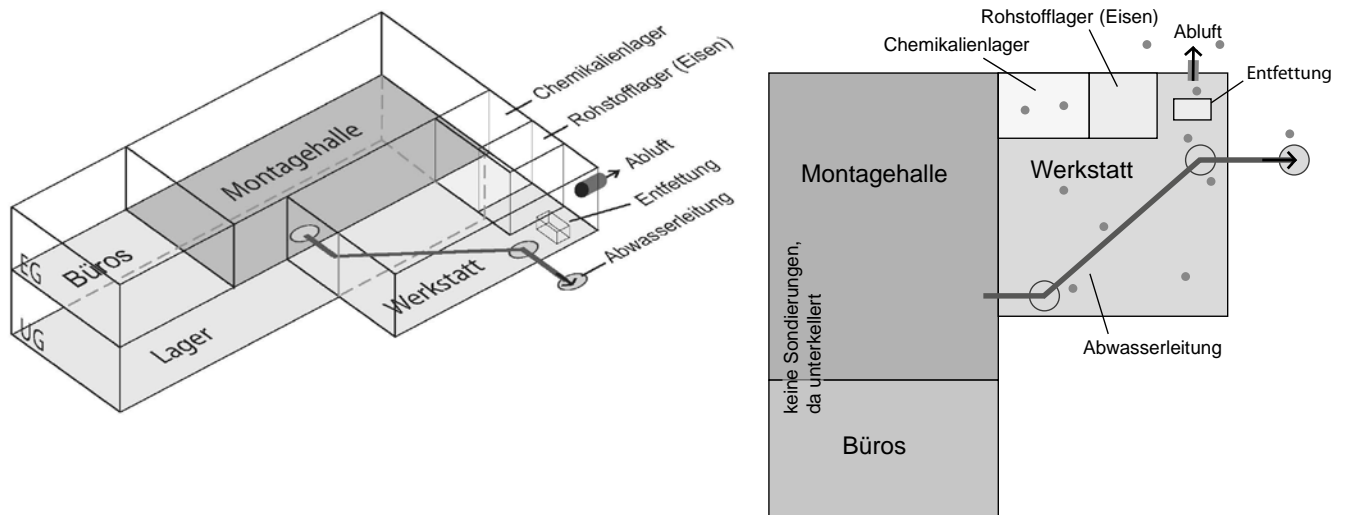
Die Messung von toxischen leichtflüchtigen Organika dient in erster Linie zum qualitativen Nachweis und zur räumlichen Eingrenzung einer Kontamination durch leichtflüchtige organische Stoffe. Das Beprobungskonzept für die Erfassung dieser Stoffe muss sich deshalb auf die Ergebnisse der historischen Untersuchung stützen. Die Entnahme von Proben wird sich auf die Bereiche konzentrieren, an denen solche Stoffe gelagert, ein- oder umgesetzt oder versickert worden sind oder zumindest ein dahin gehender Verdacht besteht<sup>[5]</sup>.

Qualitativer Nachweis,  
räumliche Eingrenzung

Die Werkleitungen müssen vorgängig eingehend und vollständig abgeklärt werden. Von Industriearealen und auch Tankstellen liegen oft keine aktuellen Pläne mehr vor. Können die Leitungen nicht zweifelsfrei lokalisiert werden, ist eine alternative Sondierung durchzuführen oder die Leitungen sind mittels Handaushub zu lokalisieren.

Werkleitungen

Abb. 2 &gt; Probenahmestrategie bei Betriebsstandorten



Die Vorgehensweise ist somit *standort- bzw. ereignisorientiert*. Da gewisse Stoffe (insbesondere halogenierte Lösungsmittel) vorwiegend auf Industrie- und Gewerbestandorten und dort meist eher punktuell eingesetzt worden sind, sind gleichmässige, flächendeckende Beprobungsraster meist nicht zweckmässig und überdies häufig nicht realisierbar. Gerade auf noch aktiven Betriebsstandorten sind die Beprobungsmöglichkeiten oft eingeschränkt. Das Augenmerk ist daher vor allem darauf zu richten, dass möglichst alle Bereiche mit Verschmutzungspotenzial mit einer hinreichenden Beprobungsdichte erfasst werden können. Wegen der spezifischen Stoff- und Ausbreitungseigenschaften von leichtflüchtigen Organika sind die Abstände zwischen Beprobungspunkten eher gering zu halten, d. h. 5 bis 10 m oder weniger.

Eingeschränkte  
Beprobungsmöglichkeiten

Die Stoff- und Ausbreitungseigenschaften der leichtflüchtigen Schadstoffe können erhebliche Unterschiede aufweisen (vgl. Anhang A1). Bei der Festlegung der Messstandorte sind folgende Eigenschaften speziell zu beachten:

Stoff- und Ausbreitungseigenschaften

- > Mobilität der Stoffe (Sorptionstendenz),
- > Tendenz der Ausbreitung entlang von Pfaden erhöhter Durchlässigkeit (Leitungen, Kofferungen etc.),
- > Dichte der Gase (präferentielle Ausbreitungsrichtung).

Die Tendenz vieler Stoffe, wie etwa der halogenierten Kohlenwasserstoffe, sich in bzw. auf geringer durchlässigen Horizonten anzureichern, führt im Untergrund zu sehr heterogenen und kaum voraussagbaren Verteilungen.

Als zweckmässig haben sich Vorgehensweisen erwiesen, welche

- > entweder ein etappiertes Vorgehen mit Verdichtung der Messabstände in einem zweiten Schritt,
- > oder den Einsatz eines mobilen Analytiklabors beinhalten.

Ein mobiles Labor kann bei Unfallstandorten, wo in kurzer Zeit Ergebnisse vorliegen müssen, oder bei der Suche und Eingrenzung von Schadensherden von Vorteil sein. Dabei kann die Festlegung der Probenahmepunkte gezielt in Abhängigkeit von bereits vorliegenden Messresultaten erfolgen. Zusätzliche Messkampagnen können dadurch u. U. vermieden werden, was nicht zuletzt hinsichtlich der Kosten von Vorteil ist. Als Alternative zum mobilen Analytiklabor können auch Vor-Ort-Messungen mit einem Photoionisations-Detektor (PID) dienen, der allerdings nur die Summe der flüchtigen organischen Verbindungen anzeigt.

Bei der Festlegung der Beprobungstiefen sind folgende Punkte zu beachten:

**Beprobungstiefe**

- > Ausbildung des Untergrundes (bindig: wenig durchlässig, sandig-kiesig: gut durchlässig,
- > Oberfläche versiegelt oder nicht versiegelt,
- > Tiefe von Schächten und Leitungen,
- > Bauliche Gegebenheiten,
- > Lage des Grundwasserspiegels (bei geringen Flurabständen Achtung bei Sondierungen in Untergeschossen!).

Flächendeckende, rasterförmige Messungen können bei günstigen Rahmenbedingungen (geringer Flurabstand, hinreichend durchlässige ungesättigte Zone) zur Erfassung und Eingrenzung von Schadstofffahnen im Grundwasser, etwa von halogenierten Lösungsmitteln, vorgenommen werden, da letztere im Abstrom des Schadenherdes in die Porenluft rückdiffundieren («ausgasen»).

**Eingrenzung von  
Schadstofffahnen**

Um Informationen über die vertikale Verteilung von leichtflüchtigen Organika zu gewinnen (z. B. wenn bekannt ist, dass der Untergrund heterogen aufgebaut ist), kann eine tiefenzonierte Beprobung vorgesehen werden. Dazu bieten sich verschiedene Möglichkeiten an:

**Vertikale Schadstoffverteilung**

- > Entnahme von Gasproben aus der vorgesehenen Tiefe, anschliessend Rammen einer weiteren Stahlhohlsonde in unmittelbarer Nachbarschaft auf eine grössere Tiefe und Entnahme einer Gasprobe. Ein Weiterrammen der Stahlhohlsonde nach der ersten Probenahme in eine grössere Tiefe ist beim Einsatz von verlorenen Spitzen nicht möglich.
- > Bei Sondierbohrungen Probenahme aus der vorgesehenen Tiefe im unverrohrten Abschnitt (z. B. Rückzug des Futterrohrs). Das Rohr muss mittels Packer gegen die Atmosphärenluft abgedichtet werden.
- > Erstellen von Mehrfachmessstellen, welche unterschiedliche Tiefen erreichen und gegeneinander abgedichtet sind (sog. «Kaskaden»).
- > Einsatz der Membrane Interface Probe (MIP).

### 4.3 Bauvorhaben

Gemäss Artikel 3 der AltIV sind Bauvorhaben auf belasteten Standorten grundsätzlich möglich, sofern dabei

- > keine schädlichen oder lästigen Auswirkungen ausgelöst werden,
- > der Standort gleichzeitig saniert wird oder
- > durch das Bauvorhaben spätere Sanierungsmassnahmen nicht wesentlich erschwert werden.

Zur Prüfung, ob ein Bauvorhaben auf einem belasteten Standort bei der Realisierung oder später zu einem Sanierungsbedarf führen kann, soll eine Gefährdungsabschätzung durchgeführt werden. Sie erfolgt in der Regel im Rahmen einer Standortuntersuchung während der Planungsphase des Bauvorhabens. Sind hinsichtlich der Gefährdung durch Porenluft vorbeugende baubedingte Massnahmen notwendig, setzt dies voraus, dass Gasmessungen zu einem frühen Zeitpunkt vorgenommen werden. Dies wiederum erfordert seitens des Gutachters eine offene und zielgerichtete Information des Bauherrn und die Einbindung des Gutachters in die Projektplanung.

Oft ist mit dem Bauvorhaben auch eine Nutzungsänderung verbunden. So können auf einem unbebauten oder beispielsweise bisher nur als Lagerplatz genutzten Grundstück durch das Bauvorhaben Räume entstehen, in denen sich Personen regelmässig und über längere Zeit aufhalten.

**Bauvorhaben  
mit Nutzungsänderung**

Auch die nähere Umgebung des Baugrundstücks soll beurteilt werden. Eine Gefährdung kann beispielsweise entstehen, wenn ein Leitungsgraben oder eine Koffierung eine gasproduzierende Belastung in der Umgebung tangiert, so dass neue Ausbreitungswege für die belastete Porenluft zwischen der Belastung und dem neuen Bauwerk geschaffen werden (vgl. Abb. 1).

