

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie	Branchenbezogene Merkblätter zur Altlastenbehandlung	Stand : 10/06 Bearbeiter: A. Kohnke Dipl.-Ing. A. Sohr
Referat Grundwasser, Altlasten	4: Tankstellen/Tanklager	Seiten : 23

1 Branchentypisches Schadstoffpotential

1.1 Gesetzliche Grundlagen

In der DDR, als einem wesentlichen Zeitabschnitt bei der Historischen Erkundung von Altlastenverdachtsfällen, gab es für den Bau und den Betrieb von Tankstellen und Tankanlagen gesetzliche Richtlinien. Allgemeine Anforderungen an den Umweltschutz waren im Landeskulturgesetz (LKG) vom 14.05.1970 und seinen Durchführungsverordnungen als Rahmengesetz sowie weiteren Gesetzen (z. B. Wassergesetz vom 02.07.1982) formuliert. Folgende spezifische Vorschriften zu Tankstellen kamen in der DDR zur Anwendung:

- TGL 2999 Flüssige **Brennstoffe** (Kohlenwasserstoffe, Testbenzin) - Juni 1978
- TGL 3667 Flüssige Brennstoffe (Heizöle) - November 1982
- TGL 4938 Flüssige Brennstoffe (Dieselkraftstoffe) - Januar 1978
- TGL 21138 Flüssige Brennstoffe (Flug-Otto-Kraftstoffe) - Mai 1983
- TGL 5315 Tankanlagen mit ortsfesten **einwandigen Behältern** mit Kennwerten - Mai 1982
- TGL 5317/5318 **Tankanlagen** (Einrichtungen an Füll- und Saugleitungen/Zapfleitungen) - Juni 1982
- TGL 8161 Flüssigkeitsstandszeiger - November 1971
- TGL 10835 Hydraulik-Flüssigkeitsbehälter (2,5 - 1000 dm³) - April 1978
- TGL 10892 schwere Hydraulik-Flüssigkeitsbehälter (25 - 1000 dm³) - April 1984
- TGL 11533/13700 einwandige **Festdach-/Schwimmdachtanks** aus Stahl - Juli 1982
- TGL 20951 Tankanlagen (Zapfsäulen für Kraftstoffe mit Volumenmessung und Pumpe)
- TGL 26748/01 **Ortsveränderliche Tankanlagen** und Containeranlagen - Februar 1984
- TGL 28007 **Kraftstoffbehälter** für DK (technische Bedingungen) - Oktober 1984
- TGL 31904 Tankanlagen (Lüftungsklappen NW 32 bis 80) - Juli 1975
- TGL 32497 - 32508 **Tanks** (Stutzen, Beruhigungsrohre, Lüftungsklappen, Steigleitern u. a.) - Dezember 1975
- TGL 39741 **Kraftstoffbehälter** (Verschlussdeckel, Stutzen ohne Gewinde) - Juni 1986
- Richtlinie zum Schutz der Gewässer beim Verkehr mit **Kraftstoffen und Ölen** entsprechend Wasserrecht der DDR, 1984.

1.2 Einteilung

Tankstellen dienen und dienen der Versorgung von Fahrzeugen/Flugzeugen/technischen Geräten mit Kraftstoffen. Tankanlagen sind für die Lagerung von Kraftstoffen notwendig. Es kann sich um Einzelstandorte (z.B. Tankstelle an Autobahn oder separates Tanklager außerhalb eines Betriebes) oder um Teile von Standorten (Tankstelle für Fahrzeugpark in einem Betriebsgelände) handeln. Aufgrund ihrer möglichen Verbindung mit anderen Anlagen können sich unterschiedliche Bedingungen bzgl. Art und Umfang der eingesetzten Stoffe ergeben, die im Einzelfall immer beachtet werden müssen. Im Folgenden soll der Schwerpunkt auf den wesentlichen Merkmalen von Tankstellen bzw. -anlagen liegen.

Tankstellen kann man nach ihrem Stoffspektrum einteilen in:

- Tankstellen für Straßenfahrzeuge (im wesentlichen für Fahrzeuge mit Vergaser)
- Tankstellen in der Landwirtschaft (im wesentlichen für Dieselmotoren)
- Tankstellen für den Flugbetrieb.

Folgende wesentliche Stoffarten sind entsprechend Tabelle 1 zu unterscheiden:

Tab. 1: Stoffarten an Tankstellen

Kraftstoffe	Additive (Zusatzstoffe)	Schmierstoffe	Betriebsstoffe
<u>für Vergaser (VK)</u> ·VK 79, 88, 90 mit Gemisch Öl zu Benzin (1:33,1:50)- (DDR) ·Super verbleit, Benzin extra, Benzin bleifrei, Super bleifrei, Super plus bleifrei (vor 1990 an Sondertankstellen und weiteren einzelnen Tankstellen, ab 1990 schrittweise Ablösung des verbleiten Normal- und Superbenzins) <u>Diesel (DK)</u> ·z. B. Diesel - Ypach- (DDR, Diesel nicht für PKW) ·Diesel schwefelarm (nach 1990) <u>Flugbenzin</u> ·Flugbenzin Fok <u>Kerosin</u> ·78,95 Kerosin (TC-1) <u>(Benzol)</u> <u>(Naphthalin)</u>	<u>für Kraftstoffe:</u> ·Antiklopfmittel (Bleitetraethyl und Tetramethylblei, MTBE als Bleiersatz) ·Stoffe gegen Vergaservereinsung ·Antioxidantien ·Metalldeaktivatoren ·Korrosionsinhibitoren ·Antipreignitionsstoffe <u>für Öle:</u> ·Oxidationsinhibitoren ·Detergentien ·Stockpunktserniedriger ·Viskositätsverbesserer	<u>Motorenöl:</u> ·Normalöl ·Zweitaktöl ·Dieselöl <u>Schmieröl:</u> ·Getriebeöl ·Schmierfette ·Festschmierstoff ·Wachse <u>Syntheseöl</u>	·Hydrauliköle ·Bremsflüssigkeit ·Frostschutzmittel ·Reinigungsmittel ·Enteisungsmittel ·Akkusäure ·Kühlflüssigkeit ·Brandschutz ·(Heizöl, Altöl)

Tankstellen und -anlagen kann man außerdem nach ihren umgesetzten Stoffmengen einteilen in:

- Tankstellen mit hohem Stoffumsatz (z. B. an hoch frequentierten Straßen, große Tankstellen mit Zusatzeinrichtungen wie Werkstatt etc.),
- Tankstellen mit geringem Stoffumsatz (z. B. an niedrig frequentierten Straßen).

Je größer der Stoffumsatz, desto größer sind im Allgemeinen die Handhabungsverluste und damit die Belastung der Umwelt. Militärische Tankstellen und Betriebstankstellen weisen außerdem in der Regel größere durchschnittliche Verluste auf, da hier keine Einzelbezahlung erfolgte.

1.3 Technologie

Tankstellen bestehen hauptsächlich aus folgenden technologischen Teilbereichen:

1. Zapfsäulenbereich (freistehende technologische Aggregate im Betankungsbereich)
2. Umschlagplätze für Betankungen (Tankstraßen, Standflächen der Tankwagen)
3. Tanklager (einwandige Erdtanks, Überlaufeinrichtungen und Domschächte, zentraler Befüllschacht)
4. Leitungen zwischen Tank und Zapfsäulen (Saugleitung zur Zapfsäule, Rücklaufleitung)
5. sonstige Anlagen (Altöllager, Leichtflüssigkeits- und Ölabscheider, Auffangflächen, Fasslager, Hebebühnen u. a.).

