

Sächsisches Landesamt
für Umwelt und Geologie

Branchenbezogene Merkblätter
zur Altlastenbehandlung

Stand: 09/96 (aktualisiert 07/03)
Bearbeiter: B. Groh,
Dipl.-Ing. A. Sohr

Referat Altlasten

2: Gaswerke/Kokereien

Seiten: 13

1 Branchentypisches Schadstoffpotential

1.1 Gesetzliche Grundlagen

In der DDR wurden Anlagen zur Gaserzeugung bzw. Kokereien nach gesetzlichen Richtlinien gebaut und betrieben. Es gab neben den allgemeinen Anforderungen an den Umweltschutz, die im Landeskulturgesetz (LKG) vom 14.05.1970 und seinen Durchführungsverordnungen als Rahmengesetz zusammengefaßt waren, folgende spezifische TGL-Vorschriften:

- TGL 190-379/01-10 Gaswirtschaftliche Begriffe
- TGL 190-448 Vertikalkammeröfen
- TGL 190-449/01 Horizontalkammeröfen
- TGL 190-450/02 Zentralgasgeneratoren
- TGL 190-377 Untersuchungen bei der Stadtgaserzeugung, Häufigkeit
- TGL 190-377/01 Stadtgas aus Steinkohle
- TGL 190-377/03 Stadtgas aus Braunkohle
- TGL 466 Gaserzeugungsanlagen, Gasaufbereitungsanlagen
- TGL 466/02 Trockenentschwefelungsanlagen; Betrieb, Wartung, Instandhaltung
- TGL 466/03 Gasentschwefelungsmassen
- TGL 4725 Steinkohlen-Rohteer, technische Bedeutung
- TGL 190-351 Gasbehälter
- TGL 36596/04 Nutzung und Schutz der Gewässer, Abwasserbodenbehandlung
Abwässer aus kohleveredelnden Betrieben

In den 70er Jahren wurden die meisten Stadtgaswerke geschlossen. Mit der umfassenden Umstellung auf Erdgas, die 1992 abgeschlossen war, stellten die letzten Anlagen ihre Produktion ein. Für die Sanierung von Gaswerks- und Kokereistandorten existieren folgende Empfehlungen:

- Technische Mitteilung DVGW-Merkblatt G 266/I Sanierung ehemaliger Gaswerksgebiete;
Erkundung und Bewertung
- Technische Mitteilung DVGW-Merkblatt G 266/II Sanierung ehemaliger Gaswerksgebiete;
Durchführung der Sanierung

1.2 Einteilung

Die Gasversorgung in Sachsen wurde durch Entgasung und Vergasung von Kohle sichergestellt.

Bei der Entgasung entstanden durch Erhitzen der Kohle unter Luftabschluß feste (Koks), flüssige (Teer, Wasser) und gasförmige Stoffe (brennbare Gase). In der **Kokerei** stand die Produktion des Koks im Vordergrund. Das entstehende Gas wurde zum Teil zum Beheizen der Koksöfen verwendet, zum Teil in das Stadtgasnetz eingespeist. Dagegen war der Verfahrensablauf im **Gaswerk** auf die Produktion von Gas ausgerichtet.

Die Technologie in Kokereien und Gaswerken näherte sich im Laufe der Zeit an. Unterschiede bestanden vor allem in der Konstruktion der Öfen. Als Rohstoff diente hauptsächlich Steinkohle.

Bei der Vergasung entstanden durch Erhitzen von Kohle oder Koks unter Luftzuschuß brennbare Gase. Das erzeugte Gas diente als Heizgas oder Zumischkomponente für das Stadtgas. Neben dem Gas fielen Asche und ein Teer-Staub-Gemisch an. Braunkohlenbriketts waren der wichtigste Vergasungsstoff für **Generatorgasanlagen**. Derartige Anlagen wurden in der metallurgischen und keramischen Industrie sowie in Gaswerken betrieben.

1.3 Technologie

1.3.1 Gaswerke/Kokereien

Die Steinkohle wurde vom **Kohlelager** in indirekt beheizte **Koksöfen** gebracht und bei Temperaturen über 900 °C entgast. Das entweichende Rohgas wurde in einer anschließenden Gasreinigung gekühlt und von Schadstoffen befreit: Durch Besprühen mit Ammoniakwasser in sogenannten Vorlagen kühlte das heiße Rohgas (600-700 °C) ab. Dabei kondensierte der Hauptteil der Teerprodukte. Lösliche Bestandteile wurden mit dem Gaswasser in die Kondensatscheidegrube geleitet. In Luft- oder Wasserkühlern wurde das Gas auf ca. 25 °C gekühlt. Die weitere **Teerabscheidung** erfolgte mechanisch oder elektromechanisch. Einige Gaswerke/Kokereien besaßen spezielle Naphthalinwascher. Das im Rohgas enthaltene Ammoniak wurde in **Ammoniakwaschern** mit Wasser ausgewaschen und in die Ammoniakwassergrube geleitet.

Die **Schwefelwasserstoff-** und **Cyanwasserstoffreinigung** erfolgte entweder trocken durch Anlagerung an Gasreinigermasse oder naß durch Waschen mit Ammoniakwasser. Das mit Schwefelverbindungen beladene Ammoniakwasser wurde teilweise zu Schwefelsäure oxidiert.

Einige größere Werke verfügten darüberhinaus über **Benzolwascher** mit oder ohne anschließender **Benzolaufbereitung**. Mit Waschöl wurde das im Rohgas enthaltene Benzol entfernt. Die Regeneration des Waschöls erfolgte im Benzolabtreiber. Das Rohbenzol wurde mit Schwefelsäure und Natronlauge gereinigt und der Benzoldestillation zugeführt.