**Umgebung des Baugrundstücks  
neue Ausbreitungswege**

Für die Probenahme ist die Tiefe der Entnahme in Bezug auf das vorgesehene Bauwerk zu berücksichtigen. Unter Umständen müssen zu einem späteren Zeitpunkt während der Bauphase weitere Messungen von der Baugrubensohle aus vorgenommen werden.

Bei Bauvorhaben im Bereich von Altablagerungen sind die von den Deponiegasen ausgehenden Gefahren (Erstickung, Vergiftung, Explosion etc.) beim Bauvorgang speziell zu beachten: Deponiegase können sich in der Baugrube, in Fundament- oder Leitungsgräben ansammeln (vgl. Kap. 3.1 und 4.1). Bei Bauvorhaben mit möglichen Gasaustritten sind daher Gassicherheitsmessungen erforderlich. Die Arbeitssicherheit auf der Baustelle muss speziell beurteilt werden (LRV<sup>[17], [18]</sup>).

**Arbeitssicherheit auf Baustellen**

## 5 > Probenahme

---

Bei den ausschliesslich für Porenluftanalysen geeigneten Probenahmeverfahren wird grundsätzlich zwischen *passiven* und *aktiven* Verfahren unterschieden (siehe dazu Methodenvergleich in Anhang A4).

### 5.1 Passives Verfahren

Das passive Verfahren, bei dem Sammler («sampler») mit adsorbierender Beschichtung/Ladung (Tenax, Aktivkohle u. ä.) im Boden vergraben und über eine gewisse Zeit dort belassen werden, erlaubt nur qualitative Aussagen über eine Verunreinigung. Der Einsatz von Passivsammlern bei der Porenluftuntersuchung hat sich nicht durchgesetzt.

Passivsammler

### 5.2 Aktive Verfahren

Bei den aktiven Verfahren unterscheidet man zwischen direktem und anreicherndem Verfahren (vgl. Anhang A4). Als weiteres aktives Verfahren wird die MIP-Methode in Abschnitt 5.2.3 beschrieben.

Beim direkten Verfahren erfolgt die Probenahme der Porenluft direkt in Headspace-Gläschen, Gasmäuse oder Gasbeutel. Das direkte Verfahren ist geeignet für alle leichtflüchtigen Stoffe (Sdp. < 80 °C) der AltIV. Es sind dies Methan, Benzine und Zusätze sowie die Stoffgruppen «Halogenierte Kohlenwasserstoffe» und «Monocyclische aromatische Kohlenwasserstoffe». Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff können direkt vor Ort gemessen werden.

Direktes Verfahren

Beim anreichernden Verfahren wird ein definiertes Volumen der Porenluft durch eine geeignete Sammelphase gesaugt und die Analyten werden adsorbiert (Adsorptionsröhrchen). Es bietet sich an für die Bestimmung der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK inkl. Naphthalin und Benzo(a)pyren) sowie von Quecksilber.

Anreicherndes Verfahren

Von den verschiedenen Techniken für die Entnahme von Porenluftproben (DIN<sup>[7]</sup>, VDI ISO<sup>[17]</sup>, ITVA<sup>[11]</sup>, div. Arbeitshilfen aus deutschen Bundesländern<sup>[1], [2], [13]</sup>) hat sich – angepasst an die Untergrundverhältnisse in der Schweiz – das aktive Verfahren etabliert.

Zum Einsatz kommen

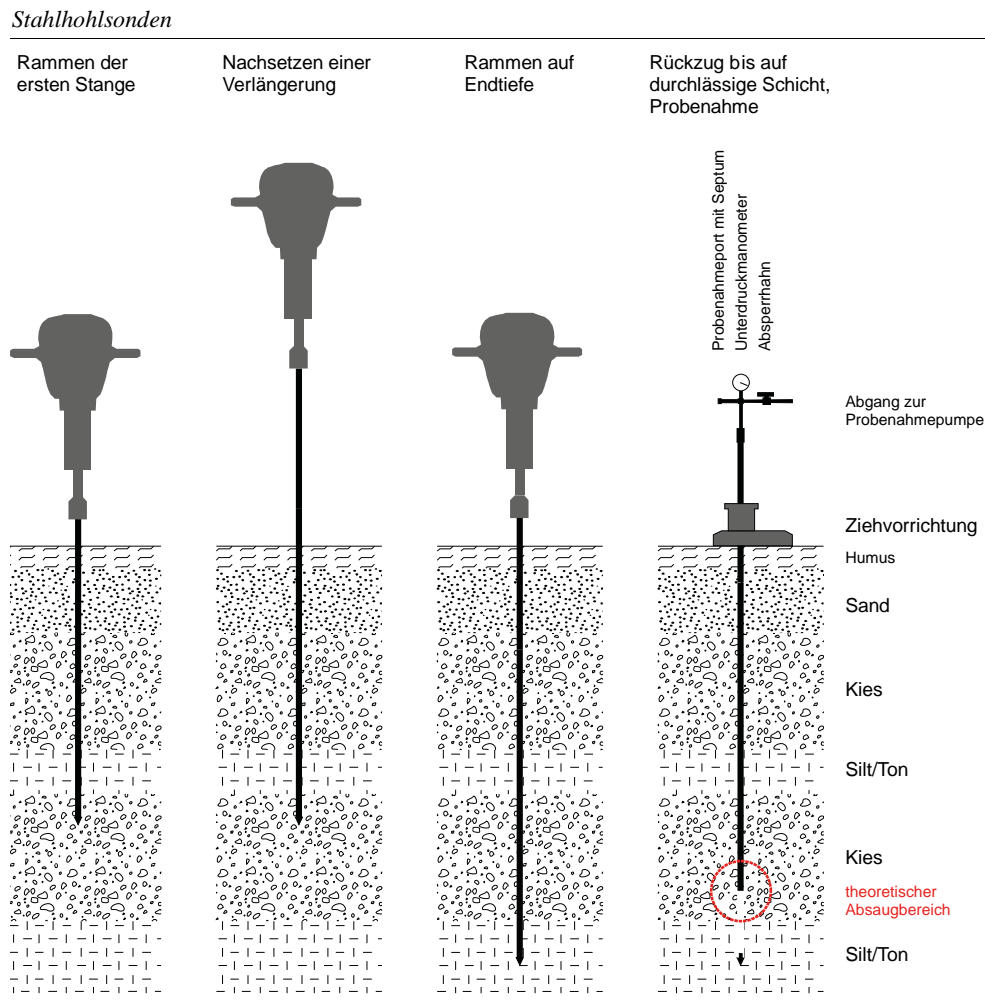
- > Ansaugen über Hohlsonde oder
- > Ansaugen über Packer (in Verbindung mit Kernentnahmen)

### 5.2.1 Probenahme mit Hohlsonden

Beim in der Schweiz heute üblichen aktiven Verfahren werden Stahlhohlsonden mit verlorener Spitze mit einem Elektrohammer in den Untergrund gerammt. Die Rammtiefe liegt in der Regel zwischen 1.5 m und 2.5 m (Abb. 3), kann aber nach Bedarf erhöht werden. Die Grenzen werden durch die Materialeigenschaften des Untergrundes (Rammpbarkeit) gesetzt. Beim Einsatz von Verlängerungen ist darauf zu achten, dass die Schraubverbindungen gasdicht sind, damit an diesen Stellen keine Porenluft angesaugt wird. Grössere Rammtiefen sind möglich, aber die Verbindungsstücke der Verlängerungen bilden einen mechanischen Schwachpunkt, so dass mit zunehmender Tiefe, insbesondere bei dicht gelagerten, groben Schottern, die Gefahr eines Sondenbruchs zunimmt. Zudem ist ein Weiterrammen nach der Probenahme beim Einsatz einer verlorenen Spitze nicht möglich. Es soll deshalb für jede Probenahmetiefe eine separate Sonde gerammt werden. Aus diesem Grund ist für die Aufnahme eines Tiefenprofils der Schadstoffverteilung der Einsatz der «Membrane Interface Probe» (MIP) vorzuziehen (siehe Abschnitt 5.2.3).

Rammsondierungen

Abb. 3 > Rammsondierungen zur Entnahme von Porenluftproben



Mit Beton oder Schwarzbelag versiegelte Oberflächen werden vorgängig geöffnet, Beton am besten mittels Kernbohrungen. Dabei sollte ein genügend grosser Bohrdurchmesser (ca. 100 mm) gewählt werden, damit eventuell unter dem Beton vorhandene Steine einer Koffierung von Hand entfernt werden können. Befindet sich der Probenahmepunkt in einem Gebäude, so ist darauf zu achten, dass über dem Entnahmepunkt eine ausreichende freie Höhe für die Rammeinrichtung vorhanden ist (Elektrohämmer + Sonde  $\approx 2.5$  m). Nach dem Rammen wird die Hohlsonde mit der Ziehvorrichtung 10 cm bis 20 cm angehoben, damit die verlorene Spitze die Bohrung freigibt, was mit einem Kontrollstab überprüft wird. Anschliessend wird der Entnahmekopf, der mit einem Septum, einem Unterdruck-Manometer und einem Abgang mit Hahn versehen ist, auf die Hohlsonde geschraubt. Alle Teile, die mit der Porenluft in Berührung kommen, müssen aus inertem Material sein. Um ein Verschleppen von Verunreinigungen zu vermeiden, wird für jede Probenahmestelle eine saubere Hohlsonde eingesetzt.