Nach Literaturrecherchen und Zeugenbefragungen war die unsachgemäße Ausführung von Arbeiten mit Kraft- und Betriebsstoffen die Hauptursache für den Eintrag von Schadstoffen in die Umwelt. Beim Prüfen der möglichen Schadstoffherde sind einmal die im Folgenden aufgeführten möglichen Stellen von Schadstoffeinträgen durch Leckagen und unsachgemäßen Umgang mit den Stoffen zu beachten und zum anderen

die in den Tabellen 2 bis 4 aufgrund der Technologie bestehenden Schwerpunkte. Verunreinigungen durch Hausmüll, der branchenunabhängig anfällt, sind auch möglich, werden aber nicht weiter ausgeführt. Die Mineralölprodukte setzen sich aus einer Vielzahl verschiedener Kohlenwasserstoffe zusammen. Die Analysemethoden für die verschiedenen Stoffklassen sind im Pkt. 2.3.3, Tab. 6a enthalten.

1.3.1 Zapfsäulenbereich

Die Abgabe der Kraftstoffe an die Einzelabnehmer (Kfz,...) erfolgt an den Zapfsäulen. Tankstellen haben meist 7 bis 10 Zapfsäulen (Anzahl der Kfz, die gleichzeitig betankt werden können). Die Pumpen zur Abfüllung (Drehkolbenpumpen, ca. 50 l/min) werden elektrisch betrieben. Der Kraftstoff durchfließt die Saugleitung, die Schaugläser zur Kontrolle (Luftblasen), die Messeinrichtung mit Zählwerk und gelangt über den Gasabscheider durch den Schlauch (Voll- und Leerschlauchsystem) zum Zapfventil (Pistole). Die Gasrückführung (verdrängte benzingesättigte Luft) erfolgt durch einen Doppelschlauch (Verbindung von Tanköffnung des Kfz mit Zapfventil der Tankstelle und Erdtank).

Die Überdachung im Zapfsäulenbereich dient zum Schutz der Tankenden und zur Verhinderung des Eintrags von Regen (und Staub) in den Tank. Es gibt vor allem Tropfverluste an den Zapfpistolen sowie bei den Einzelabfüllungen, Undichtigkeiten an Leitungen und Überfüllungen.

1.3.2 Umschlagplätze

Der Tankwagen wird durch eine Schlauchleitung mit dem Tank(lager) verbunden. Hier erfolgt der Ausgleich der verdrängten Luft durch einen Kiestopf, einen Gaspendelstutzen und einen Gaspendelschlauch in den Tankwagen. Die Umfüllung des Kraftstoffes in die unterirdischen Tanks erfolgt stets im freien Fall.

Schadstoffeinträge in den Boden konnten auf den Tankstraßen und Standflächen der Tankwagen durch undichte Leitungen, Tropfverluste am Tankwagen, Handhabungsverluste beim Einrollen der Tankwagen-schläuche erfolgen.

1.3.3 Tanklager

Tanks können ober- oder unterirdisch gelagert werden. Bei oberirdischer Lagerung wurden Umfassungen aus unbrennbarem, wasser- und öldurchlässigem Material verwendet, wobei diese Art der Lagerung nicht sehr gebräuchlich war. Üblicherweise wurden Tanks (bei mehr als 1000 l) wegen der Feuergefährlichkeit der Produkte im Erdreich versenkt. Dabei waren sie in einem **Auffangraum** (auch Tankhof) mit ausreichend flüssigkeitsundurchlässiger Sohle aufzustellen. Der Auffangraum hatte meist eine Entwässerung. Bei erdverlegten Tanks kann ein zusätzlicher Stahlblechboden mit einer Hartschaumfüllung in der Nähe des Sumpfraumes vorhanden sein (SCHLATTERER, 1976).

Ein **Tank** ist, außer dem Dom mit Tankeinfüllöffnung, allseitig mindestens einen Meter mit Erde bedeckt, fünffach isoliert und mit einem Schutzanstrich gegen Rostgefahr und einer besonderen Erdung ausgestattet. Der Außenkorrosionsschutz wird durch eine Umhüllung aus Teer und Jutegewebe gewährleistet, der Innenkorrosionsschutz besteht aus armierter bzw. nichtarmierter Kunststoffdickbeschichtung mit Glasfasergewebe und zweischichtiger nahtloser Kunststoffbeschichtung. Bis in die 70er Jahre waren Tanks einwandig ausgestattet. Eine Umstellung auf doppelwandige Tanks erfolgte danach aber nur bei Reparaturen oder Neubau. Die Tanks haben eine bautechnisch ausreichende **Behälterlecksicherung** (ab 70er Jahre) nach den Richtlinien für unterirdische Einlagerung.

Ein zentraler **Befüllschacht** wurde teilweise erst Ende der 70er Jahre angebracht. Vorher wurde jeder Tank einzeln über Einfüllschächte befüllt. Teilweise war eine vakuummetrische Leckanzeige- und Lecksicherungseinrichtung sowie ein Grenzwertgeber für die **Abfüllsicherung** an Tankwagen für jeden Tank über 300 l Inhalt vorhanden (RIEHLE, 1969). Diese verhinderten das Auslaufen der Lagerflüssigkeiten (Heizöl und Diesel) im Falle einer Leckage und gaben ein optisches und akustisches Signal. Meistens waren Tauchrohre der Füllleitungen an den Tanks vorhanden, damit die Grenzwertgeber der Tankwagen ansprechen konnten. Entnahmeleitungen durften nicht an der Unterseite der Tanks angebracht werden.

Die Rohrleitungen und Behälter befinden sich im Boden in einem **Mindestabstand** von einem Meter gegenüber Gas-, Wasser-, Abwasser- und elektrischen Leitungen. Nebeneinanderstehende Tanks haben einen Abstand von mindestens 0,40 m. Der Abstand der Tanks zu Gebäuden und deren Fundamenten betrug mindestens 5 m.

Die nach oben führenden Rohre waren auf 0,10 m bis 0,25 m Höhe über der Erdoberfläche mit Blöcken aus Mauerwerk, Beton oder Eisen gegen mechanische Beschädigungen und gegen Feuer geschützt.

Einstiegschächte waren mit übergreifenden Deckeln ausgestattet, die dem Verkehr und einem Feuer sicher widerstehen konnten nach den Richtlinien für die unterirdische Einlagerung von Kraftstoff- und Ölbehältern.

Bei der Lagerung von Kraftstoffen entstehen Rückstände. So bilden sich bleihaltige Schlämme bei der Lagerung von bleihaltigen Vergaserkraftstoffen. Rückstände können auch durch Verunreinigungen oder Korrosion entstehen. Infolge unregelmäßiger Reinigung wurde jeder dritte Heizöltank durch Außen- bzw. Innenkorrosion (abhängig von den Bodenverhältnissen bzw. Lochfraß durch Kondenswasser) innerhalb von 6-8 Jahren zerstört (TÜV, 1966).

Die Gründe für das Eintreten von Schadstoffen in die Schutzgüter sind vor allem Undichtigkeiten an Leitungen und Tanks (Korrosion, Materialermüdungen, fehlerhafte Installation, Unfälle), Überfüllung der Tankanlagen, Ab- und Umfüllverluste bei der Lieferung von Kraftstoffen und der unsachgemäße Umgang mit Rückständen.