In der **Kondensatscheidegrube** wurde das bei der Kühlung und Teerscheidung anfallende Gemisch aus Teer und Gaswasser gesammelt. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte floß das Wasser in die **Ammoniakwassergrube** und der Teer über ein Tauchrohr in die **Teergrube**. Das Ammoniakwasser wurde entweder direkt als Düngemittel in der Landwirtschaft eingesetzt oder zu Ammoniumsulfat verarbeitet. Die **Ammoniakwasseraufbereitung** erfolgte in Sachsen nach dem indirekten Verfahren: Die Zugabe von Kalk setzte Ammoniakschwaden frei, die entweder zu verdichtetem Ammoniakwasser oder in Sättigern durch die Zugabe von Schwefelsäure zu Ammoniumsulfat weiterverarbeitet wurden. Der Teer wurde in spezielle Teeraufbereitungsanlagen gebracht. Nur einige größere Gaswerke/Kokereien verfügten über **Entpheno-** **lungs-** und **Abwasserreinigungsanlagen**.

Das gereinigte Gas (Starkgas) wurde in **Gasbehälter** oder über **Gasmischstationen** in das Ferngasnetz eingeleitet. Der Koks wurde mit Wasser gekühlt und aufbereitet, das mit Koksteilchen verschmutzte Löschwasser in **Absetzbecken** geleitet.

Tabelle 1 zeigt, mit welchen Verunreinigungen in den einzelnen Geländebereichen bei Gaswerken/Kokereien zu rechnen ist.

Tab. 1: Stoffe und Stoffgemische in Abhängigkeit von Anlagen und Geländebereichen bei Gaswerken/Kokereien

Anlagen/Bereich	Stoffe/Stoffgemische
Kohlen- und Kokslager	Steinkohle, Koks, Mineralöle, Altöl
Koksaufbereitung	Koks
Ofenanlage	Löschwasser, Schlacke, Ruß, Kohle, Koks
Gasreinigung: - Kühler - Teerscheider - Ammoniakwascher/-aufbereitung - Schwefelwasserstoff- und Cyanwasserstoffreinigung - Naphthalinwascher - Benzolwascher/-aufbereitung	- Steinkohlenteer, Ammoniakwasser - Steinkohlenteer - Ammoniakwasser, Schwefelverbindungen - verbrauchte Gasreinigermasse - Waschflüssigkeiten, Naphthalin - Waschflüssigkeit, Benzol, verbrauchte Säure/-Lauge
Kondensatscheidegrube	Kondensate
Teergrube	Steinkohlenteer
Ammoniakwassergrube	Ammoniakwasser (Waschflüssigkeiten)

Fortsetzung Tab. 1: Stoffe und Stoffgemische in Abhängigkeit von Anlagen und Geländebereichen bei Gaswerken/Kokereien

Anlagen/Bereich	Stoffe/Stoffgemische
Gasmischstation	Kondensate
Gasspeicher	Teeröle
unterirdische Leitungen	Steinkohlenteer, Ammoniakwasser, Waschflüssigkeiten, Benzol
Ablagerungsflächen	Teer, verbrauchte Gasreinigermasse, Schlacke, Koksreste, kontaminierter Bauschutt
Sickerstellen oder Absetzbecken	Löschwasser, Kühlwasser, Ammoniakwasser

1.3.2 Generatorgasanlagen

Hauptsächlich wurden **Drehrostgeneratoren** eingesetzt, die kontinuierlich mit Braunkohlenbriketts oder Koks gefüllt wurden, so daß eine konstante Schüttung erhalten blieb. Die Vergasung lief bei Normaldruck unter Zufuhr von Luft zu einem Schwachgas ab. Über einen Drehrost erfolgte der kontinuierliche Austrag der Asche. Wurde das Gas ungekühlt gleich weiterverbrannt (Heißgasanlagen), genügte eine einfache **Staubsecheidung** an Prallblechen, in Zyklonen oder im Elektrofilter. Für die **Kühlung** von Gas aus teerfreien Brennstoffen (Koks) wurden der Staubsecheidung Washkühler (Scrubber) nachgeschaltet. Die Reinigung des teerreichen Gases aus Braunkohle war wesentlich umfangreicher. Sie umfaßte eine **Staub- und Teersecheidung**. In indirekten **Kühlern** wurde ein Gaswasser-Teer-Gemisch abgeschieden. Meist folgte noch eine **Nachreinigung**. Das gereinigte Gas wurde als Heizgas zur Unterfeuerung verwendet oder in Gasmischstationen dem Gas aus der Entgasung zugegeben. Der gewonnene Teer war aufgrund seines hohen Staubanteils nur bedingt weiterverwendbar. Bei mangelndem Absatz wurde er abgelagert. Das anfallende Ammoniakwasser floß in die Kanalisation.

Tabelle 2 zeigt, mit welchen Verunreinigungen in den einzelnen Geländebereichen bei Generatorgasanlagen zu rechnen ist.

Tab. 2: Stoffe und Stoffgemische in Abhängigkeit von Anlagen und Geländebereichen bei Generatorgasanlagen

Anlagen/Bereich	Stoffe/Stoffgemische
Kohlen- bzw. Kokslager	Braunkohle, BHT-Koks
Generatoranlage	Schlacke, Asche, Ruß
Gasreinigung: - Staubscheider - Kühler - Teerscheider	- Staub - Kondensate - Braunkohlenteer-Staub-Gemisch, Ammoniakwasser
Ablagerungsflächen	Braunkohlenteer-Staub-Gemisch, Schlacke, Asche, kontaminierter Bauschutt

1.3.3 Sonstige Kontaminationsquellen

Neben den bereits aufgezeigten Kontaminationsquellen können auf einem Gaswerksgelände folgende Verunreinigungen auftreten:

- a) Verunreinigungen mit Reib- oder Schmierölen:
- auf Parkplätzen
 - im Bereich der Zu- und Abfahrt
 - in Werkstätten

- b) Verunreinigungen mit Schwermetallen:
 - Blei: beim Entfernen oder Aufbringen bleihaltiger Rostschutzmittel
 - Quecksilber: bei der Lagerung von gebrauchten Meßinstrumenten
- c) Verunreinigungen mit allen Betriebsstoffen:
 - durch Transportverluste
 - durch Ablagerungen, Aufschüttungen oder Auffüllungen von Reststoffen
 - durch nicht verkaufbare Produkte oder Bauschutt

1.4 Schadstoffe

Auf dem Gelände von Gaswerken/Kokereien/Generatorgasanlagen ist mit den in Tabelle 3 zusammengefaßten Schadstoffen zu rechnen.