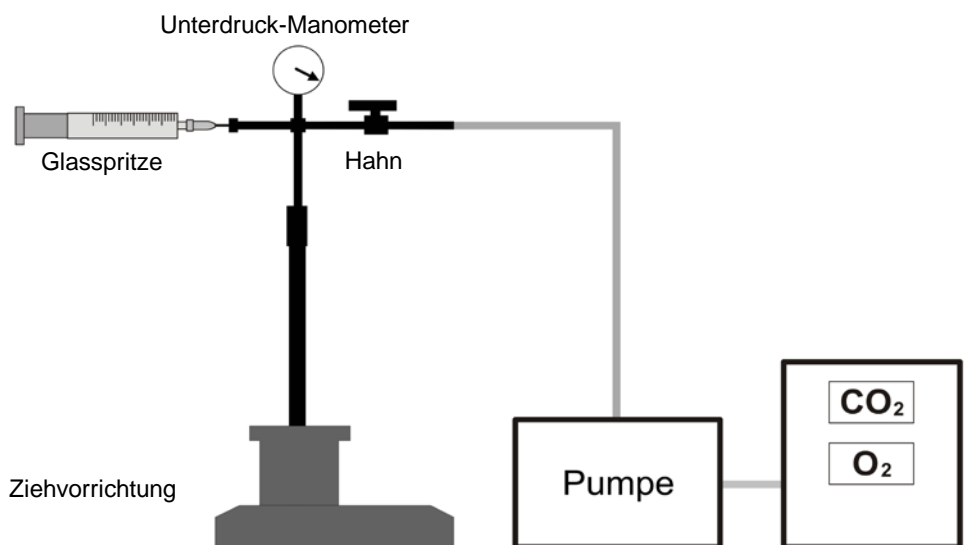
Befestigte Oberflächen

Verschleppen von Verunreinigungen

Das Unterdruck-Manometer dient der Kontrolle, ob der offene Bereich für eine Probenahme ausreichend gasdurchlässig ist. Ist dies nicht der Fall (Ton, Silt, Grundwasser o. ä.), wird die Hohlsonde angehoben, bis eine Probenahme möglich ist. Beim Abgang des Entnahmekopfs wird dann über eine Pumpe bei kleinem Volumenstrom, der zur Vermeidung von Unterdruck nicht mehr als 2 l/min betragen sollte, mit möglichst konstanter Rate ein vordefiniertes Porenluftvolumen abgepumpt. Vor der Probenahme muss das Totvolumen der Sonde mindestens dreimal ausgetauscht werden. Die Dichtigkeit der Anordnung gegenüber der Atmosphärenluft wird durch die Messung des Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalts der angesaugten Porenluft während der Probenahme überprüft (Abb. 4).

Austausch des Totvolumens der Sonde

Abb. 4 > Schematische Darstellung der Probenahmeanordnung





Beim direkten Verfahren mit Probenahme in Headspace-Gläschen wird nach dem Absaugen von 5 bis 10 l Porenluft der Hahn am Abgang zur Pumpe geschlossen. Durch das Septum am Entnahmekopf wird anschliessend mittels einer gasdichten Glasspritze eine Probe aufgezogen und in das vorgängig evakuierte Headspace-Gläschen überführt (Abb. 4 und Abb. 5). Alternativ kann ein verschlossenes Headspace-Gläschen über zwei Kanülen mit Porenluft befüllt/entlüftet werden. Vor dem Befüllen muss der Luftraum mindestens fünfmal mit Porenluft ausgetauscht werden (Abb. 6). Für jede Probe wird eine saubere Glasspritze verwendet. Kunststoffspritzen (Einwegspritzen) sind ungeeignet, da sie zu analysierende Substanzen aufnehmen können oder ihrerseits Stoffe abgeben. **Gasbeutel** werden am Ausgang der Pumpe gefüllt. **Sie eignen sich nicht für die Probenahme von FCKW, sondern nur für Deponiegas- resp. für Isotopenproben.**

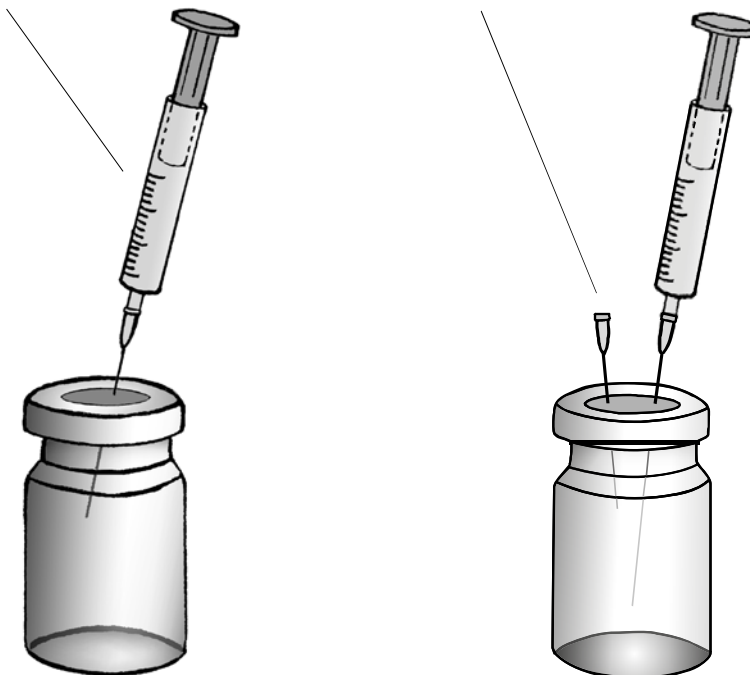
Probenahme in Headspace-Gläschen bzw. Gasbeutel

Abb. 5 > Abfüllen der Porenluftprobe in ein evakuiertes Headspace-Gläschen

Abb. 6 > Abfüllen der Porenluftprobe in Probengefäss nach vorgängigem 5-fachen Austausch des Inhalts mit Porenluft

Volumenkontrolle

weite Kanüle



Für das anreichernde Verfahren wird das Adsorptionsröhrchen zwischen dem Abgang des Entnahmekopfs und der Pumpe eingesetzt und das vorgegebene Porenluftvolumen zum Beladen des Adsorbentmaterials durchgesaugt. Dieses kann je nach Methode zwischen 0.5 l und 150 l variieren. Analog wird beim Befüllen von Gasmäusen vorgegangen. Der Schlauch, der den Entnahmekopf mit dem Adsorptionsröhrchen respektive der Gasmaus verbindet, muss aus inertem Material sein (Silikon, Teflon), d. h. er darf weder zu analysierende Substanzen aufnehmen noch abgeben.

Probenahme mit Adsorptionsröhrchen

Porenluftproben für die Headspace-Analyse müssen dunkel gelagert werden. Adsorptionsröhrchen müssen zum Vermeiden einer thermischen Desorption zusätzlich kühl aufbewahrt werden. Die Proben sind innert 24 bis maximal 48 Stunden zu analysieren.

Lagerung der Proben

Für jede Probenahme wird ein aussagekräftiges Protokoll erstellt, damit das Vorgehen und die Umgebungsbedingungen lückenlos dokumentiert und nachvollziehbar sind. In Anhang A3 sind die wesentlichen Punkte aufgelistet, die das Protokoll enthalten muss.

Probenahmeprotokoll

### 5.2.2 Probenahme mit Packer

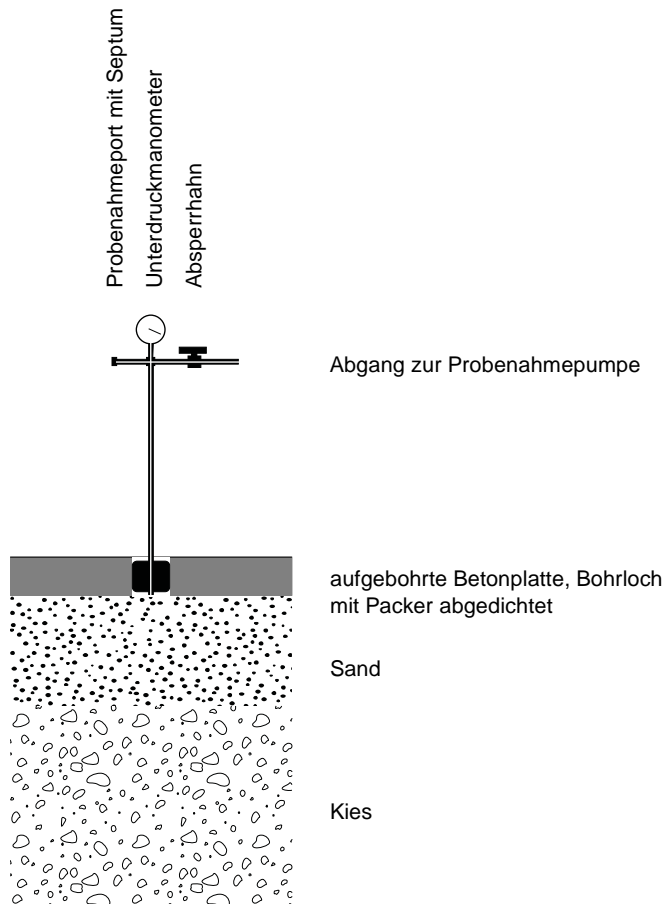
Bei der Probenahme auf Flächen, die mit Beton oder Schwarzbelag versiegelt sind, wird der Zugang für die Probenahmesonde mit einer Kernbohrung geöffnet und das Bohrloch mittels eines Packers abgedichtet (Abb. 7). Die Porenluftprobe kann durch den Packer entnommen werden. Dieses Vorgehen eignet sich vor allem für die Fälle, wo durch das Sondierloch ein Rammkern gezogen wird und deshalb keine Hohlsonde eingesetzt werden kann. Allerdings besteht in diesem Fall eine Unsicherheit hinsichtlich der genauen Herkunft der Porenluft, da der grösste Zustrom angesaugter Porenluft aus der Schicht mit der relativ höchsten Durchlässigkeit kommen wird.