1.3.4 Leitungen

Leitungssysteme Tankwagen-Tank und Tank-Zapfsäulen stellen durch mögliche Undichtigkeiten Stellen potentieller Bodenverunreinigungen dar. Tabelle 2 fasst mögliche altlastenrelevante Stoffe aus den vier vorgenannten Bereichen zusammen.

Tab. 2: Anfallende Stoffe beim Tankstellenbetrieb im Bereich der Tanklager, Zapfsäulen, Umschlagplätze, Tanklager und Leitungen

Bereich	Abfallbezeichnung	relevante Stoffe (aus Abfällen und sonstigen Verunreinigungen)	Analyse- parameter
Zapfsäulenbereich	-	·Kraftstoff aufgrund von Handhabungsverlusten oder Leckagen	MKW
Umschlagplätze	-	·Kraftstoff aufgrund von Handhabungsverlusten oder Leckagen	MKW
Tanklager	Schlamm aus Tankreinigung	·unterschiedliche Art (je nach Herkunftszeit) ¹⁾ , bei Lagertanks für bleihaltiges Benzin kann Schlamm Bleigehalt von 0,5-1 % aufweisen ·Kraftstoff aufgrund von Handhabungsverlusten oder Leckagen	unterschiedlich ¹⁾
Druckluftherzeugung	Kompressorenkondensate	·Kompressorenöl	MKW
Leitungen (Kraftstoffförderung zwischen den Bereichen)	Filter	·Benzin, Benzol, Additive, Antiklopfmittel, Metalloxide ·Kraftstoff aufgrund von Leckagen	MKW, Pb, BTEX, MTBE
Ölverkauf	Filter	·Motorenöl, Metalloxide, Additive	MKW, Mo

¹⁾ vor 1900 - 1920: Benzin, BTEX, Metalloxide, MKW

1920-1940: Benzin, BTEX, Metalloxide, Eisencarbonyl, Methanol, MKW

seit 1930: Diesel (gesättigte KW und Aromaten), Metalloxide, Kraftstoffadditive, Fließverbesserer, MKW

seit 1940: Benzin, BTEX, Tetramethyl-, Tetraethylblei, Metalloxide, MKW, Pb

seit 1985: außerdem MTBE

1.3.5 Sonstige Anlagen

Tankstellen besaßen in jedem Falle ein Altöllager. Außerdem waren je nach Standort Wartungsanlagen bzw. Werkstätten angegliedert. Wagenpflegeeinrichtungen befanden sich im Allgemeinen außerhalb eines Tankstellenstandortes. Leichtflüssigkeits- und Ölabscheider waren je nach angegliederten Einrichtungen vorhanden oder nicht.

Folgende Anlagen sollen im Folgenden hinsichtlich ihrer Altlastenrelevanz betrachtet werden:

- Altöllager, Fasslager
- Leichtflüssigkeits- und Ölabscheider
- Wartungsanlagen
- Werkstätten
- Wagenpflege wie Wäsche, Lackkonservierung.

Altöllager: Altöl wurde meist in Behältern von ca. 400-1000 l in einem Lagerraum oder im Hofbereich bzw. in unterirdischen Tanks gesammelt.

Leichtflüssigkeits- und Ölabscheider: Leichtflüssigkeits- und Ölabscheider können Bestandteil von Entwässerungseinrichtungen (Regenwasserentwässerung) oder von angegliederten Wartungsanlagen, Werkstätten, Wagenpflegeeinrichtungen (Abwasser) an der Tankstelle sein und dienen der Reinigung von im Schlammfang gesammelten Abwässern/Flüssigkeiten. Entstehende Abwässer sind häufig mit Schmutz, Öl, Teer usw. verunreinigt. Sie werden gesammelt, einem Leichtflüssigkeits- und Ölabscheider zugeleitet und in die Kanalisation abgegeben.

Wartungsanlagen: Die altlasten- und abfallrelevanten Arbeiten zur Wartung der Kraftfahrzeuge waren unterschiedlichster Natur, angefangen vom Wechsel der Betriebsflüssigkeiten (Motoren- und Getriebeöle, Brems- und Kühlerflüssigkeiten) über Motorenwäsche und Schmierung bis zu Wartungsarbeiten an Batterien, Bremsen, Stoßdämpfern, Benzinfiltern etc.. Die technische Ausrüstung bestand im Allgemeinen aus Hebebühnen mit Öl-, Kompressoren- und Geräteraum sowie Ölauffangtrichter und Auffangwannen. Altöl stellte dabei den wichtigsten und umfangreichsten Reststoff dar, der in speziellen Tanks gelagert und fachgerecht entsorgt werden musste. Bei mangelnder Entsorgungskapazität wurde Altöl z. T. unerlaubt verbrannt. Altlastenrelevante Stellen sind vor allem die Auffangwannen.

Tab. 3: Altlastenrelevante Stoffe bei der Wartung von Fahrzeugen und im Öl-, Kompressoren- und Geräteraum (ÖKG-Raum)

Bereich/ verfahrenstechnische Herkunft	Abfallbezeichnung	relevante Stoffe (aus Abfällen und sonstigen Verunreinigungen)	Analyseparame- ter
ÖKG-Raum Ölfilterwechsel	Ölfilter-Kanister	mineralisches Grundöl, Additive, Metallteile	MKW, PCB
ÖKG-Raum Ölwechsel	Motoren- und Getriebeöle	mineralisches Grundöl, Additive, Metallteile, Kraftstoffreste, Zerset- zungsprodukte	MKW, PCB
ÖKG-Raum Wechsel der Kühlflüssigkeit	Ethylenglykole, Methanol und andere flüssige Alkohole	Glykole (seit 1945), Methanol, Ethanol	Ethylenglykol
ÖKG-Raum Wechsel der Bremsflüssigkeit	Glykolether	Di- und Triglykole, Öle, Alterungsschutzmittel	Di- und Triglykole, PCB

Fortsetzung **Tab. 3:** Altlastenrelevante Stoffe bei der Wartung von Fahrzeugen und im Öl-, Kompressoren- und Geräteraum (ÖKG-Raum)

Bereich/ verfahrenstechnische Herkunft	Abfallbezeichnung	relevante Stoffe (aus Abfällen und sonstigen Verunreinigungen)	Analyseparameter
ÖKG-Raum Wartung der Starterbatterien	Akkusäure, Bleischlamm Akkumulatorenschrott	1), seit 1920 1), seit 1950	Pb, SO ₄ ²⁻ , Sb, As, Cd, Sn gleiche Parameter
ÖKG-Raum Reifenwechsel	Altreifen		-----
ÖKG-Raum Bremsbelag- wechsel	Bremsbeläge	asbesthaltig (seit 1920)	Asbest
ÖKG-Raum Schmierung	feste fett- und ölver- schmutzte Betriebsmittel	Öle, Fette, Metall, Ver- unreinigung	MKW
Hebebühnen	Hydrauliköle ohne PCB und mit PCB	Hydrauliköl, Metall	MKW, PCB
Wartung, allgemein	Putzlappen, Putzwolle mit Öl	Öle, Fette, Schmutz, Metallpartikel	MKW
Schlamm- fang/Leicht- flüssigkeits- und Ölabscheider	Öl- und Benzinabscheider- inhalte	Benzin, Mineralöl, Sand	MKW, PCB

¹⁾ Schwefelsäure, Bleigitter (Blei-Antimon-Legierung), Bariumsulfat, Blei, Bleioxid, Bleisulfat, Legierungsbestandteile von Blei (Sb, As, Sn, Cd), Arsenverbindungen

Werkstätten: Auch Reparaturen und Karosseriearbeiten (Entrosten und Korrosionsschutz, Spachteln, Lackieren, Schweißen, Unterbodenschutz etc.) konnten Bodenverunreinigungen hervorrufen.