Tab. 3: Schadstoffe und ihre Anteile in typischen Stoffen und Stoffgemischen von Gaswerken/Kokereien/Generatorgasanlagen

Stoffe/Stoffgemische	Anteil [%] ¹⁾	Schadstoffe
Steinkohlenteer	50-80	- PAK: Naphthalin, Anthracen, Phenanthren, Fluoranthen, Pyren, Benz(a)pyren
	2-20	- BTEX
	0,5-5	- Phenole und heterocyclische Kohlenwasserstoffe: Phenol, Kresole, Pyridin
Braunkohlenteer	20-40	- aliphatische Kohlenwasserstoffe: Paraffine bis C ₃₂ , Alkene, Alkine
	10-20	- Cycloalkane, -alkene
	8-30	- Phenole
	<10	- PAK
0,05-5	- BTEX	
Ammoniakwasser ²⁾ (Phenolwasser, Gaswasser)	k. A.	- anorganische Verbindungen: Ammoniak, Sulfat, Sulfid, Cyanid, Thiocyanat, Thiosulfat, Chlorid - organische Verbindungen: Phenole, Pyridin, Aldehyde, Ketone
verbrauchte Gasreiniger- masse	25-65	- Schwefel, Sulfide
	12-65	- Eisenoxid/-hydroxid
	2-15	- komplexe Eisencyanide
Waschflüssigkeiten	k. A.	aromatische Kohlenwasserstoffe
Löschwasser	k. A.	Kokspartikel, Sulfid, Sulfat, Cyanid
Schwermetalle	Spuren	Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink

¹⁾ Die angegebenen Werte zeigen die Größenordnung der angefallenen Stoffe an.

²⁾ Als Ammoniakwasser wird vordergründig das Abwasser aus Gaswerken und Kokereien auf Steinkohlenbasis bezeichnet. Es ist durch hohe Konzentrationen an Ammoniak gekennzeichnet. Organische Verbindungen liegen in vergleichbar niedrigeren Konzentrationen vor. Die Abwässer der Braunkohlenveredlung enthalten einen entscheidend höheren Anteil an organischen Verbindungen. Wie schon die Bezeichnung Phenolwasser aussagt, sind vor allem Phenole, aber auch Alkohole, Aldehyde, Ketone und Pyridin enthalten.

k. A.: keine Angaben

Für ehemalige **Gaswerks- und Kokereistandorte** sind daher vordergründig PAK, BTEX (Teer) sowie Cyanid- und Schwefelverbindungen (Gasreinigermasse) relevant. Im Umfeld ehemaliger **Generatorgasanlagen** ist auf aliphatische KW, insbesondere Paraffine, und Phenole zu achten.

Das Stoffverhalten der **PAK** im Boden wird durch eine geringe Wasserlöslichkeit und Flüchtigkeit sowie eine hohe Sorbierbarkeit bestimmt. PAK sind deshalb in der Regel sehr immobil. An Gaswerks- bzw. Kokereistandorten treten sie meist im Stoffgemisch mit **Benzol** auf, das als Lösungsmittel wirkt. Um die Gefährlichkeit der **Cyanide** beurteilen zu können, muß zwischen freiem und komplex gebundenem Cyanid unterschieden werden.

Auf Gaswerks- bzw. Kokereigelände liegen die Cyanide vorwiegend komplex gebunden als "Berliner Blau" vor, das sehr stabil und kaum löslich ist. Bei Untersuchungen sollten die Parameter Cyanid_{gesamt} und Cyanid_{freisetzbar} bestimmt werden. Schwermetallkonzentrationen hemmen den biologischen Abbau.

2 Hinweise zur Altlastenbehandlung

2.1 Altlastenrelevanz

Die jahrzehntelange Nutzung eines Gaswerks-/Kokerei-/Generatorstandortes führte zwangsläufig zu Verunreinigungen, die eine Gefahr für Mensch und Umwelt sind. Die Ursachen hierfür sind vielfältig:

- Unterbewertung des Gefährdungspotentials der anfallenden Stoffe,
- sorgloser und leichtfertiger Umgang mit festen und flüssigen Nebenprodukten beim Transport oder bei Reinigungs- und Reparaturarbeiten,
- Leckagen an Leitungs- und Kanalsystemen oder Gruben,
- Überalterung der Anlagen,
- Ablagerung von Abfällen aus der Produktion (Gasreinigermasse, Asche), von Bauschutt (Ofenausbruch) u. a.,
- unsachgemäße Umbauarbeiten während des Betriebes oder Abbrucharbeiten nach der Stilllegung,
- Kriegsschäden und Havarien.

Hauptsächlich kam es zu Kontaminationen des **Bodens** durch die o. g. Vorgänge. Kondensate (Ammoniakwasser, Teer) wurden meist in unterirdisch angelegte Gruben aber auch in oberirdische Behälter für Ammoniakwasser, Teer und Benzol geleitet. Durch Schöpfen oder Pumpen wurden die Flüssigkeiten in Fässer oder Tanks verladen und abtransportiert. Reste oder nicht verkaufbare Produkte wurden, abhängig von den Gegebenheiten, auf dem Gelände oder auf nahe gelegenen Deponien abgelagert.

Die Böden der Gaswerks-/Kokerei-/Generatorstandorte sind meist keine natürlichen Böden, sondern Aufschüttungen verschiedenster Materialien oder versiegelte Flächen. Inwieweit die aufgeschütteten Materialien die Prozesse negativ beeinflussen, ist von ihrer Art und Zusammensetzung sowie von den speziellen Standortbedingungen abhängig.