Probenahme auf befestigten  
Flächen

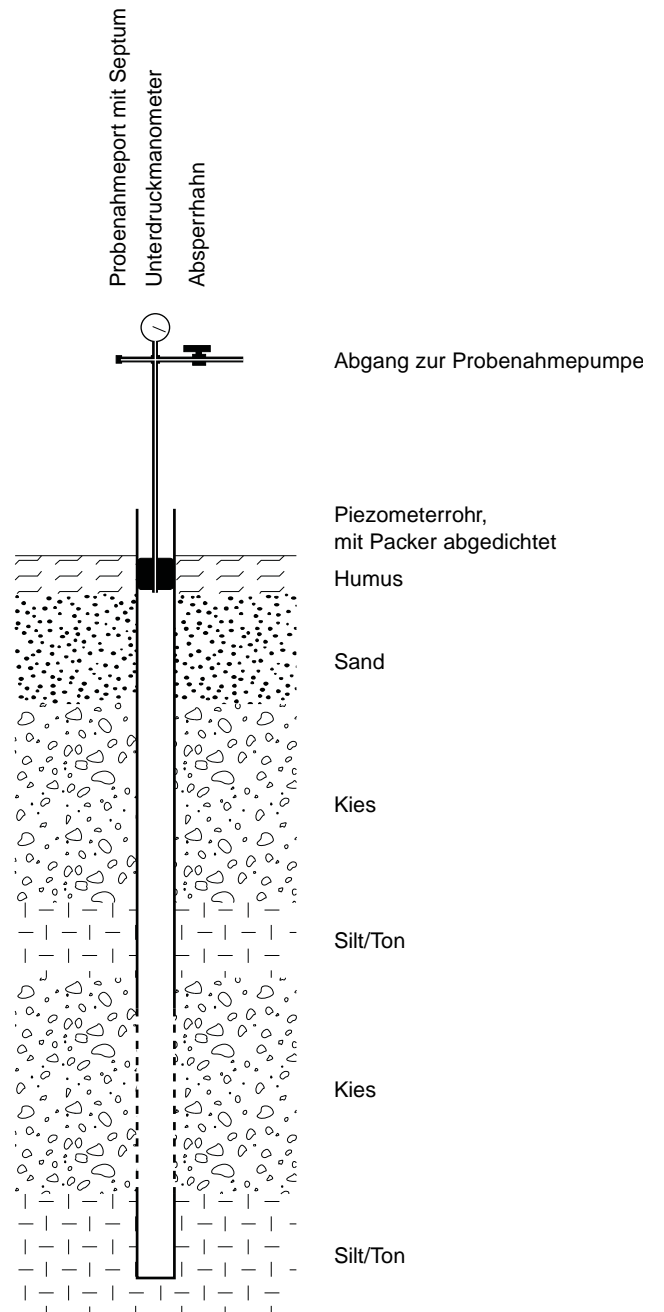
Probenahme aus Rohren

Packer können auch zur Probenahme aus perforierten Rohren von Gaspegeln oder Grundwassermessstellen eingesetzt werden (Abb. 8). In diesen Fällen ist die Kenntnis des Totvolumens wichtig, da vor der Probenahme mindestens das Zwei- bis Dreifache davon abgesaugt werden muss.

**Abb. 7 > Probenahme von Porenluft unter befestigten Oberflächen (mit Packer abgedichtet).**



**Abb. 8 > Probenahme von Porenluft aus Rohren von Gaspegeln oder Grundwassermessstellen (mit Packer abgedichtet).**



### 5.2.3 Membrane Interface Probe (MIP)

Eine seit einigen Jahren auch in der Schweiz erprobte Probenentnahme- und Analysetechnik ist die Membrane Interface Probe (MIP). Diese zu den Direct-push-Verfahren gehörende Technik ermöglicht ein Screening, dessen wichtigster Vorteil in der Erfassung raumbezogener Daten zur Verteilung von leichtflüchtigen Stoffen im Untergrund liegt.

MIP-Sondierungen

Im Unterschied zu den oben aufgeführten reinen Porenluft-Methoden erlaubt die MIP auch die Untersuchung der gesättigten Zone. Beim MIP-Verfahren wird an der Spitze eines Rammgestänges eine Sonde in den Untergrund getrieben. Durch Aufheizen der Sonde (ca. 120 °C) werden die Schadstoffe vollständig verflüchtigt und dann über eine Membran in einer mit einem Trägergas verfüllten Kapillare zur Analyseneinrichtung (PID, FID, DELCD) transportiert. Alle mit diesen Detektoren erfassbaren und Siedepunkte unter 120 °C aufweisenden Stoffe werden halbquantitativ analysiert.

Die sehr flexible Methodik liefert hochaufgelöste tiefenorientierte Schadstoffprofile. Neben Angaben zur Schadstoffverteilung werden über Leitfähigkeitsmessungen auch Informationen zum lithologischen Aufbau geliefert. Liegen genügend Sondierungen vor, kann ein dreidimensionales Bild der Schadstoffverteilung erarbeitet werden.

Im Unterschied zu den anderen aktiven Porenluftmessungen sind keine Einzelstoffe messbar, sondern nur Summen von Schadstoffgruppen (CKW, BTEX). Wie alle Rammverfahren stösst sie in sehr hartem und generell schwer rambbarem Untergrund (z. B. grobe Schotter, harte Moräne) an ihre Grenzen. Das Rammen geschieht mit einem Raupengerät. Wegen dessen Grösse ist ein Einsatz in Gebäuden, insbesondere in Kellerräumen, nur beschränkt möglich.

### 5.3 **Durch die Beprobung erfasstes Volumen**

Das Volumen, das im Untergrund um das Sondenende beprobt wird, ist abhängig vom Porenvolumen und von der Permeabilität des betroffenen Bereichs. Unter der idealisierten Annahme eines kugelförmigen Einflussbereiches mit einem homogenen, trockenen Porenraum sind in Anhang A2 für verschiedene Porenvolumina und Absaugmengen die entsprechenden Kugeldurchmesser grafisch dargestellt.

### 5.4 **Qualitätssicherung**

Erfahrungsgemäss liegen die grössten Unsicherheiten bei der Probenahme selbst. Sie stellt hohe Ansprüche an die Probenehmer und muss entsprechend fachmännisch geplant und durchgeführt werden.

Im Hinblick auf die Qualitätssicherung sind folgende Punkte wichtig, die vom Probenehmer und vom Messlabor einzuhalten und in einem Messbericht zu dokumentieren sind:

- > Der Ablauf der Probenahme sowie die eingesetzten Probenahmegeräte und die Hilfsmittel zur Bestimmung der Feldparameter sind zu beschreiben
- > Die Probenahmebehälter sind eindeutig zu beschriften
- > Es ist ein Verzeichnis aller entnommenen Proben zu erstellen
- > Probenahme, Probentransport und Probenlagerung müssen so erfolgen, dass eine Beeinflussung des Probenmaterials soweit als möglich vermieden wird.
- > Durch die Reinigung sämtlicher verwendeter Geräte oder deren Austausch zwischen der Entnahme von zwei verschiedenen Proben muss ein Verschleppen von Kontaminationen vermieden werden.

# 6 > Analytik

---

## 6.1 Allgemeines

Die Porenluftanalysen sind nach standardisierten Methoden durchzuführen (DIN<sup>[6], [7]</sup>, VDI<sup>[20]</sup>). Die Porenluftproben werden in der Regel im Labor analysiert, können aber auch mit Vor-Ort-Analytik in einem mobilen Labor am Ort der Probenahme untersucht werden. Das Analyseprotokoll muss nebst den Resultaten mit Bestimmungsgrenzen auch Angaben über die angewendeten Methoden enthalten.

Analyseprotokoll

Bestimmungsgrenze

Die Messunsicherheit für die in Anhang 2 AltIV aufgeführten Stoffe liegt für den Konzentrationsbereich der AltIV-Konzentrationswerte zwischen etwa 7 % und 15 %. Generell gilt: Je geringer der gemessene Wert, desto grösser die Messunsicherheit.

Messunsicherheit

Die Angabe für *aromatenfreies Benzin* in Anhang 2 AltIV entspricht der Summe der Kohlenwasserstoffe im Siedebereich von 80–200 °C ohne die Aromaten Benzol, Toluol, Ethylbenzol und die Xylole.

Der Wert für *Leichtbenzin (Aromaten 0–10 %)* ist gleich der Summe der Kohlenwasserstoffe und Aromaten im Siedebereich von 70–90 °C.

## 6.2 Analysemethoden

Die Analyse der leichtflüchtigen Organika in der Porenluft erfolgt in der Regel mittels Gaschromatographie. Die gesammelten organischen Komponenten werden dabei auf der Trennsäule getrennt und anschliessend mit geeigneten Detektoren quantifiziert.

Am meisten verwendet wird GC-ECD/FID, eine Kopplung der Gaschromatographischen Trennung mit einer Kombination des gruppenspezifischen ECD (Electron capture Detector) mit dem unspezifischen FID (Flammenionisationsdetektor) oder GC-MS, eine Kopplung der Gaschromatographischen Trennung mit einem molekulspezifischen MSD (Massenselektiver Detektor).

Die Konzentrationen von Methan, Kohlendioxid, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff können mit Gasmessgeräten während der Probenahme (online) bestimmt werden.

Andere Messmethoden, wie direkt anzeigende Prüfröhrchen oder die Untersuchung mit dem Photoionisations-Detektor (PID), geben Hinweise auf Verunreinigungen. Sie ermöglichen eine qualitative Ersteinschätzung der vorhandenen Kontamination, eignen sich aber nicht für quantitative Aussagen.

### 6.2.1 Analyse mittels direktem Verfahren

Dieses Verfahren ist geeignet für alle im Anhang 2 der Altlasten-Verordnung aufgeführten Stoffe ausser den Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Der Anhang A1 entspricht der Stoffliste für welche gemäss Anhang 2 AltIV Konzentrationswerte vorhanden sind.

Die analytische Bestimmung mittels Gaschromatographie erfolgt als direkte Gasmessung aus dem Headspace-Gläschen. Dabei ist die Wahl des Säulenmaterials sowie des Detektors von der Erfahrung und der Infrastruktur des jeweiligen Labors abhängig. Nachweisgrenze, Selektivität sowie die Anzahl detektierbarer Stoffe werden von der verwendeten Technik bestimmt. Die Vorteile der GC-MS liegen in der stoffspezifischen Detektion, sowie in der umfangreichen Stoff-Palette. Demgegenüber liegt der Vorteil der Kopplung GC-ECD/FID in den geringeren Geräte- und Betriebskosten.

### 6.2.2 Analyse mittels anreicherndem Verfahren

Dieses Verfahren ist geeignet für die im Anhang 2 der Altlasten-Verordnung aufgeführten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) und Quecksilber.

Die PAK-Bestimmung erfolgt nach Lösungsmittel-Desorption vom Adsorbens mittels Gaschromatographie oder Flüssigchromatographie oder nach thermischer Desorption vom Adsorbens mittels Gaschromatographie.