Tab. 4: Altlastenrelevante Stoffe in Werkstätten

Bereich/ verfahrenstechnische Herkunft	Abfallbezeichnung	relevante Stoffe (aus Abfällen und sonstigen Verunreinigungen)	Analyseparameter
Stoßdämpfer- wechsel	Stoßdämpfer und -öle	Mineralöl (dünnfl.), Po- lymerisate	MKW
Karosserie, Schweißen	Schrott	Schwermetalle	SM
Lackieren	Lackschlamm, Farbreste, Lackierereiabfälle	Lösungs-, Binde- u. Farb- mittel, Additive, seit 1920	EOX, Cd, Cr, LCKW, Pb, Zn
Spachteln, Repara- turen	Spachtelmasse, Kunstharze		
Unterbodenschutz	Bitumenreste	hochmolekulare aliphati- sche und zyklische Koh- lenwasserstoffe	PAK
Korrosions- schutzfarben	Rostumwandler, Zinkfarben, Bleimennigereste	Korrosionsschutzstoff (säurehaltig)	SM
Schlamm- fang/Leicht- flüssigkeits- und Ölabscheider	Öl- und Benzinabscheiderin- halte	Öl, Benzin, Sand, weitere Verunreinigungen	MKW, PCB, CKW

Wagenpflege: Waschhallen, Waschstraßen und Lackkonservierung waren in der DDR im Allgemeinen nicht den Tankstellen angegliedert. Es waren meist extra eingerichtete Anlagen. Bei den Waschanlagen gab es Boxen mit Wagenheber und Fließbandanlagen. Der Unterwäscherraum der Fließbandanlagen war abgeschirmt. Die entstandenen Abwässer mit Waschmittel, Benzin, Mineralöl, Reinigungs- und Entfettungsmittel, chlorierte Kohlenwasserstoffe etc. waren zusätzlich noch durch Schmutz, Öle und Teer verunreinigt. Vor der Einleitung in die Kanalisation gingen die Abwässer über einen Schlammfang und einen Ölabscheider. Analyseparameter sind neben MKW und PCB auch CKW.

1.3.6 Besonderheiten von Tankstellenarten

Die Dieselpfosten für den **Straßenfahrzeugbetrieb** haben eine ausgedehnte Grundfläche. Sie sind wegen der Betriebssicherheit nicht überdacht. Im Gegensatz dazu zeichnen sich VK - Zapfstellen durch einen geringeren Flächenbedarf aus. Die Zapfinsel ist beidseitig bedienbar und mindestens 1,20 m breit und hat meist eine Erhöhung aus Beton oder Mauerwerk (0,15 m). Der Abstand zwischen den Tankstellengebäuden und dem Tankstreifen beträgt mindestens 0,75 m. Die Zapfsäulen liegen mindestens 5 m von Kanalleitungen, Kellerschächten und Brunnen entfernt.

Für den **Flugbetrieb** werden im Linien- und Passagierflug Unterflur-Großtankanlagen mit Schläuchen und druckfesten Einlagen mit auslaugungsfesten Innengummis bzw. kompakte Kleinanlagen bis zu 100 m³ Inhalt und einem Durchfluss bis 500 l/min verwendet.

Flugzeugbetankungsanlagen auf dem Vorflugfeld bestehen aus: 10 m bis 40 m langen Zapfschläuchen auf Stahldornen mit Schlauchhaspel, selbst ansaugenden Kreislumpen mit Wechselstrommotor, Vollauskleidung der Tanks, Doppelwandbehälter, wasserdichten und begehbarem Stahldomschacht, niedrigem Zapfpult, Mikrofilter, Filter zur Wasserabscheidung, Spitzsieb im Zapfventil, Differenzdruckzeigermanometer, Motorschutzschalter, Erdungskabel, Hindernisbefeuern und Fasssauger.

In der **Landwirtschaft** kamen nicht nur Benzin und Diesel, sondern auch Benzol und Naphthalin zum Einsatz. Als Betriebsstoff wurde auch Schweröl für Traktoren und Zugmaschinen (Solaröl, Gasöl) verwendet. Die Versorgung der landwirtschaftlichen Maschinen erfolgte vorwiegend auf dem Feld (Ernte) mit mobilen Tankwagen.

1.4 Schadstoffe

1.4.1 Charakterisierung der vorkommenden Stoffe und Stoffgruppen

Kraftstoffe: Bei Kraftstoffen unterscheidet man Antriebsstoffe für den **Kraftfahrzeugbetrieb** und den **Flugbetrieb**. Die Zusammensetzung ist von der Art des Kraftstoffes und der Herkunft des verwendeten Rohöls abhängig. Das amerikanische Erdöl besteht hauptsächlich aus geradkettigen Paraffinen. Das sowjetische (Naphtha) enthält dagegen bis zu 80 % zyklische Kohlenwasserstoffe (Naphthene) (BEYER, 1962).

Das **PKW - Benzin** (Vergaserkraftstoff = VK) ist eine Sammelbezeichnung für ein Gemisch aus aliphatischen gerad- und verzweigt-kettigen Kohlenwasserstoffen mit C₅- bis C₁₂-Kohlenstoffatomen (Paraffinkohlenwasserstoffe ca. 15-30 %). Pentan, Hexan (größter Anteil), Heptan und Oktan sowie deren Isomere sind die Hauptbestandteile von Benzin. Es enthält unterschiedliche Mengen an ungesättigten (Olefinen ca. 5-10 %) und aromatischen Kohlenwasserstoffen (BTEX ca. 50 %). Folgende Anteile sind enthalten: Benzol max. 5 Vol.-%; Toluol, Xylol je >10 g/100 g; Methanol max. 3 Vol.-%; Ethylbenzol <3 g/100 g und Hexan <3 g/100 g. Charakterisiert wird PKW-Benzin vor allem durch die Analyseparameter MKW (Mineralölkohlenwasserstoffe C₁₀-C₄₀), BTEX (Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol) und die Additive (Blei und MTBE), siehe auch Tabelle 6b.

In der DDR fuhren hauptsächlich PKW mit Zweitaktmotoren (Trabant, Wartburg). Diese Kraftfahrzeuge benötigten ein Öl-Benzin-Gemisch. Mit dem enthaltenen Öl wurde der Motor geschmiert. Durch die Verbrennung des Öls kam es zu einem verstärkten Schadstoffausstoß.

Die **Dieselmotorkraftstoffe** (DK) sind schwer entflammbar Gemische aus Kohlenwasserstoffen, die aus hochsiedenden Paraffinen (C₁₀-Atomen ca. 77 %) mit Beimengungen an Olefinen und Aromaten (naphthenische Gasöle mit einem Gehalt von 15-20 %) bestehen. Des Weiteren enthält der Diesel einen geringen Anteil an PAK (5 %).

Der Gehalt an Paraffinen spielt eine entscheidende Rolle für die Zündwilligkeit (Cetanzahl). Der Gehalt aromatischer Verbindungen beeinflusst auch maßgeblich die Bildung von Ruß und PAK im Abgas. Der Schwefelgehalt beeinflusst die motorische Verbrennung nicht direkt, sondern erhöht die Partikelmasse durch die Anlagerung von Schwefeloxiden.