Auch das **Grundwasser** kann durch Auswaschen bzw. Versickerung der in Punkt 1.4 genannten Schadstoffe verunreinigt werden.

Oberflächengewässer sind hauptsächlich während des Betriebes durch das Einleiten betrieblicher Abwässer (Ammoniakwasser, Gaswasser, Phenolwasser) gefährdet. Durch ungenügende oder fehlende Abwasserreinigung und Unkenntnis vieler Abwasserinhaltsstoffe kam es daher unterhalb von Kohleveredelungsanlagen zu schwerwiegenden Belastungen der Vorfluter. Die Eutrophierung der Gewässer führte zu sauerstoffzehrenden Bedingungen und Fäulnisbildung (Geruchsbelästigung), die Giftwirkung der Phenole zu Fischsterben. Deshalb ist eine Belastung von Oberflächengewässern nach der Stilllegung von Gaswerken/ Kokereien nicht auszuschließen, wenn Abwässer in stehendes Gewässer bzw. in Oberflächengewässer, die Vorfluter für das oberflächennahe Grundwasser und das Niederschlagswasser sind, eingeleitet werden.

Emissionen in die **Luft** können nach Stilllegung der Anlagen weitestgehend vernachlässigt werden. Während der Durchführung von Sanierungsarbeiten sind daher die Benzol- und Cyanidgehalte in der Luft im Sinne des Arbeitsschutzes zu prüfen. In geschlossenen Räumen sind bei vermuteter Gefährdung Luftproben zu analysieren.

2.2 Gefährdete Schutzgüter und relevante Pfade

Gefährdete Schutzgüter sind:

- Boden,
- Grundwasser,
- Oberflächenwasser.

Menschen, Tiere und Pflanzen sind durch Nutzung der o. g. Schutzgüter bzw. durch direkten Kontakt mit den Abfallstoffen gefährdet.

2.3 Gefährdungsabschätzung

Wegen des möglichen Gefährdungspotentials ist in jedem Fall eine Gefährdungsabschätzung nach der Sächsischen Altlastenmethodik (Stufenprogramm) erforderlich.

Die schadstoffabhängigen Einflußfaktoren werden im folgenden spezifiziert. Im BN 1 wird vom ungünstigsten Fall innerhalb des möglichen Spektrums ausgegangen. Im BN 2 wird die Bewertung auf die als relevant ermittelten Schadstoffparameter (>P-Wert bzw. >B-Wert) ausgerichtet.

2.3.1 Verdachtsfallerfassung und Formale Erstbewertung

Die Verdachtsfallerfassung und Erstbewertung erfolgt nach SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1997).

(7) **Art der Verdachtsfläche:** Ehemalige Gaswerks-, Kokerei- bzw. Generatorgasstandorte sind prinzipiell als Altstandort zu betrachten. Teilbereiche, z. B. Teergruben oder ehemalige Lagerplätze für Gasreinigermasse, können als Altablagerungen zusätzlich bewertet werden.

(18) **Sohllage zum Grundwasser:** Wenn keine Kenntnis über die Tiefe der Kontamination vorhanden ist, gilt als Bezugspunkt der tiefste bekannte Schadstoffpunkt (Ammoniakgrube, Tanks etc.). Dessen Abstand zum Grundwasserspiegel ist anzugeben.

(20S) Einordnung in Branchenschlüssel und Belastungsstufe:

<u>Branchenschlüssel</u>	<u>Branche</u>	<u>Belastungsstufe</u>
0010	Gaserzeugung	45
0030	Kokereien	45

2.3.2 Historische Erkundung und Bewertung (Beweisniveau 1)

Die Historische Erkundung ist nach SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1998 a) durchzuführen und nach SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1996) für Boden, nach SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1995) für Grundwasser und nach Fertigstellung entsprechend SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (in Vorbereitung a) für Oberflächenwasser zu bewerten.

Stoffgefährlichkeit - r_o :

- r_o für Gaserzeugung und Kokerei nach Brancheneinstufung in SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (in Vorbereitung): Wegen möglicher Benzol- ($r_o = 3,5-4,9$) und Cyanidkontaminationen ($r_o = 2,1-2,2$) in Abhängigkeit von der Aufnahme und der ökotoxikologischen Bedeutung sollte bei **Kokereien** und **Gaswerken** von einer Stoffgefährlichkeit $r_o = 4,9$ ausgegangen werden.
- In **Generatorgasanlagen** sind hauptsächlich Kohlenwasserstoffe ($r_o = 2,3$) und Phenole ($r_o = 2,9-4,6$) in Abhängigkeit von der Aufnahme und der ökotoxikologischen Bedeutung relevant. Für die Bewertung wird eine Stoffgefährlichkeit von $r_o = 4,6$ angenommen.

Örtliche Bedingungen, m-Werte:

Schadstoffabhängige Einflußfaktoren werden im Folgenden eingegrenzt. Die spezifischen Standortbedingungen sind bezogen auf den Einzelfall zu bewerten.

Grundwasser - m_I

- Lage zum Grundwasser: $m_I = 1,2$ mit Ausnahme: Gruben, unterirdische Tanks etc. liegen im Grundwasser oder Grundwasserwechselbereich
- Oberflächenabdeckung: Da die Stilllegung der meisten Anlagen Jahre zurückliegt - der Großteil wurde in den 70er Jahren geschlossen - ist das Gelände an den nicht versiegelten Stellen meist bewachsen. Dann ist $\Delta m = 0$. Anderenfalls erfolgt die Bewertung in Abhängigkeit davon, ob die Schadstoffherde im wesentlichen abgedeckt sind oder nicht (vgl. Punkt 1.3).
- Oberflächenabdichtung: Eine Oberflächenabdichtung gilt dann als wirksam, wenn an den kontaminationsverdächtigen Flächen ein Auswaschen von Schadstoffen durch Niederschlagswasser größtenteils verhindert wird (Bebauung, Versiegelung, Überdachung etc.).