Die Quecksilber-Analytik erfolgt nach Flüssig-Desorption mittels Kaltdampf Atom Absorptions Spektrometrie (CV-AAS).

Zusätzlich können mit dem anreichernden Verfahren die meisten der im Anhang 2 der Altlasten-Verordnung aufgeführten Stoffe mit verbesserter Nachweisgrenze analysiert werden. Die Nachweisgrenze verbessert sich um den Faktor der Anreicherung im Adsorptionsröhrchen. Allerdings sind kaum alle Organika aus Anhang A1 gleichzeitig ab demselben Adsorptionsröhrchen mit demselben Desorptionsmittel zu bestimmen.

Der Aufwand für die Probenahme und Analytik sowie die vielen resultatbeeinflussenden Faktoren machen das anreichernde Verfahren umständlich und teuer. In der Regel werden mit dem direkten Verfahren Bestimmungsgrenzen erreicht, die den Anforderungen der Altlasten-Verordnung genügen.

## 6.4 Qualitätssicherung

Analytiklabors im Umweltbereich sollen nach der Norm SN EN ISO/IEC 17025<sup>[24]</sup> arbeiten. Eine Akkreditierung nach ISO/IEC 17025 ist für Arbeiten im Zusammenhang mit Porenluftanalysen empfohlen.

Im Hinblick auf die Qualitätssicherung sind folgende Punkte wichtig, die vom Messlabor einzuhalten und in einem Messbericht zu dokumentieren sind:

- > Die Methoden sollen in jedem Labor validiert sein.
- > Für jedes Verfahren müssen zumindest folgende Kenngrößen bekannt sein:
  - Anwendungsbereich
  - Nachweisvermögen z. B. als Bestimmungsgrenze
  - Präzision und Richtigkeit
  - Messunsicherheit
  - Spezifität, Selektivität
- > Methoden, die nicht im Geltungsbereich der Akkreditierung nach SN EN ISO/IEC 17025 aufgeführt sind, sind im Analysenbericht zu kennzeichnen.

Die Reproduzierbarkeit der Analyseresultate ist durch den Einsatz zertifizierter Standards nachzuweisen und für die eingesetzten Mess- und Prüfmittel muss eine interne Kalibrierung durchgeführt und dokumentiert werden.

# 7 > Auswertung der Resultate

---

## 7.1 Allgemeines

In den vorangehenden Kapiteln wurde bereits auf mehrere Punkte hingewiesen, welche bei der Berichterstattung über Porenluftmessungen berücksichtigt werden sollen: Beschreibung der Bebauung und des Umfelds, geologischer Aufbau des Untergrunds, Grundwasserverhältnisse. In der Regel stellt die Porenluftuntersuchung nur einen Teil einer Standortuntersuchung dar.

**Berichterstattung über  
Porenluftmessungen**

Die Interpretation der Ergebnisse geht von den vorgegebenen Fragestellungen aus. Es soll eine Aussage darüber gemacht, ob das geplante Messprogramm ausgeführt wurde und es wird empfohlen, vorgenommene Programmänderungen zu dokumentieren, zu begründen und allfällige Konsequenzen darzulegen.

Weiter soll die Repräsentativität der Messergebnisse diskutiert werden, da diese eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die zuständige Fachbehörde darstellt. Sowohl die vorliegenden Erfahrungen mit Porenluftmessungen als auch theoretische Überlegungen zeigen, dass insbesondere folgende Punkte zu beachten sind:

**Repräsentativität der Messungen**

- > Porenluftmessungen können nicht ohne weiteres unter gleichen Bedingungen wiederholt werden, wie dies bei Grundwasseruntersuchungen eher möglich ist.
- > Porenluftmessungen sind für ein vergleichsweise kleines Volumen aussagekräftig, ausgeprägte kleinräumige Variationen sind eher die Regel als die Ausnahme.
- > Porenluftkonzentrationen sind auch von externen Faktoren abhängig.
- > Porenluftkonzentrationen geben keine direkten Auskünfte über die vorhandenen Gasvolumina (wichtig bei Deponiegasen).

## 7.2 Die Porenluftkonzentration beeinflussende Faktoren

Als externe Faktoren gelten insbesondere die Witterungsverhältnisse, eine Versiegelung der Oberfläche sowie die Durchlässigkeit und Zusammensetzung des Speicheresteins (Anteil an sorbierenden Partikeln, v. a. organischer Kohlenstoff).

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt bei der Beurteilung der Messwerte von flüchtigen Stoffen, insbesondere von CKW, ist die Beeinflussung der Konzentrationen durch versickerndes Regenwasser, welches zu einer Durchfeuchtung des Untergrundes führt. Die Reproduzierbarkeit von Porenluftmessungen wird dadurch erheblich beeinträchtigt. Vor allem bei Nasswetterbedingungen entnommene Proben zeigen starke Schwankungen. In feuchten Böden kann sowohl eine Erhöhung als auch eine Erniedrigung der Konzentrationen auftreten. Die Schwankungen können durchaus einen Faktor 5 ausmachen.



Dieser Tatsache soll bei der Interpretation der Messwerte beachtet werden, insbesondere wenn zu unterschiedlichen Zeiten erhobene Werte verglichen werden.

Bei der Interpretation von Porenluftkonzentrationen hinsichtlich der Erfassung einer Belastung eines Grundwasservorkommens, insbesondere durch CKW, sollen infolge des Transfers gelöst zu Gasphase auch folgende Einschränkungen berücksichtigt werden:

- > Beim Vorhandensein von zwei oder mehreren Grundwasserstockwerken mit unterschiedlichen Belastungen des Grundwassers kann in der Porenluft nur das oberste Grundwasserstockwerk erkannt werden.
- > Schwebende Grundwasservorkommen (Stauwasser) behindern den Gasaustausch mit dem eigentlichen Grundwasserleiter, so dass eine allfällige Belastung nicht erkennbar ist.

Grundsätzlich ist die Kenntnis des lithologischen Aufbaus des mit der Porenluftentnahme erfassten Untergrundes von grosser Bedeutung. Aus diesem Grund sind begleitende oder eventuell vorgängige Sondierungen zur geologischen Beschreibung des Probenahmebereichs notwendig. Oft werden zu diesem Zweck Rammkernsondierungen oder Kleinbohrungen ausgeführt. Damit können zumindest qualitative Aussagen über die Homogenität, Körnigkeit und Porosität, Feuchtegehalt und (mit zusätzlicher Analytik) auch über den organischen Kohlenstoffgehalt gemacht werden.

Lithologischer Aufbau des Untergrunds

### 7.3 Natürliche Hintergrundbelastung durch flüchtige Stoffe

#### 7.3.1 Chlorierte Kohlenwasserstoffe

Insbesondere im Hinblick auf die Interpretation und Bewertung sehr tiefer Porenluftbelastungen durch chlorierte Kohlenwasserstoffe sind auch Kenntnisse über natürliche Hintergrundbelastungen wertvoll. Daten dazu sind spärlich. Gemäss einer Zusammenstellung aus Deutschland<sup>[14]</sup> sind folgende Grundbelastungen möglich:

Hintergrundbelastung CKW

Tab. 1 > Hintergrundbelastung CKW

Natürliche Hintergrundbelastung	Forst- und landwirtschaftlich genutzte Gebiete	Waldgebiet, hohe jährliche Niederschlagsraten	Stadtgebiete
Tetrachlorethen	<0.001–0.002 ml/m <sup>3</sup>	0.001–0.007 ml/m <sup>3</sup>	0.001–0.004 ml/m <sup>3</sup>
Trichlorethen	<0.001–0.002 ml/m <sup>3</sup>	0.001–0.006 ml/m <sup>3</sup>	0.001–0.004 ml/m <sup>3</sup>
1,1,1-Trichlorethan	<0.001–0.002 ml/m <sup>3</sup>	<0.001–0.001 ml/m <sup>3</sup>	<0.001 ml/m <sup>3</sup>

Aus den Angaben ist ersichtlich, dass die maximal zu erwartenden natürlichen Grundbelastungen sehr gering und nahe der Bestimmungsgrenze sind und somit nicht zu Fehlbeurteilungen von belasteten Standorten führen können. Die Werte zeigen aber, dass das Vorkommen von sehr geringen CKW-Gehalten in der Porenluft nicht notwendigerweise auf einen Einsatz dieser Stoffe am Standort hinweist.

### 7.3.2 Kohlendioxid, Methan und Schwefelwasserstoff

Die Porenluft enthält variable Anteile an **Kohlendioxid**, wobei die Schwankungen auf die unterschiedliche Durchlüftung, aber auch auf den Feuchtegehalt (bei trockenen Verhältnissen wird weniger biogenes Kohlendioxid produziert) sowie weitere ortsspezifische Eigenheiten (Temperatur, Kalk-Wasser-Luft-Gleichgewichtsbedingungen, geogenes Kohlendioxid) zurückzuführen sind. Hinzu kommen jahreszeitliche Schwankungen. In einem gut durchlüfteten Untergrund sind Kohlendioxid-Gehalte bis 2 % keine Seltenheit, in einem schlecht durchlüfteten sind deutlich höhere Werte möglich.

Der Kohlendioxid-Konzentrationswert gemäss Anhang 2 AltIV beträgt 0.5 %. Solche Konzentrationen können durchaus natürlichen Ursprungs sein. Bei der Beurteilung erhöhter Kohlendioxid-Konzentrationen in der erfassten Porenluft ist deshalb den örtlichen Gegebenheiten auf jeden Fall Rechnung zu tragen, z. B. durch Hintergrundmessungen ausserhalb des durch die Ablagerungen beeinflussten Bereichs.

In Bereichen mit hohen Anteilen natürlicher abbaufähiger organischer Stoffe kann unter anaeroben Umgebungsbedingungen Methan durch bakteriellen Abbau gebildet werden. Ebenso kann unter stark anoxischen Verhältnissen auch Schwefelwasserstoff eine natürliche Belastung des Untergrunds erzeugen.