Das **Flugbenzin** für Ottomotoren ist ein Flugkraftstoff auf Benzinbasis. Es verfügt über einen hohen Anteil an verzweigten aliphatischen Kohlenwasserstoffen (Alkylatbenzin), die eine hohe Oktanzahl (>80 ROZ) besitzen. Flugbenzin besteht aus Isopentan (15-20 %), höhere Isoparaffine C_5 - C_{12} (30-40 %), ein- und mehr kernige aromatische KW (BTEX, PAK 5-15 %) und Crackbenzine (20-40 %) sowie geringen anderen Verbindungen (S, N und O). Die Zahl der Einzelverbindungen beträgt rund 250-300. Eine gute Qualität der Flugbenzine zeichnet sich durch eine hohe Oktanzahl, eine hohe Flüchtigkeit und einen geringen Gehalt an Schwefelverbindungen aus.

Das **Kerosin (Düsenkraftstoffe für Turbinenmotoren)** ist eine Sammelbezeichnung für die Fraktion zwischen Benzin und Dieselöl, die bei der Destillation von Erdöl anfällt. Darin sind gesättigte gerade und verzweigte Ketten von aliphatischen und zyklischen Kohlenwasserstoffen zwischen C_6 - bis C_{16} -Kohlenstoffatomen enthalten. Der Aromatenanteil liegt bei rund 15-25 % und der Höchstgehalt an Schwefel beträgt maximal 0,4 %. Das Kerosin enthält nicht so viele leichtflüchtige Anteile wie das Benzin.

Kraftstoffadditive: In Abhängigkeit vom Verwendungszweck des Kraftstoffs sind unterschiedliche Additive erforderlich. Diese Zusätze sind schon in geringer Dosierung (0,0001-2 Vol.-%) wirksam. Folgende Additive wurden verwendet.

Antiklopfmittel sind Verbindungen zur Erhöhung der Klopfestigkeit der Kraftstoffe. Am häufigsten werden Bleialkyle und Metallcarbonyle auf Eisen-, Nickel-, Kobalt- und Manganbasis (z. B. Nickeltetraacetyl) eingesetzt. Bleitetraethyl und Tetramethylblei sind die häufigsten eingesetzten Antiklopfmittel. In Flugbenzinen werden Antiklopfmittel auf Blei- und Manganbasis in Mischungen verwendet. Die beim Verbrennen von Bleitetraalkylverbindungen entstehenden Bleioxide werden durch sogenannte Scavenger (1,2-Dichlorethan und 1,2-Dibromethan) [ab 1960] im verbleiten Benzin wieder entzogen (s. auch Antipreignitionsstoffe). Methyl-tertiär-Butylether (MTBE) wird seit Mitte der 80iger Jahre überwiegend als Zusatz in Otto – Kraftstoffen zur Erhöhung der Klopfestigkeit verwendet. Es ersetzt im Kraftstoff bleiorganische Verbindungen, sowie Benzen und andere aromatische Kohlenwasserstoffe, die eindeutig als umwelt- und gesundheitsgefährdend zu bewerten sind (Umweltbundesamt 2006). Die hohe Mobilität und Persistenz führen dazu, dass in siedlungsnahen Grundwasserleitern und vor allem in Oberflächenwasser MTBE gefunden wird.

Zusätze gegen Vergaservereisung sind sowohl gefrierpunktniedrigende Stoffe (ein- und mehrwertige Alkohole wie Isopropenol, Glycerin und Glykol; Dosierung 0,02-2 Vol.-%) als auch oberflächenaktive Substanzen (organische Stickstoff- und Phosphorverbindungen wie Polybutenamine, Polyisobutylenamine, -succinimide, Glycerin und Glykolester; Dosierung 0,002-0,01 Vol.-%).

Als **Antioxidantien** kommen aromatische Amine zur Anwendung. Die Konzentration beträgt zwischen 0,001 und 0,01 Gew.-%. Es sind Derivate des Aminophenols (p-Aminophenol), Aminderivate (Phenylendiamin, Naphthylamin) sowie sterisch gehindertes Phenol.

Diese Zusätze werden eingesetzt, um additive und polymerisierende Prozesse, die die Olefine in den Kraftstoffen in Gegenwart von Sauerstoff einleiten können, zu verhindern.

Bereits kleinste Mengen (0,01 mg/l) an Metallen im Kraftstoff können katalytische Oxidationen einleiten. Deshalb werden **Metall- Deaktivatoren** (Salicylamino-, Salicylaldehydderivate) mit 10^{-4} - 10^{-3} Gew.-% eingesetzt, die die Metalle komplexieren.

Korrosionsinhibitoren sind Verbindungen, die Sauerstoff oder oberflächenaktive Substanzen abfangen. Die Dosis liegt im Bereich von 10-60 mg/l (ca. 1000 kg pro 100 m³ Kraftstoff). Es handelt sich um Ölsäureamide, Petroleumsulfonate und -phosphate (Alkylaminophosphat) und Hydrazin.

Die **Antipreignitionsstoffe** (Rückstandsumwandler) werden dem Kraftstoff zur Entfernung von Ablagerungen im Motor zugesetzt, so z. B. 1,2-Dibromethan (rund 20-35 % vom Antiklopfmittel). Des Weiteren werden organische Verbindungen auf Phosphor- und Borbasis (Kresyldiphenolphosphat, Trikresylphosphit, Trikresylphosphat, Trimethylphosphat, Trichlorethylphosphat und Ester der Bor- und Borinsäure) verwendet.

Bei den Dieselmotoren werden **Zündbeschleuniger** (Amylnitrit, Amylnitrat, Nitrobenzol) sowie **Fließverbesserer** (Polyolefine, chlorierte Polyethylene, Säureamide, Ethylen-/Propylen-Mischpolymerisate, Copolymere aus Ethylen und Vinylacetat, Polymethacrylat und alkylierte Naphthaline) eingesetzt.

Schmierstoffe: Zu den Schmierstoffen gehören die Motorenöle (Hauptmenge), die Getriebeöle, die Schmierfette und die Festschmierstoffe. Mineralöle, im Gegensatz zu den früher verwendeten pflanzlichen und tierischen Ölen, werden durch den Luftsauerstoff nicht verändert.

Motorenöle (Altöle) werden aus hochraffinierten Mineralöldestillatfraktionen hergestellt und enthalten einige wasserlösliche Verbindungen. Es handelt sich vor allem um die Triphenole, die organischen Schwefelverbindungen und die organischen Stickstoffverbindungen (Methylamine) (RUNGE, 1955). Es gibt Öle auf der Grundlage von Paraffin, Naphthen und Asphalt.

Folgende **Schmierstoffadditive** mit den jeweiligen Inhaltsstoffen werden verwendet:

- Oxidationsinhibitoren : organische S-, P- und N-Verbindungen
- Detergentien : metallorganische Verbindungen
- Stockpunktserniedriger : Kondensationsprodukte von Naphthalin
- Viskositätsverbesserer : Olefine

Weitere Betriebsstoffe können in der näheren Umgebung von Werkstätten, Tankstellen und Flugfeld gefunden werden, (INFU, 1990).