Grundwasser - m_{II}

- Sorption: Die Sorbierbarkeit ($\log SC$) der vorkommenden Schadstoffe liegt zwischen <2 (Pyridin, Benzol, Phenol) und >4 (PAK). Für den Austrag wird die geringste Sorbierbarkeit herangezogen. In Abhängigkeit vom Humus- und Tongehalt ergeben sich dann folgende Werte: Anteil Humus bzw. Ton schwach-mittel: $\Delta m = 0$ bzw. stark: $\Delta m = -0,1$
- Lösungsvermittler: Benzol wirkt gegenüber PAK als Lösungsvermittler
- Abbaubarkeit: Prinzipiell können gaswerksspezifische Schadstoffe biologisch abgebaut werden. Da aber eine Schwermetallbelastung möglich ist, muß von $\Delta m = 0$ ausgegangen werden.

Grundwasser - m_{III}

- Abstandsgeschwindigkeit: Sie ist abhängig von der hydrogeologischen Situation vor Ort.
- Sorption: Die Bestimmung erfolgt analog m_{II} mit dem Humus-/Tongehalt des Grundwasserleiters.
- Abbaubarkeit: Der biologische Abbau der organischen Schadstoffe ist prinzipiell auch im Grundwasser möglich. Bei Verdacht auf Schwermetallbelastung ist aber $\Delta m = 0$ anzusetzen.

Grundwasser - m_{IV}

- Aufbereitungsmöglichkeiten: Bei Zustrom des von einem Gaswerk/Kokerei beeinflussten Grundwassers in ein Wasserwerk werden die relevanten Schadstoffe nicht in der normalen Trinkwasseraufbereitung erfaßt, $\Delta m = 0$
- Verdünnung: Die Verdünnung ist primär von der Ergiebigkeit des Grundwasserleiters abhängig und damit standortspezifisch abzuschätzen.

Boden - m_I

- Fallzuordnung: Prinzipiell können alle aufgezeigten Fälle auftreten, hauptsächlich Fall 1 (der zu schützende Boden ist die Altlast selbst; $m_I = 1,0$) und Fall 2 (der zu schützende Boden liegt in der Umgebung der Altlast; $m_I = 0,6$).

Je nach Fall sind die folgenden Schadstoffeigenschaften zu spezifizieren:

- Abdeckung: siehe Grundwasser
- Löslichkeit: Das Spektrum reicht von leicht bis schwer löslichen Schadstoffen. Für den Stoffaustrag sind die leicht löslichen Schadstoffe (Cyanide_{frei} und Phenole) zu bewerten; $\Delta m = 0$
- Sorption: siehe Grundwasser
- Lösungsvermittler: Benzol wirkt gegenüber PAK als Lösungsvermittler; $\Delta m = +0,1$

Boden - m_{II}

Der Schadstoffeintrag ist standortabhängig zu bewerten.

Boden - m_{III}

- Abbaubarkeit im Boden: Prinzipiell können die gaswerksspezifischen Schadstoffe abgebaut werden. Da aber auch eine Schwermetallbelastung möglich ist, muß von m_{III} = 1,0 ausgegangen werden.
- Toxische Abbauprodukte: Beim biologischen Abbau können toxische Abbauprodukte (z. B. aus Pyren das gentoxischere Pyren-1,6-Dion) entstehen; Δm = +0,1.
- Verweilzeit im Boden: Da es sich um Stoffgemische handelt, kann die Verweilzeit sehr unterschiedlich sein. Es ist von der größten Verweilzeit auszugehen (Schwermetalle); Δm = 0.
- Sorption-Bindungsstärke:
 - Bewertung bzgl. oraler Schadstoffaufnahme: Vor allem PAK werden an Humus gebunden, die anderen Stoffe werden nur gering oder gar nicht adsorbiert; Δm = 0.
 - Bewertung bzgl. Bioverfügbarkeit: Organische Stoffe sind gering (PAK) bis gut (Phenol) bioverfügbar; Δm = 0. Bei Relevanz von Schwermetallen ist eine Bewertung in Abhängigkeit von der Bindungsstärke vorzunehmen.
- beobachtete Wirkung: Verbrauchte Gasreinigermasse sowie hohe organische Schadstoffkonzentrationen können sich nachteilig auf das Pflanzenwachstum auswirken; je nach Standortbeobachtung Δm bis +0,2.

Wird ein weiterer Handlungsbedarf festgestellt, folgt die Orientierende Erkundung (E₁₋₂).

2.3.3 Orientierende Erkundung und Bewertung (Beweisniveau 2)

Die Orientierende Erkundung ist nach SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1998 b) durchzuführen und nach SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1995; 1996) und SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (in Vorbereitung a) zu bewerten. Um Kenntnisse über Art und räumliches Ausmaß der Kontamination zu erlangen, sind chemisch-physikalische Untersuchungen notwendig. Tabelle 4 enthält die zu bestimmenden Parameter.

Tab. 4: Analyseparameter bei Gaswerken/Kokereien/Generatorgasanlagen in Abhängigkeit vom Probenahmemedium

Parameter	Boden	Eluat	Grundwasser
allgemeine Parameter:			
- Temperatur ¹⁾			X
- Färbung (SAK-436)			X
- Farbe (visuell)	X	X	X
- Trübung ¹⁾			X
- pH-Wert ¹⁾		X	X
- Geruch ¹⁾	X	X	X
- Konsistenz	X		
Summenparameter:			
- AOX		X	X
- BTEX	X	X	X
- DOC			X
- Gesamthärte			X
- KW (nach DIN 38409-H18)	X	X	X
- PAK	X	X	X
- Phenol-Index ²⁾	X	X	X
- Phenole _{wdf.}	X	X	X
sonstige anorganische und organische Parameter:			
- Sauerstoff ¹⁾			X