Diese Gegebenheiten müssen bei der Beurteilung von geringen Konzentrationen dieser Gase in der Porenluft berücksichtigt werden, wenn eine Einstufung als belasteter Standort sich auch auf Porenluftmessungen abstützt.

### 7.4 Altlastrechtliche Beurteilung

Die Beurteilungsgrundlage für quantitativ gemessene Porenluftbelastungen ist Anhang 2 AltIV. Die dort aufgeführten Konzentrationswerte entsprechen den maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK) der Suva (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt), welche in [17] die maximal zulässige Schadstoffkonzentration gesundheitsgefährdender Stoffe am Arbeitsplatz regelt. Daraus ergibt sich bereits klar, dass ein Sanierungsbedarf **nicht** schon besteht, wenn in der Porenluft ein Konzentrationswert überschritten ist, sondern erst wenn **zusätzlich** die derart belastete Porenluft an Orte gelangt, «wo sich Personen **regelmässig während längerer Zeit** aufhalten können» (Art. 11 AltIV).

Sanierungsbedarf an Orten,  
wo sich Personen regelmässig  
während längerer Zeit aufhalten

### 7.5 Rechnerische Abschätzung des Schadstoffgehalts im Sickerwasser und des Gesamtschadstoffgehalts aus den Gaskonzentrationen in der Porenluft

Gemäss Anhang 1 Abs. 4 AltIV wird die Sickerwasserkonzentration aufgrund von Messungen der Porenluftkonzentrationen berechnet, wenn keine Sickerwasserproben entnommen werden können. Wesentlich an dieser Aussage ist, dass sie explizit Bezug auf Sickerwasser nimmt und somit die nachfolgend beschriebene Methode nicht zur Berechnung der Grundwasserbelastung durch flüchtige Organika aufgrund der Porenluftbelastung geeignet ist. Eine Anwendung sollte deshalb nur nach eingehender Prü-

fung und Berücksichtigung der am Standort vorliegenden physiko-chemischen und hydrogeologischen Gegebenheiten vorgenommen werden.

Die Erfassung flüchtiger organischer Schadstoffe im wasserungesättigten Untergrund beruht auf der Tatsache, dass diese Stoffe dort in unterschiedlichen Anteilen

- > sorbiert an Feststoffen und
- > gelöst im Porenwasser und
- > gasförmig in der Porenluft

vorkommen. Steht hinreichend Zeit zur Verfügung wird sich gemäss den Gesetzen der Thermodynamik zwischen den Gehalten des Stoffes in den drei Phasen Boden, Wasser und Luft ein Gleichgewicht einstellen. Die dafür notwendige Zeit hängt von den Diffusionsstrecken und -geschwindigkeiten ab. Da bezüglich Diffusionsstrecken bei einem Wasserfilm auf den Kornoberflächen (=Sickerwasser) kurze Strecken vorliegen und in der Porenluft hohe Diffusionsgeschwindigkeiten herrschen, stellt sich zwischen Sickerwasser und Porenluft das Gleichgewicht recht schnell ein, vor allem wenn die Sickerstrecken und damit die Verweilzeiten in der ungesättigten Zone des Untergrunds lang sind.

Aufgrund der Gesetzmässigkeiten der Gleichgewichts-Phasenverteilung kann die Konzentration des betreffenden Stoffes im Sickerwasser und im Kapillarraum des Grundwassers aus der Konzentration in der Gasphase rechnerisch ermittelt werden. Grundlage dafür ist die substanzspezifische Henry-Konstante H, welche die Stoff-Verteilung zwischen Luft und Wasser wiedergibt<sup>[4]</sup>:

Gleichgewichts-Phasenverteilung

Henry-Konstante

$$H = \frac{\text{Gleichgewichtskonzentration in der Luftphase [mol/l]}}{\text{Gleichgewichtskonzentration in der Wasserphase [mol/l]}} \quad [-]$$

Für beschränkt wasserlösliche Stoffe (Wasserlöslichkeit <10 000 mg/l) gilt weiter:

$$H = \frac{\text{Dampfdruck [Pa]}}{\text{Wasserlöslichkeit [mol/m}^3\text{]}} \times \frac{1}{RT} \quad [-]$$

*H: Henry-Konstante*

*R: universelle Gaskonstante [J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup>]*

*T: absolute Temperatur [K]*

Die Henry-Konstante ist temperaturabhängig und es sollte eine entsprechende Korrektur des eingesetzten H-Wertes vorgenommen werden. Annäherungsweise können die in Anhang A1 gegebenen Werte für 10 °C verwendet werden. Dieses Vorgehen entspricht dem rechnerischen Verfahren gemäss Anhang 1 Abs. 4 AltIV für den Fall, dass keine Sickerwasserproben als Eluatäquivalent entnommen werden können.

Liegt zwischen den drei Phasen ein Gleichgewichtszustand vor, kann aufgrund der thermodynamischen Gleichgewichtsbeziehungen mit der gesetzmässigen Verteilung des Stoffes zwischen den Phasen auch die Gesamtkonzentration des betreffenden Schadstoffes berechnet werden.

Die an sich korrekte Methode hat aber in der Praxis gewichtige Nachteile, die vor allem darin bestehen, dass

- > häufig ein Gleichgewichtszustand nicht oder nur sehr lokal vorliegt und
- > für eine belastbare Schätzung weitere Parameter bekannt sein müssen, nämlich: Porosität, Anteil organischer Substanz, Wasseranteil, Sorptionsmass für organische Substanzen an der Bodenmatrix.

Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, stellt die Methode im besten Fall eine grobe Schätzung dar. Sie erlaubt zumindest, unter der Annahme von konservativ geschätzten Parametern, eine maximale Schadstoffkonzentration zu berechnen. Aber auch hier sind die Ergebnisse kritisch zu beurteilen, da diese in der Regel kaum repräsentativ für einen Standort gelten können. Im besten Fall ist nur ein lokales Gleichgewicht vorhanden.

Eine altlastrechtliche Beurteilung darf nicht allein gestützt auf eine solche rechnerische Abschätzung erfolgen.

7.6

## Qualitätssicherung

Grundsätzlich sollen die Resultate der Porenluftmessungen und die darauf basierenden Interpretationen transparent und nachvollziehbar dargelegt werden. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, sollen folgende Angaben vorliegen:

- > *Nachvollziehbarkeit des Messkonzepts*: Da das Pflichtenheft der Behörde zur Stellungnahme vorgelegt wird, sollte die Nachvollziehbarkeit des Messkonzepts bereits in diesem Verfahrensschritt bzw. in der Untersuchungsplanung für eine Detailuntersuchung dargelegt werden;
- > *Eindeutige Angabe der Messpunkte*: Lage des Messpunkts, Entnahmetiefen bzw. Entnahmebereiche der Gasproben;
- > Beobachtete oder vermutete Boden- und Untergrundverhältnisse, beobachtete oder vermutete Lage des Grundwasserspiegels;
- > *Dokumentation der Probenahme*: Messbericht bzw. der Ergebnismitteilung des Messlabors gemäss Anhang A3;
- > Angaben zur Reproduzierbarkeit der Resultate, Interpolations- und Extrapolationsmöglichkeiten mit entsprechenden Unsicherheiten;
- > Grafische Darstellung der Ergebnisse, u.a. mit Kartendarstellung der räumlichen Konzentrationsverteilung der gemessenen Substanzen;
- > Begründung von allfälligen Abweichungen vom vorgesehenen Messprogramm;
- > *Bei Deponiegasen*: Gefährdungsabschätzung für Menschen mit Empfehlung für allenfalls notwendige Massnahmen.

# > Anhang

## A1 Physikalisch-chemische Eigenschaften von flüchtigen altlastenrelevanten Stoffen

Tab. 2 > Physikalisch-chemische Eigenschaften von flüchtigen altlastenrelevanten Stoffen

Stoff	Summenformel	Molmasse g/mol	Siedepunkt °C	Verteilungs-Koeffizient org. Kohlenstoff/Wasser $K_{oc}$ (l/kg)	Henry-Konstante <sup>a</sup> $K_H$ (10 °C)	Verteilungskoeffizient n-Oct./ Wasser $\log f_{ow}$	Dampfdruck Pa (25°C)	Löslichkeit g/l (25°C)
<b>Anorganika</b>								
Quecksilber	Hg	200.59	356.58				160 <sup>a</sup>	0.00006 <sup>a</sup>
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	44	-78.5					
Schwefelwasserstoff	H <sub>2</sub> S	34.08	-60.7					
<b>Organika</b>								
Benzin (aromatenfrei)								
Leichtbenzin (Aromaten 0–10 Vol%)								
Methan	CH <sub>4</sub>	16.04	-164					
<b>Monozyklische aromatische KW</b>								
Benzol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.12	80.1	92	0.115	2.1	10 200 <sup>a</sup>	1.77 <sup>a</sup>
Ethylbenzol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.17	136		0.135		933–1 990 <sup>a</sup>	0.866 <sup>a</sup>
Toluol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.15	111	250	0.124	2.4	2 910 <sup>a</sup>	0.5 <sup>a</sup>
m-Xylol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.17	139.1	166	0.125		800 <sup>a</sup>	0.16 <sup>a</sup>
o-Xylol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.17	144.4	48–68	0.087		667 <sup>a</sup>	0.19 <sup>a</sup>
p-Xylol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.17	138.7	204	0.130		880 <sup>a</sup>	0.18 <sup>a</sup>
<b>Leichtflüchtige halogenierte KW</b>								
Chlorbenzol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	112.56	132	77	0.065		1 310 <sup>a</sup>	0.46 <sup>a</sup>
1,1-Dichlorethan	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	98.96	57	38	0.123		30 900	5.06 <sup>a</sup>
1,2-Dichlorethan (EDC)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	98.96	83	31	0.019		11 200	8.65 <sup>a</sup>
1,1-Dichlorethen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	96.94		47	0.634		79 400	2.49
cis-1,2-Dichlorethen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	96.94	60	38	0.087		28 100	5.09
trans-1,2-Dichlorethen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	96.94	60	48	0.212		40 700	6.26
Dichlormethan (DCM)	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	84.93	40	17	0.05	1.25	57 500	16.9
1,2-Dichlorpropan	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>2</sub>	112.99	96	92	0.055	2.28	6 900	2.8
1,1,2,2-Tetrachlorethan	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	167.86	146	225	0.0056	2.72	794	3.27
Tetrachlorethen (PER)	C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	165.83	121	374	0.331	2.76	2 500	0.141
Tetrachlormethan	CCl <sub>4</sub>	153.82	76.7	238	0.642		14 500	0.826
1,1,1-Trichlorethan	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	133.42	74	119	0.362		16 600	1.3
Trichlorethen (TRI)	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	131.39	87	185	0.204	3.07	10 800	1.09