1.4.2 Zusammenfassung der altlastenrelevanten Stoffe und Stoffgruppen und deren Zuordnung zu Analyseparametern

Tab. 5: Altlastenrelevante Stoffe und Stoffgruppen bei Tankstellen und deren Analyseparameter

Stoffgruppe	Stoff	Inhaltsstoffe	Analyseparameter
Kraftstoffe			
	Vergaserkraftstoff (PKW-Benzin)	<ul style="list-style-type: none"> · Gemisch aus aliphatischen gerade- und verzweigt-kettigen KW · aromatische KW sind mit ca. 50% enthalten 	MKW BTEX
	Dieselmotorkraftstoff (DK)	<ul style="list-style-type: none"> · schwer entflammbares Gemisch aus KW mit hochsiedenden Paraffinen (80%), Olefinen und Aromaten (ca. 15-20%) und PAK (ca. 5%), (etwa halber Anteil an Aromaten gegenüber Vergaserkraftstoff, aber größerer Anteil an PAK) 	MKW, BTEX, PAK (z. B. Phenanthren, Acenaphthen)
	Flugbenzin	<ul style="list-style-type: none"> · Benzin mit hohem Anteil an verzweigten aliphatischen KW · Isopentan ca. 15-20% · höhere Isoparaffine ca. 30-40%, · aromatische KW ca. 5-15% · Crackbenzine ca. 20-40% 	MKW BTEX, PAK
	Kerosin	<ul style="list-style-type: none"> · Fraktion zwischen Benzin und Diesel mit gerade- und verzweigt-kettigen, aliphatischen und zyklischen KW · Aromaten sind zu ca. 15-25% enthalten (PAK: 5-15%) 	MKW BTEX, PAK
Kraftstoffadditive			
	Antiklopfmittel	In Normalbenzin, Super verbleit, VK (Vergaserkraftstoff): Bleialkyle und Metallalkyle (am häufigsten: Bleitetraethyl und Tetramethylblei) im unverbleiten Superbenzin: Methoxymethylpropan (Methyl-tert-butylether, MTBE)	Blei MTBE
	Stoffe gegen Vergaservereisung	<ul style="list-style-type: none"> · Tenside (organische Stickstoff- und Phosphorverbindungen) · gefrierpunktniedrigende Stoffe (Alkohole) 	oberflächenaktive Stoffe
	Antioxidantien	· aromatische Amine	-----
	Metall- Deaktivatoren	· Salicylamino-, Salicylaldehydderivate	-----
	Korrosionsinhibitoren	· Ölsäureamide, Petroleumsulfonate und -phosphonate, Hydrazin	-----
	Antipreignitionsstoffe (Rückstandsumwandler)	<ul style="list-style-type: none"> · 1,2-Dichlorethan und 1,2-Dibromethan (sogenannte Scavenger), · organ. Verbindungen auf Phosphor- und Borbasis 	CKW

	Zündbeschleuniger (bei DK) Fließverbesserer (bei DK)	· Amylnitrit, Amylnitrat, Nitrobenzol · Polyolefine, chlorierte Polyethylene, Säureamide, Naphthaline,...	-----
Schmierstoffe			
	Motorenöle (Hauptmenge)	· mit Triphenolen, organischen Schwefel- und Stickstoffverbindungen	MKW
	Getriebeöle		MKW
	Schmierfette		MKW
	Festschmierstoffe		MKW
Schmierstoffadditive			
	Oxidationsinhibi- toren	· organische Schwefel-, Stickstoff- und Phosphor- verbindungen	-----
	Detergentien	· metallorganische Verbindungen	-----
	Stockpunktser- niedriger	· Kondensationsprodukte von Naphthalin	-----
	Viskositätsverbes- serer	· Olefine	-----
weitere Betriebsstoffe			
	Bremsflüssigkeit	· Mischung auf Glykolbasis	Glykol
	Alterungsschutz- mittel	· Borax, Phosphate, Sorbit- und Pyrrolidonderivate, Triethanolamin, p-Phenylendiamin	-----
	Schmierstoffe für Bremsen	· Rizinusöl oder Produkte mit Glykolen	-----
	Akkusäure	· Schwefelsäure	SO ₄ ²⁻
	Kaltreiniger zur Entfettung	· Tetrachlorethen, Trichlorethen, Waschbenzin, 1,1,1-Trichlorethan, Petroleum	CKW
	Kühlflüssigkeit	· Glykol, Ethanol, i-Propanol, Methanol	Ethylenglykol
	sonstige	· Bitumen, Bleimennige, Lacke, Zinkfarbe, Spachtelmassen, Harze	-----
	Reinigungsmittel (Flugzeuge)	· Schaumfix, Petroleum, Trichlorethylen	CKW
	Enteisungsmittel für die Rollbahn	· ein- und mehrwertige Alkohole	-----

2 Hinweise zur Altlastenbehandlung

2.1 Altlastenrelevanz

Der Umgang mit Mineralölprodukten, die ein Stoffgemisch aus Einzelkomponenten unterschiedlicher Toxizität darstellen, führte zu einer Belastung der Umwelt. Mit zunehmender Zahl betriebener Kraftfahrzeuge in den 20er Jahren stieg die Altlastenrelevanz und erhöhte sich ab dem zweiten Weltkrieg durch zunehmende Umsatzzahlen nochmals drastisch.

Der jahrelange Betrieb einer Tankstelle führte aus folgenden Gründen zu einer Gefährdung für Mensch und Umwelt:

- Handhabungsverluste von Kraft- und Betriebsstoffen
- Tanküberfüllungen
- Leckagen an Tanks und Leitungssystemen
- Ablagerung von Betriebsstoffen und Abfällen
- Havarien.

Dabei war die unsachgemäße Ausführung von Arbeiten mit Kraft- und Betriebsstoffen (Handhabungsverluste, z. T. Tanküberfüllungen) die Hauptursache für den Eintrag von Schadstoffen in die Umwelt.

Hauptsächlich kam es zu Kontaminationen des Bodens durch die o. g. Vorgänge. Mineralöle können im **Boden** horizontal und vertikal versickern. Bei einem gleichmäßigen porösen Medium versickert das Mineralöl unter der Wirkung der Schwerkraft von der Oberfläche aus vorwiegend in vertikaler Richtung. Ist der

Boden horizontal unterschiedlich geschichtet, so wird sich das Mineralöl an der Schichtgrenze in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Durchlässigkeiten verstärkt auch horizontal ausbreiten.

Die Versickerungsgeschwindigkeit ist abhängig von den Bodenkennwerten (Kornverteilung, Lagerungsdichte / Porosität, Feuchtigkeitsgehalt, mineralische Beschaffenheit und kinematische Viskosität) und den Flüssigkeitskennwerten (Viskosität und Dichte). Dabei ist der Einfluss der Porosität auf den Durchlässigkeitsfaktor k_f sehr viel größer als der des Feuchtigkeitsgehaltes (KROLEWSKI, 1961). Mineralölprodukte mit einer geringen Viskosität (Kerosin, VK und DK) stellen durch die höhere Versickerungsgeschwindigkeit eine größere Gefahr dar als Heiz- oder Schmieröl.

Im Bereich sandiger Böden können die Versickerungsgeschwindigkeiten von Vergaserkraftstoffen bis zum 10fachen des Wertes für Wasser betragen (KROLEWSKI, 1961). Mineralöle setzen das Quellvermögen bindiger Erdstoffe gegenüber Wasser herab. Damit wird das Verhältnis der Versickerungsgeschwindigkeiten von Kraftstoffen zu Wasser in bindigen Böden kleiner (OTTO, 1961).