1) Dieser Parameter ist nach der Probenahme vor Ort zu bestimmen

2) Besser GC-MS Phenol-Einzelbestimmung, da Alkylphenole im Phenolindex unzureichend oder gar nicht berücksichtigt werden (unterdrücken Farbreaktionen)

Fortsetzung Tab. 4: Analyseparameter bei Gaswerken/Kokereien/Generatorgasanlagen in Abhängigkeit vom Probenahmemedium

Parameter	Boden	Eluat	Grundwasser
Metalle und Kationen:			
- Ammonium		X	X
- Arsen	X	X	X
- Cadmium	X	X	X
- Chrom _{gesamt}	X	X	X
- Kupfer	X	X	X
Anionen:			
- Chlorid		X	X
- Cyanid _{gesamt}	X	X	X
- Cyanid _{freisetzbar}	X	X	X
- Sulfat		X	X
- Sulfid		X	X

Grundwasser, Untersuchungsprogramm: Die Entnahme von Grundwasserproben hat im Zu- und Abstrom zu erfolgen. Für die Untersuchung des Grundwassers sollten zur Erfassung auf dem Wasser schwimmende (Benzol, KW), im Wasser gelöste bzw. suspendierte oder auf der Sohlschicht abgesetzte Verunreinigungen (PAK) verschiedener Entnahmezonen berücksichtigt werden.

Boden, Untersuchungsprogramm: Die Probenahme sollte unter Berücksichtigung der in Punkt 1.3 aufgeführten Bereiche erfolgen. Es ist darauf zu achten, daß keine Schadstoffe (Teerverunreinigungen) verschleppt werden und unterirdische Gruben und Leitungen nicht durch die Probenahme beschädigt werden. Für die chemisch-physikalischen Untersuchungen kommen auffällig riechende oder verfärbte Proben in Betracht.

Oberflächenwasser, Untersuchungsprogramm: Um eine Beeinträchtigung durch Schadstoffe festzustellen, sind physikalisch-chemische Untersuchungen im Wasser sowie im Sediment erforderlich. Mindestens zwei Probenahmen sollten in mehrwöchigem Abstand durchgeführt werden. Weiterhin ist darauf zu achten, daß aus fließenden Gewässern eine Nullprobe oberhalb des kontaminierten Bereiches entnommen wird, um die Grundbelastung zu erhalten. Die Entnahme von Sedimentproben sollte nur in Zonen gleichmäßiger Wasserbewegung durchgeführt werden.

FORMALE BEWERTUNG

Die formale Bewertung ist analog Punkt 2.3.2 mit entsprechend genaueren Aussagen durchzuführen.

Stoffgefährlichkeit - r_o:

Die Stoffgefährlichkeit wird nicht mehr anhand der Branche bestimmt wie im Beweisniveau 1, sondern anhand der als relevant ermittelten Schadstoffparameter aus dem Untersuchungsprogramm. Entsprechend SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (in Vorbereitung) ist die höchste Stoffgefährlichkeit der als relevant ermittelten Parameter maßgebend.

Grundwasser - m_I bis m_{III}

- Löslichkeit: Die Löslichkeit ist entsprechend den Untersuchungsergebnissen für die als relevant ermittelten Stoffe zu spezifizieren.
- Sorption: Die Sorption ist entsprechend den Untersuchungsergebnissen zu spezifizieren. Sind z. B. nur PAK relevant und der Standort weist mittel humosen Boden auf, so wird die Sorption mit $\Delta m = -0,1$ bewertet.
- Abbaubarkeit: Die Abbaubarkeit ist entsprechend den Untersuchungsergebnissen zu spezifizieren. Kann eine Schwermetallbelastung ausgeschlossen werden, ist $\Delta m = -0,1$.

Grundwasser - m_{IV}

Die ermittelten Schadstoffkonzentrationen sind mit den Prüfwerten nach SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (in Vorbereitung) zu vergleichen und entsprechend zu bewerten.

Boden - m_I bis m_{III}

- Löslichkeit: Die Löslichkeit ist anhand der Untersuchungsergebnisse zu spezifizieren.
- Sorption: siehe Boden
- Abbaubarkeit: Die Abbaubarkeit ist anhand der Untersuchungsergebnisse zu spezifizieren. Kann eine Schwermetallbelastung ausgeschlossen werden, ist bei einer PAK- oder Cyanidbelastung mit $m_{III} = 0,9$ zu rechnen. Werden ausschließlich leichter abbaubare Stoffe wie Ammonium, Phenole, BTEX nachgewiesen, so ist $m_{III} = 0,8$ anzusetzen.

Boden - m_{IV}

Es erfolgt ein Vergleich der Analysenwerte mit den nutzungsabhängigen Prüf- Maßnahmen- und Orientierungswerten nach SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (in Vorbereitung).

Nach der Bewertung auf BN 2 folgt bei weiterem Handlungsbedarf die Detailerkundung (E 2.3).

2.3.4 Detailerkundung und Bewertung auf Beweinsniveau 3

Die Detailerkundung ist nach SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (in Vorbereitung b) mit dem Ziel durchzuführen, genaue Kenntnisse über Art und Ausmaß der Kontamination gegenüber den Schutzgütern (Boden, Grund- und Oberflächenwasser) zu erhalten.

Bei auffälligen Summenparametern aus der Orientierenden Erkundung sind die entsprechenden Einzelparameter zu bestimmen bzw. ist das Parameterspektrum auf weniger charakteristische Schadstoffe auszudehnen (z. B. Blei, Quecksilber, Nickel, Zink).

Die Gefährdungsabschätzung erfolgt standortbezogen. Im Ergebnis kann eine Sanierung mit Sanierungsuntersuchung, eine Nutzungseinschränkung, eine Überwachung oder ein Belassen des Altlastenverdachtsfalles im Altlastenkataster stehen. Bei der Entscheidung für eine Sanierung ist ein vorläufiger Sanierungszielwert festzulegen.