Stoff	Summenformel	Molmasse g/mol	Siedepunkt °C	Verteilungs-Koeffizient org. Kohlenstoff/Wasser $K_{oc}$ (l/kg)	Henry-Konstante <sup>a</sup> $K_H$ (10 °C)	Verteilungskoeffizient n-Oct./ Wasser $\log f_{ow}$	Dampfdruck Pa (25°C)	Löslichkeit g/l (25°C)
Trichlormethan	CHCl <sub>3</sub>	119.38	61.7	71	0.0794	1.97	25 100	8.45
Vinylchlorid	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	62.50	-13.37	5	0.750		400 000	2.8

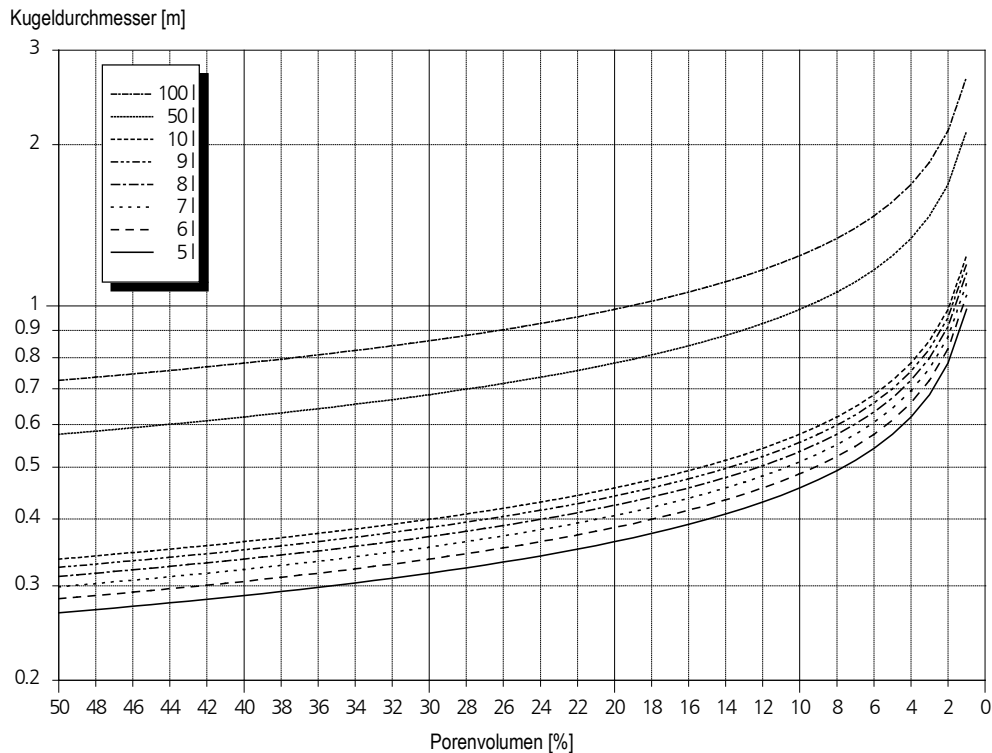
**Polyzyklische aromatische KW**

Benzo(a)pyren	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.3	496	4 500 000		6.6–6.78	0.7*10 <sup>-6</sup> <sup>a</sup>	4.5µg/l <sup>a</sup>
Naphthalin	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128.19	218	790		3.37	7.2 <sup>a</sup>	0.025 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> aus<sup>[23]</sup>

## A2 Durch Beprobung erfasstes Volumen

Abb. 9 > Kugeldurchmesser in Abhängigkeit vom Poren- und Absaugvolumen



SJ GeoTec AG, 2010

Die getroffene Annahme, dass die Geometrie des Volumens für die Berechnung der Kurven kugelförmig ist, ist nicht realitätsnah, da der Untergrund nur in den seltensten Fällen homogen ist. Die Geometrie des Absaugvolumens ist in der Realität wohl sehr unregelmässiger und kaum prognostizierbar.

Unter natürlichen Bedingungen ist deshalb vielmehr davon auszugehen, dass sowohl die Porosität als auch die Permeabilität im Bereich des Sondenendes kleinräumig variieren. Zudem ist der Porenwassergehalt im ungesättigten Bereich, der die Permeabilität beeinflusst, in der Regel nicht bekannt. Ebenso ist davon auszugehen, dass die Porenluft sich analog zum Grundwasser entlang von präferenziellen Fließwegen bewegt. Diese Gegebenheiten führen dazu, dass das von der Probenahme betroffene Materialvolumen kaum je mit hinreichender Sicherheit quantifiziert werden kann. Immerhin liefert das Diagramm Hinweise auf die zu erwartende Grössenordnung des Einflussbereichs, welche für die Interpretation der Ergebnisse genutzt werden können.

**A3 Dokumentation der Probenahme**

**Tab. 3 > Dokumentation der Probenahme**

<b>Zuordnung der Probe</b>	Projekt	
	genaue Bezeichnung der Probe (gemäss Lageplan)	
	Datum und Uhrzeit der Probenahme	
	Gelände	<ul style="list-style-type: none"> <li>• un bebaut</li> <li>• bebaut</li> <li>• Kulturland</li> <li>• Wald</li> <li>• Versiegelung</li> </ul>
	Kontamination	<ul style="list-style-type: none"> <li>• direkt</li> <li>• indirekt</li> </ul>
<b>Meteorologische Bedingungen während der Probenahme</b>	Lufttemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aussen/innen</li> </ul>
	Luftdruck	
	Wetter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• trocken</li> <li>• nass</li> </ul>
<b>Angewendete Technik</b>	Vorbohrung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schwarzbelag</li> <li>• Beton</li> <li>• Kernbohrung</li> <li>• Spiralbohrung</li> <li>• Tiefe</li> </ul>
	Porenluftsonde	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohlsonde</li> <li>• Packer</li> </ul>
	Rammtiefe	
	Absaugtiefe	
	Pumprate	
	abgesaugtes Gesamtvolumen	
	allfälliger Unterdruck während Probenahme	
	Kohlendioxid-Konzentration während der Probenahme	
	Sauerstoff-Gehalt während der Probenahme	
<b>Bemerkungen zum Untergrund</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• an der Sonde mitgeschlepptes Material</li> <li>• undurchlässige Schicht</li> <li>• Blöcke</li> <li>• Wasser u. ä.</li> <li>• Geruch der geförderterten Porenluft usw.</li> </ul>	



## A4 Methodenvergleich

Tab. 4 > Methodenvergleich I

	Direkte Verfahren			Anreichernde Verfahren	
	Headspace-Gläschen	Gasmaus/Gasbeutel	Membrane Interface Probe	thermische Desorption	Elution mit Lösungsmitteln
<b>Vorgehen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gasprobe wird mittels einer gasdichten Glasspritze aus einer Messsonde entnommen.</li> <li>direkte Injektion in die evakuierten Headspace-Gläschen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gasprobe wird aus der Messsonde durch direkte Kopplung der Pumpe mit dem Gasbeutel/Gasmaus abgesaugt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gasproben werden von der aufgeheizten SONDENSPIITZE über eine Membrane mittels Trägergas, das in einer Kapillare zirkuliert, zur Messeinrichtung an der Oberfläche transportiert.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Durchsaugen von Porenluft durch ein Röhrchen, das oberhalb der Geländeoberkante oder an der Sondenspitze angebracht ist.</li> <li>Das Absaugvolumen richtet sich nach den Angaben des Labors/Herstellers.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Durchsaugen von Porenluft durch ein Röhrchen, das oberhalb der Geländeoberkante oder an der Sondenspitze angebracht ist.</li> <li>Das Absaugvolumen richtet sich nach den Angaben des Labors/Herstellers.</li> </ul>
<b>Aufwand</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Überführung der Gasprobe aus dem Headspace-Gläschen in den GC.</li> <li>Kalibrierung mit im Labor hergestellten Gasstandards.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entnahme der Porenluftprobe aus dem Gasbeutel / Gasmaus mittels einer Gasspritze.</li> <li>Kalibrierung mit im Labor hergestellten Gasstandards.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Elution des beladenen Adsorbens mit Hilfe thermischer Desorption.</li> <li>direkte Eingabe in den GC.</li> <li>Kalibrierung mit im Labor hergestellten Standardlösungen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elution des beladenen Adsorbens mit Lösungsmitteln.</li> <li>Flüssiginjektion in den GC.</li> <li>Kalibrierung mit im Labor hergestellten Standardlösungen.</li> </ul>
<b>Fehlerquellen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Undichtigkeit des Septums.</li> <li>Ausbluten aus Septum</li> <li>Verluste durch Adsorption und Diffusion am/im Septum.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Undichtigkeit des Gasbeutels/Verschlusses.</li> <li>Verluste durch Adsorption und Diffusion am/aus dem Gasbeutel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verschleppung von Kontaminationen nach unten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ungeeignetes Adsorbens</li> <li>Adsorptions-/Desorptions-Gleichgewicht</li> <li>Feuchtigkeit beeinflusst Eigenschaften</li> <li>Durchbruch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ungeeignetes Adsorbens</li> <li>Adsorptions-/Desorptions-Gleichgewicht</li> <li>Feuchtigkeit beeinflusst Eigenschaften</li> <li>Durchbruch</li> </ul>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>automatisierbar</li> <li>preisgünstig</li> <li>Einzelstoffanalytik</li> <li>in Gebäuden einsetzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>dank grösserer Probenmenge mehrere Analysen möglich</li> <li>Einzelstoffanalytik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ermöglicht Tiefenprofile von Schadstoffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messung automatisierbar, niedrige Nachweisgrenzen durch Anreicherung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messung automatisierbar, Mehrfachmessungen möglich, niedrige Nachweisgrenzen durch Anreicherung.</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herstellung der Gasstandards, Veränderung der Gaszusammensetzung durch Adsorption und Kondensation, kurze Lagerzeiten, Zutritt von Umgebungsluft</li> <li>Tiefenprofile nur beschränkt möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herstellung der Gasstandards, Veränderung der Gaszusammensetzung durch Adsorption und Kondensation möglich, kurze Lagerzeiten; nicht automatisierbar</li> <li>für die Analytik von CKW nicht geeignet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>liefert nur Summenparameter von Stoffgruppen</li> <li>in Gebäuden (ausser Hallen) nicht möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nur eine Messung möglich</li> <li>unvollständige Desorption, Konzentrationen können zu hoch sein.</li> <li>Gerätekosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ad- und Desorption einzelner Verbindungen evtl. nicht vollständig.</li> <li>Lösungsmittelpeak im GC</li> </ul>