Ein großer Teil des in den Boden eingedrungenen Öles haftet in den Poren zwischen den Bodenteilchen. Durch die langsame Abgabe des Öles halten Verunreinigungen meist jahrelang an. Humusreiche und trockene Böden können viel Öl festhalten. Mit steigender Bodenfeuchte nimmt das Rückhaltevermögen (Sorptionsvermögen) des Bodensubstrats für Mineralölprodukte ab, ebenso mit der Zunahme des Kiesanteils gegenüber dem Sandanteil. Es kann damit gerechnet werden, dass rund 10 % des Hohlraumes für den Rückhalt des Öles benutzt werden. Verringerungen der Konzentrationen erfolgen durch chemische Umsetzungen, Verdunstung, Auswaschung, Lösungsvorgänge und mikrobiellen Abbau.

Biologisches Abbauverhalten im Boden: Organische Stoffe wie Kraftstoffe sind prinzipiell biologisch abbaubar, allerdings in Abhängigkeit von der Art der Schadstoffe, der Konzentration und den Milieubedingungen (Bodenstruktur, Temperatur, Vorhandensein von Sauerstoff, Wasser, Hemmstoffen, u. a.) mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

Verbindungen mit C_{10} bis C_{16} ($C_{16} H_x$) werden leichter angegriffen als niedrigere Homologe. Bei aliphatischen Kohlenwasserstoffe und langen, unverzweigten Ketten erfolgt ein schnellerer Abbau als bei zyklischen oder aromatischen Verbindungen. Das heißt, Benzine werden im Allgemeinen schneller als Heiz- oder Dieselöl, diese wiederum schneller als Schweröl angegriffen und abgebaut.

Der Abbau an Kohlenwasserstoffen erfolgt erst in großer Menge, wenn Mischkulturen von Mikroorganismen vorliegen, wobei etwa 100 Arten von Bakterien aliphatische, alizyklische und aromatische Kohlenwasserstoffe als einzige Kohlenstoffquelle benutzen. Phosphate, Mangan- und Zinkverbindungen fördern das Wachstum der mineralölzersetzenen Bakterien. Schwefelwasserstoff hemmt dagegen das Wachstum der Bakterien, da es ein Enzymgift ist. Beim Abbau werden die Ketten oder Ringe aufgespalten. Der vorhandene Kohlenstoff des ursprünglichen Schadstoffes wird in die Zellsubstanz der Mikroorganismen (Eiweiß) eingebaut oder als Kohlendioxid veratmet. Die optimale Temperatur für den Abbau liegt zwischen 25 und 40 °C und der pH-Wert zwischen 6 und 8 (FUCHS, 1961).

Man unterscheidet die biotischen Abbaumechanismen unter aeroben Bedingungen (chemische Zersetzung der Stoffe durch aerobe Bakterien zu CO_2 und H_2O mit Sauerstoffschwund und eventueller Reduzierung der Sauerstoffsatzquellen im Boden) und anaeroben Bedingungen (unter Sauerstoffmangel wird der Wasserstoff den reduzierten Kohlenwasserstoffen entzogen und eine Zersetzung durch Anaerobier möglich).

Von den altlastenrelevanten Schadstoffgruppen nach Tabelle 4 sind vor allem PAK und die CKW gut akkumulierbar, damit schwer bioverfügbar und lange im Boden nachweisbar.

Ist die Menge, die in den Boden eindringt, so groß, dass das Bodensubstrat und die Bodenporenräume das Mineralöl nicht mehr aufnehmen können, gelangt es in das **Grundwasser**. Je nach Eigenschaften des eindringenden Stoffes befindet sich dieser Stoff entweder auf der Grundwasserbasis (Dichte größer als Wasser), schwimmt auf der Grundwasseroberfläche (Dichte geringer als Wasser) bzw. löst sich zum Teil im Grundwasser und breitet sich entsprechend des Grundwasserabstroms aus. Es kann auch eine Ausbreitung im Kapillarsaum des Grundwasserleiters (ölige Phase) erfolgen.

Bei großen Versickerungsmengen wird je nach Zeit und Abstand der Grundwasseroberfläche von der Oberfläche des Geländes bei allen sandigen und kiesigen Böden der Kapillarsaum des Grundwassers erreicht. Das Öl schwimmt nicht auf der freien Grundwasseroberfläche, sondern bewegt sich im Kapillarsaum in Abhängigkeit vom Boden-Wasser-System in einer bestimmten Höhe.

Die Fließbewegung der Schadstoffe im Grundwasser und in dem darüber liegenden Kapillarsaum ist nach dem Abschluss der oberflächigen Versickerung relativ langsam. Es können aber bis zu 40 km weite Stre-

cken zurückgelegt werden. Die Grundwasserspiegelschwankungen verteilen das Öl zusätzlich noch vertikal im Kapillarraum und es besteht die Gefahr neuer Auswaschungen.

Die Hauptgefahr für das Grundwasser durch Mineralölprodukte besteht in der Geschmacks- und Geruchsbeeinträchtigung. Ist Wasser mit Mineralölprodukten auch in niedrigen Verdünnungsgraden verunreinigt, so ist es weit vor dem Erreichen der Gefahrgrenze geschmacklich und geruchsmäßig verdorben (für Trinkwasserzwecke ungeeignet). Die Geschmacks- und Geruchsbeeinträchtigungen verlaufen unterschiedlich. Mögliche Beimengungen (Schwefel im Rohöl oder Blei in den Vergaserkraftstoffen) verstärken die geschmackliche Beeinträchtigung. Eine weitere Gefahr besteht in der geringen biochemischen Abbaubarkeit der Mineralölprodukte im Grundwasser. Die Besiedlungswerte eines Grundwasserleiters mit Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Algen und Protozoen) sind geringer als im Boden, ebenso das Selbstreinigungsvermögen. Damit ergeben sich lange Nachweiszeiten für Mineralölprodukte im Grundwasser.

Gelangen Mineralölprodukte in ein **Oberflächenwasser** (Direkteinleitung oder Abspülung), so kann die Biozönose erheblich gestört werden. Viele Mineralölprodukte weisen nur eine geringe Fischtoxizität auf, haben aber auf Kleinstlebewesen eine hohe Toxizitätswirkung. Beim Eintrag bildet sich meist eine Ölschicht auf der Wasseroberfläche aus. Die Ausbreitung erreicht schnell große Ausmaße, die vom Mineralölprodukt, der Temperatur des Wassers, dem Salzgehalt, der Oberflächenspannung sowie der Belastung mit Wasserinhaltsstoffen abhängig ist. Dabei sind Schmier- und Heizöle stärker an lang anhaltenden Verschmutzungen beteiligt als leicht flüssige Mineralölprodukte, so zum Beispiel Benzin und Benzol. Diese verdunsten schnell an der Wasseroberfläche. Durch die Ölschicht wird der Sauerstoffeintrag in das Oberflächenwasser verhindert, so dass die Selbstreinigung des Gewässers gemindert wird, Wasservögel können flugunfähig werden. Weiterhin ist die Uferfiltration erheblich beeinträchtigt.

Luftbelastungen an stillgelegten Tankstellen durch Ausgasungen von leichtflüchtigen Stoffen sind bei Eingriffen in den Boden, in Tankanlagen, Ölabscheider, Leichtflüssigkeitsabscheider und Rohrleitungen oder bei der Beseitigung von Gebäudeteilen und Fundamentplatten möglich.

2.2 Gefährdete Schutzgüter und relevante Pfade

Folgende Schutzgüter können gefährdet sein (Reihenfolge entsprechend der Gefährdung):

- Boden
- Grundwasser
- Oberflächenwasser
- Luft.