2.4 Sanierungsuntersuchung

Hat die Gefährdungsabschätzung die Notwendigkeit einer Sanierung ergeben, ist auf der Basis eines vorläufigen Sanierungszielwertes eine Sanierungsuntersuchung durchzuführen. Diese umfaßt die Ermittlung der zweckmäßigen Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombination zur Gefahrenabwehr für eine geplante oder vorhandene Nutzung der Fläche im Rahmen eines Variantenvergleiches. Dabei sind folgende Schritte abzuarbeiten:

1. Vorauswahl von Gefahrenabwehrmaßnahmen, die zum Erreichung der Schutzziele geeignet sind.
2. Prüfung dieser Verfahren anhand von Beurteilungskriterien:
 - Technische Durchführbarkeit und Verfügbarkeit,
 - Erreichbarkeit der angestrebten Sanierungsziele,
 - Zuverlässigkeit von Aussagen über den voraussichtlichen Sanierungserfolg (Vorversuche wie Pumpversuche, Versuche zur biologischen Abbaubarkeit etc.),
 - Auswirkungen auf die Umwelt,
 - rechtliche, insbesondere genehmigungsrechtliche Erfordernisse,
 - Kostenschätzung, Kostenwirksamkeit.

3. Vorschlag des Gutachters über Art und Umfang der durchzuführenden Sanierung

Die Sanierungsuntersuchung muß der zuständigen Behörde die Entscheidung darüber ermöglichen, welche der untersuchten Maßnahmen im Einzelfall besonders geeignet und verhältnismäßig ist. Das endgültige Sanierungsziel wird festgelegt.

2.5 Sanierung

Prinzipiell ist der Einsatz aller Sanierungsverfahren, d. h. Sicherungs- und Dekontaminationsverfahren, sowie weiterer Gefahrenabwehrmaßnahmen wie Umlagerung oder Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen denkbar. Schadstoffspezifische Sicherungsmaßnahmen wie eine hydraulische Sperre etc. werden hier nicht extra aufgeführt. Im folgenden sollen Sanierungsverfahren vorgestellt werden, die insbesondere für Gaswerks- und Kokereistandorte geeignet sind. Die Reihenfolge der Nennung entspricht der derzeitigen Bedeutung. Verfahrenskombinationen sind möglich.

Die hier vor allem zu betrachtenden Schadstoffe sind PAK, BTEX, aliphatische KW (Paraffine) sowie Phenole. Cyanide liegen auf Gaswerks- und Kokereistandorten meist komplex gebunden als "Berliner Blau" vor, das sehr stabil und kaum löslich ist.

2.5.1 Thermische Verfahren

Prinzip: Thermische Verfahren sind Dekontaminationsverfahren mit dem Ziel der Zersetzung bzw. Oxidation organischer Schadstoffe. Je nach Wahl der verfahrenstechnischen Einflußgrößen erfolgt eine Prozeßführung als Entgasung, Vergasung oder Verbrennung. Dabei laufen in jeder Behandlungsanlage die drei wesentlichen Prozeßschritte Verdampfung und teilweise Verbrennung, Nachverbrennung und Abgasreinigung ab. Arbeitstemperaturen und Verweilzeiten richten sich nach Art und beabsichtigter Nutzung des gereinigten Materials. In Abhängigkeit von der Temperatur kann die Zersetzung organischer Bestandteile und eine Veränderung des Mineralbestandes erfolgen.

Stand der Technik: direkt befeuerte Anlagen, indirekt befeuerte Anlagen und wirbelschichtbefeuerte Anlagen

Eignung:

- starke und schwer abbaubare organische Bodenverunreinigungen wie PAK
- Cyanide werden ausgetrieben aber nicht zersetzt. Sie müssen durch nachträgliche Abgasreinigung abgetrennt und als Rückstand behandelt werden. Schwermetalle werden oxidiert aber thermisch nicht entfernt.

Die thermischen Verfahren haben den höchsten Wirkungsgrad innerhalb der Sanierungsverfahren, verursachen jedoch aufgrund der nachgeschalteten Reinigungsstufen die höchsten Kosten.

2.5.2 Extraktions- und Waschverfahren

Prinzip: Das Prinzip dieser Dekontaminationsverfahren ist, die Schadstoffe durch zugeführte mechanische Energie vom Bodenkorn abzulösen und in die flüssige oder gasförmige Phase zu überführen bzw. mit der Bodenfeinstkornfraktion auszuschleusen. Die angewandten Bodenwaschverfahren arbeiten überwiegend mit dem Extraktionsmittel Wasser ggf. unter Zugabe von oberflächenaktiven Stoffen bzw. anorganischen und organischen Lösungsmitteln. Die Schadstoffmenge bleibt über den gesamten Prozeß konstant und liegt am Prozeßende in aufkonzentrierter Form vor.

Stand der Technik: Verfahren mit einer chemisch/physikalischen und/oder biologischen Abwasseraufbereitung und Abluftreinigung; Durch die Abtrennung der Feinstkornfraktion kommt es zu einer Veränderung der Bodeneigenschaften. Der Boden ist biologisch aktiv bzw. aktivierbar.

Eignung:

- gut geeignet bei Böden wie Kies, Mittelsand, Feinsand, schluffigem Sand
- gut geeignet für die Schadstoffe BTEX, aliphatische Kw, Cyanide
- mit Einschränkung geeignet bei der Kontamination mit PAK

Grenzen:

- hoher Anteil an feinkörnigen Bodenpartikeln (>30 Gewichts-% bei Partikeln <0,02 mm)
- hoher Anteil an Leichtgut (20 %) wie z. B. Holz, Kohle, Koks etc.

2.5.3 Immobilisierung

Prinzip: Ziel dieses Sicherungsverfahrens ist das Verringern oder Unterbinden von Schadstoffemissionen. Immobilisierungsverfahren sind Verfestigung (Herabsetzung der Durchlässigkeit, Beeinflussung der Löslichkeit), Verglasung (Inertisierung) sowie Fixierung (chemischer Einbau, Chemiesorption). Wirkmechanismen sind physikalische Einkapselung (Microeinkapselung), chemische Einbindung, Fällung bzw. Sorption.