**Tab. 5 > Methodenvergleich II**

	<b>Stahlsonden</b>	<b>Packer in Verbindung mit Kernbohrung (Rammkern)</b>	
<b>Sondierung</b> (Abb. 3)	Stahlhohlsonden werden mit einem Elektrohammer in den Untergrund gerammt. Teilstücke müssen luftdicht verbunden sein. Entnahmetiefe mindestens 1 Meter.	Bei versiegelter Fläche kann Porenluft über einen Packer angesaugt werden. Insbesondere dann, wenn vorgängig ein Rammkern gezogen wurde.	
<b>Ansaugen</b> (Abb. 4)	Porenluft wird mit einem Volumenstrom von max. 4 l/min angesaugt. Vor der Beprobung muss mindestens zwei bis dreimal das Totvolumen der Sonde oder dem Rammkern-Loch ausgetauscht werden. Die Dichtheit gegenüber der Atmosphäre wird durch Messung von Sauerstoff- und Kohlendioxid-Gehalt überprüft.		
	<b>direkte Verfahren</b>		<b>anreichernde Verfahren</b>
<b>Beprobung</b>	Head-Space-Gläschen geeignet für leichtflüchtige Organika	Gasmaus/Gasbeutel geeignet für Deponiegase	Adsorptionsröhrchen geeignet für leichtflüchtige Organika
	Mit gasdichter Glasspritze Porenluft aus dem Ansaugstrom entnehmen  und in evakuierte Probengläschen überführen (Volumenkontrolle) (Abb. 5)	Gassammelgefäße auf der Ansaugseite vor der Pumpe füllen  oder im Spülverfahren mit einer zweiten Kanüle, • den Inhalt eines verschlossenen Probengläschens über eine zweite Kanüle fünfmal mit Porenluft austauschen oder • mit einer Pumpe bei geringem Volumenstrom während einiger Zeit durch das verschlossene Probengläschen saugen	Röhrchen auf der Ansaugseite vor der Pumpe einsetzen und das vorgegebene Porenluftvolumen durchsaugen.
<b>Lagerung, Transport</b>	Proben müssen dunkel aufbewahrt werden.		Proberöhrchen müssen dunkel und kühl aufbewahrt werden.
<b>Bemerkung</b>	Proben müssen innerhalb von 24 bis maximal 48 Stunden analysiert werden.		
	<b>Analytik</b>		
<b>Methode</b>	Gaschromatographie; Detektoren: z. B. Flammenionisationsdetektor (FID), Elektroneneinfangdetektor (ECD), Massenspektrometer (MS) oder Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD)		

## > Literatur

- [1] Bayrisches Landesamt für Umwelt 2010: Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Gewässer. Merkblatt Nr. 3.8/4, Stand: 15. Februar 2010
- [2] Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg 2001: Entnahme von Bodenluftproben. Merkblatt Nr. 9 Juli 2001.
- [3] Bundesamt für Umwelt BAFU 2011: Analysemethoden im Abfall- und Altlastenbereich (Stand 2013). Vollzug Umwelt, Altlasten/ Abfall, 1334, 80 S.
- [4] ChloroNet 2009: Leitfaden Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW). Stoffeigenschaften. September 2009.
- [5] ChloroNet 2011: Untersuchung von CKW-Belastungen. Praxis-hilfe. Version November 2013.
- [6] DIN 38407 Teil 5: Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F). Nov 1991. Bestimmung von leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen LHKW durch gaschromatographische Dampf-raum-analyse (F5).
- [7] DIN 38407 Teil 9: Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F). Mai 1991. Bestimmung von Benzol und einigen Derivaten mittels Gaschromatographie (F9).
- [8] DIN ISO 10381-7: Bodenbeschaffenheit – Probenahme. Okt 2007. Teil 7: Anleitung zur Entnahme von Bodenluftproben (ISO 10381-7: 2005).
- [9] Grathwohl P. 1989: Verteilung unpolarer Verbindungen in der wasserungesättigten Bodenzone am Beispiel leichtflüchtiger aliphatischer Chlorkohlenwasserstoffe (Modelversuche). Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten Reihe C Nr. 1, 1989.
- [10] Grathwohl P. 1998: Bodengasanomalien zur Schadenherderkennung. Eberhard-Karls-Universität Tübingen Altlastenforum Fortbildung Karlsruhe, November 1998.
- [11] Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V. ITVA 2002: Richtlinie Bodenluftabsaugversuch, Stand März 2002, Richtlinie H1–1/02. Berlin 2002, 28 S. und Anhang.
- [12] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU 1985: Leitfaden für die Beurteilung und Behandlung von Grundwasser- verunreinigungen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe. Stuttgart, 1985.
- [13] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU 2002: MTBE (Methyl-tertiär-butylether) als Kraftstoffzusatz – Fachgespräch am 21.2.2002 in Karlsruhe, Tagungsband Umweltbelastung durch die Nutzung von MTBE.
- [14] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU 2006: Handlungsempfehlung Entnahme von Bodenluftproben. März 2006.
- [15] Reisinger C., Grathwohl P. 1996: Formulierung einer Verfahrensempfehlung zur Bestimmung der Emission leichtflüchtiger organischer Schadstoffe (LCKW, BTEX etc.) aus kontaminierten Böden (Berechnungsverfahren und Methoden); Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU. Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geologisches Institut, Lehrstuhl für angewandte Geologie.
- [16] Schwille F. 1984: Leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe in porösen und klüftigen Medien, Modelversuche. Bundesamt für Gewässerkunde, Koblenz, 1984.
- [17] Suva 2013: Grenzwerte am Arbeitsplatz 2013. Richtlinie 1903.d, Suva-Publikation 1903.d, [www.suva.ch/waswo/1903](http://www.suva.ch/waswo/1903).
- [18] Suva 2013: Explosionsschutz – Grundsätze, Mindestvorschriften, Zonen. Merkblatt 2153.d, überarbeitete Ausgabe Mai 2013, [www.suva.ch/waswo/2153](http://www.suva.ch/waswo/2153).
- [19] VDI 3865 Blatt 2: Messen organischer Bodenverunreinigungen Jan 1998. Techniken für die aktive Entnahme von Bodenluftproben.
- [20] VDI 3865 Blatt 4: Messen organischer Bodenverunreinigungen. Dez 2000. Bestimmung von niedrigsiedenden organischen Verbindungen in Bodenluft durch Direktmessung.
- [21] Bundesamt für Umwelt BAFU 2013: Emissionsmessung bei stationären Anlagen (Stand 2013). Umwelt Vollzug Nr. 1320, 155 S.
- [22] Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) vom 26. August 1998 (Stand 1. August 2012).
- [23] EPA United States Environmental Protection Agency. EPA On-line Tools for Site Assessment Calculation: [www.epa.gov/athens/learn2model/part-two/onsite/esthenry.html](http://www.epa.gov/athens/learn2model/part-two/onsite/esthenry.html)
- [24] SN EN ISO/IEC 17025, Ausgabe: 2005–07; Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025: 2005).
- [25] VDI 3865 Blatt 1: Messen organischer Bodenverunreinigungen. Okt. 1992. Messplanung für die Untersuchung der Bodenluft auf leichtflüchtige organische Verbindungen.
- [26] Lewitz H. 2004: Bodenluftbeprobung: Ausbreitungsmechanismen gasförmiger Stoffe im Boden. Fachzeitschrift wlb Wasser, Luft und Boden Nr.3/4.
- [27] Hers I., Li L., Hannam S. 2004: Evaluation of Soil Gas Sampling and Analysis Techniques At a Former Petrochemical Plant Site. Environmental Technology, 25:7.

[28] United States Environmental Protection Agency EPA 2006: Comparison of Geoprobe® PRT and AMS GVP Soil-Gas Sampling Systems with Dedicated Vapor Probes in Sandy Soils at the Raymark Superfund Site. November 2006.

# > Verzeichnisse

## Abbildungen

<b>Abb. 1</b> Probenahmeraster auf Deponien	15
<b>Abb. 2</b> Probenahmestrategie bei Betriebsstandorten	17
<b>Abb. 3</b> Rammsondierungen zur Entnahme von Porenluftproben	21
<b>Abb. 4</b> Schematische Darstellung der Probenahmeanordnung	22
<b>Abb. 5</b> Abfüllen der Porenluftprobe in ein evakuiertes Headspace-Gläschen	23
<b>Abb. 6</b> Abfüllen der Porenluftprobe in Probengefäß nach vorgängigem 5-fachen Austausch des Inhalts mit Porenluft	23
<b>Abb. 7</b> Probenahme von Porenluft unter befestigten Oberflächen (mit Packer abgedichtet).	25
<b>Abb. 8</b> Probenahme von Porenluft aus Rohren von Gaspegeln oder Grundwassermessstellen (mit Packer abgedichtet).	25
<b>Abb. 9</b> Kugeldurchmesser in Abhängigkeit vom Poren- und Absaugvolumen	37

## Tabellen

<b>Tab. 1</b> Hintergrundbelastung CKW	31
<b>Tab. 2</b> Physikalisch-chemische Eigenschaften von flüchtigen altlastenrelevanten Stoffen	35
<b>Tab. 3</b> Dokumentation der Probenahme	38
<b>Tab. 4</b> Methodenvergleich I	39
<b>Tab. 5</b> Methodenvergleich II	40