Stand der Technik: On site-Immobilisierungsmaßnahmen mit den Schritten Auskoffnung, Behandlung, Wiedereinbau am Standort bzw. Ablagerung auf einer Deponie. Die Verfestigung hat dabei praktisch die größte Bedeutung. In situ-Maßnahmen sind möglich, haben in der Praxis aber eine geringe Bedeutung.

Eignung/Anwendung:

- Mischkontaminationen (PAK, Cyanid, etc.)
- unsensible Nachnutzungen
- Böden mit hohem Feinkornanteil

Positive Erfahrungen wurden bei Gaswerksstandorten z. B. mit der Anwendung eines Einkomponentenmittels aus Polybutadienmonomeren mit speziell entwickelten Additiven gemacht (GÜLS, 1996).

2.5.4 Biologische Verfahren

Prinzip: Bei diesem Dekontaminationsverfahren findet ein vollständiger (Mineralisation) oder teilweiser (Transformation) mikrobieller Schadstoffabbau statt. Bei einem Teilabbau entstehen Metabolite, die weiter abgebaut werden können oder im Boden verbleiben. Hierbei besteht die Gefahr, daß die Metabolite toxischer sein können als die Ausgangsstoffe.

Stand der Technik: Mikrobiologische on site-/off site-Maßnahmen bei MKW-Belastungen; Dabei ist eine optimierte Prozeßsteuerung und Kontrolle möglich. Der Boden wird aufbereitet und homogenisiert, mit Nährstoffen, Bakterienkulturen sowie Wasser versetzt und begast bzw. belüftet (im Mietenverfahren bzw. Bioreaktor). Eine mikrobiologische PAK-Sanierung auf Gaswerks- und Kokereistandorten kann aufgrund des problematischen Abbaus derzeit nicht als Stand der Technik gelten.

Eignung/Anwendung:

- bei mikrobieller Abbaubarkeit sowie Bioverfügbarkeit der Schadstoffe (z. B. aliphatische KW, BTEX, Phenole)
- PAK gelten als schwer abbaubare Schadstoffgruppe
- bis Konzentrationen von ca. 1 600 mg/kg PAK und entsprechend optimalen Rahmenbedingungen können biologische Verfahren effizient sein
- die geologisch-hydrologischen Eigenschaften des Untergrundes entscheiden wesentlich über die anzuwendende Verfahrenstechnik sowie über in situ- bzw. on-/off site-Dekontaminationsmöglichkeit
- in situ-Sanierungen erfordern:
 - Böden mit $k_f > 10^{-4}$ m/s
 - Möglichkeiten zur Errichtung eines Spülkreislaufs
 - gleichmäßige Durchströmbarkeit der zu sanierenden Zone
 - Verhinderung der Schadstoffausbreitung in die Umgebung
 - Porengrundwasserleiter (bei Grundwassereinbeziehung)

2.5.5 Sanierungsüberwachung

Eine Überwachung der Dekontaminations- und Sicherungsverfahren ist während der Behandlung zum einen als Arbeitsschutzmaßnahme besonders auf Emissionen von freigesetzten Cyaniden und BTEX zu achten und zum anderen als Prozeßüberwachung und -steuerung unbedingt notwendig. Toxizitätstests können wichtige Hinweise zum Verlauf und dem Zeitpunkt des Abschlusses der Sanierung geben.

2.5.6 Anbieter von Leistungen zur Altlastenbehandlung

Firmen und Einrichtungen, die sich in Sachsen mit der Behandlung von Altlasten beschäftigen, sind dem "Verzeichnis der Anbieter von Leistungen zur Altlastenbehandlung im Freistaat Sachsen" zu entnehmen. Es wurde letztmalig im Oktober 1995 vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) herausgegeben. Künftig ist es über die Industrie- und Handelskammern in Dresden, Leipzig und Chemnitz zu beziehen. Abfalltechnische Behandlungsanlagen wie thermische Behandlungsanlagen sind im "Abfalltechnischen Anlagenkataster (ANKA)" des LfUG recherchierbar. Firmen, die Immobilisierungsverfahren anbieten, sind u. a. in der LfUG-Publikation "Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten" (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 1996), aufgeführt.

3 Literaturangaben

Hinweis:

Das Branchenblatt wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Bergakademie Freiberg im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie erstellt (GROH, 1996).

GROH, B. (1996): Erarbeitung von branchenbezogenen Merkblättern zur Altlastenbehandlung für die Branchen „Gaswerke“ und „Kokereien“. - Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Fakultät Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik.

GÜLS, V. (1996): In-situ-Immobilisierung auf einem ehemaligen Gaswerksgelände. - Terratech 3/1996.

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1996): Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten. - Materialien zur Altlastenbehandlung, Bd. 1/1996, Radebeul.

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1998 a): Historische Erkundung von Altlastenverdachtsfällen. - Materialien zur Altlastenbehandlung, Dresden.

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1998 b): Probenahme bei der Technischen Erkundung von Altlasten.- Materialien zur Altlastenbehandlung, Radebeul.

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (in Vorbereitung): Handhabung von Orientierungswerten sowie Prüf- und Maßnahmenwerten zur Gefahrenverdachtsermittlung für die Altlastenbehandlung in Sachsen.- Materialien zur Altlastenbehandlung, Dresden.

SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1995): Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Grundwasser. - Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 3, Dresden.

SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1996): Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Boden. - Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 4, Dresden.

SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1997): Erfassung von Verdachtsfällen und Formale Erstbewertung. - Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 2, Dresden.

SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (in Vorbereitung a): Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Oberflächenwasser. - Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 5, Dresden.

SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (in Vorbereitung b): Detailuntersuchung.- Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 7, Dresden.

GRUNDWASSER – ZEITSCHRIFT DER FACHSEKTION HYDROGEOLOGIE 1/2001: Phenolindex – ein sinnvoller Parameter für die Altlastenbewertung?