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

2.3 Gefährdungsabschätzung nach dem BBodSchG

Aufgrund der vorkommenden Stoffe und des vorhandenen Gefährdungspotentials für die Schutzgüter ist bei Tankstellen immer eine Gefährdungsabschätzung durchzuführen.

2.3.1 Verdachtsfallerfassung und Formale Erstbewertung

Die Verdachtsfallerfassung und Erstbewertung erfolgt nach SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1997) im Sächsischen Altlastenkataster (SALKA). Folgende Kriterien sind bei der Erfassung der Tankstellen besonders zu beachten:

(7) **Art der Verdachtsfläche:** Tankstellen sind prinzipiell als Altstandorte zu bewerten mit den entsprechend Punkt 1.3 genannten Bestandteilen. Ablagerungen in verschiedenen Bereichen werden im Allgemeinen mit innerhalb der Standortbewertung erfasst. Bei großen betrieblichen Ablagerungen kann eine Bewertung nach "Altstandort mit Altablagerung" oder eine zusätzliche Bewertung nach "Altablagerung" vorgenommen werden.

(15) **Fläche/Volumen:** Die Mindestgröße eines Tankstellengrundstücks beträgt 800 m². Mit der Unterbringung von Dienstleistungen und Verkaufsräumen sind es mehr als 1 000 m² und bei Großanlagen (mit Nachtankboxen, Abstellflächen, Wartung usw.) über 2 000 m². Anzugeben ist aber nicht die gesamte Betriebsfläche, sondern die (wahrscheinliche) Kontaminationsfläche. Zur Kontaminationsfläche sind zu rechnen: Tanksäulenbereich mit Tankflächenbereich (für Einzelverbraucher) + Betankungsbereich (Lieferfahrzeuge) + Lagerbereich (Erdtanks, Altöl etc.) + Wartungsbereich* + Wagenpflegebereich* + Havariebereich*. Die kontaminierte Fläche ist für den Einzelfall abzuschätzen.

* wenn vorhanden

(18) **Sohllage zum Grundwasser:** Es ist der Abstand der Grundwasseroberfläche zum tiefsten bekannten Schadstoffpunkt anzugeben. Wenn keine Kenntnis über den tiefsten Schadstoffpunkt vorhanden ist, gilt als Bezugspunkt die Tiefe von unterirdischen Anlagen wie, z. B. der Lagertanks. Sind keine unterirdischen Anlagen vorhanden, wird die Geländeoberfläche herangezogen.

(20) **Einordnung in Branchenschlüssel und Belastungsstufe:**

Branchenschlüssel	Branche	Belastungsstufe
2080	Tankstellen	55
5090	Tanklager (milit.)	45
	artverwandte Branchen:	
2150	Autoreparaturwerkstätten	33
2070	Handel und Lagerung von Mineralölprodukten und Altöl	55
2160	Autolackierereien	55
2440	Lagerung und Handel von Hydraulikölen	55
2040	Flugplätze	44
4010	Agrarflugplatz	44
5080	Feldflugplätze	45

2.3.2 Historische Erkundung und Bewertung (Beweisniveau 1)

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

Stoffgefährlichkeit - r_0 :

An Tankstellen wird mit Stoffgemischen umgegangen, die sehr unterschiedliche Toxizitäten aufweisen.

Die Bewertung der Stoffgefährlichkeit erfolgt anhand der Humantoxizitätswerte. Die akute orale Säugetier-toxizität von Mineralölen ist gering. Aromatische Kohlenwasserstoffe stehen im Verdacht bzw. sind (wie Benzol) nachgewiesen krebserregend. Daraus ergibt sich in Abhängigkeit des Pfades und der ökotoxikologischen Bedeutung folgende Einstufung innerhalb der Sächsischen Altlastenmethodik:

- $r_0 = 0,5-6$ für Tankstellen nach Brancheneinstufung
- $r_0 = 0,5-5$ für Autoreparaturwerkstätten entsprechend Brancheneinstufung.

In Abhängigkeit von den am Standort vorhandenen technologischen Bereichen (Wartung, Pflege etc.) und damit in Abhängigkeit von den Stoffen ist eine Einstufung innerhalb des vorgesehenen Bereiches vorzunehmen. Der obere Wert $r_0 = 6$ basiert auf einer ökotoxikologischen Bewertung. Die Ökotoxizität spielt besonders im Pfad/Schutzgut Oberflächenwasser eine Rolle. Mineralöle können die gesamte Biozönose erheblich stören (siehe Punkt 2.1, Oberflächengewässer). Die Stoffgefährlichkeit ist in Abhängigkeit von der Art der Aufnahme und der Ökotoxizität dem Material SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (in Vorbereitung) zu entnehmen.

Örtliche Bedingungen, m-Werte:

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

Grundwasser - m_1

- Lage zum Grundwasser: $m_1 = 1,2$ mit Ausnahme: Tanks oder andere unterirdische Anlagen liegen im Grundwasser oder Grundwasserwechselbereich (Beurteilung der Tankunterkante bezüglich der Lage zum Grundwasser).
- Oberflächenabdeckung: Meist sind die Kontaminationsbereiche versiegelt bzw. als Betonplatten, Pflas-

ter oder Asphalt ausgebildet. Damit ist im Allgemeinen ein Schutz gegen Windverwehungen und ein erster Kontaktschutz gegeben; $\Delta m = 0$.

- Oberflächenabdichtung: Durch Überdachung bzw. Bebauung an den wesentlichen Kontaminationsherden ist ein Schutz gegen Auswaschung durch Niederschlagswasser gegeben. Bei dichter Bodenoberfläche (Versiegelung) wird das Eindringen von Kraftstoffen stark vermindert, und es kann $\Delta m = -0,1$ angesetzt werden.
- Löslichkeit - Aggregatzustand: Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der Stoffgemische sind flüssige, leicht lösliche (z. B. Aromaten >200 mg/l), lösliche (z. B. Ottokraftstoffe, leichtes Heizöl) bis schwer lösliche Stoffe (z. B. Bitumen) am Standort vorhanden. Die flüssigen und leicht löslichen Schadstoffe (Kraftstoffe, Mineralöl, Phenole, BTEX) bedingen ein $\Delta m = 0$.

Grundwasser - m_{II}

- Sorbierbarkeit: Bei Stoffgemischen ist der Stoff mit der niedrigsten Sorbierbarkeit für die Gefährdungsabschätzung heranzuziehen, das ist im Bereich von Tankstellen Phenol mit $\lg SC = 1,9$. In Abhängigkeit vom Humus- bzw. Tonanteil des am Standort vorhandenen Bodens erfolgt eine Bewertung von $\Delta m = 0$ (Anteil Humus oder Ton schwach bis mittel) oder $\Delta m = -0,1$ (Anteil Humus oder Ton stark).
- Lösungsvermittler: Benzol wirkt als Lösungsvermittler gegenüber PAK und Schwermetallen. Je nach Relevanz von PAK (vorwiegend in Dieselmotorkraftstoffen) und Schwermetallen (ab 1939 höhere Gehalte durch Zusatz von Bleialkylen) kann ein Zuschlag $\Delta m = +0,1$ gegeben werden. Sind an Tankstellen nur Vergaserkraftstoffe geführt worden, ist $\Delta m = 0$ zu setzen.
- Abbaubarkeit: Die vorhandenen organischen Stoffe können in Abhängigkeit von den Untergrundverhältnissen zum großen Teil gut biologisch abgebaut werden; $\Delta m = -0,1$.

Grundwasser - m_{III}

- Abstandsgeschwindigkeit: Diese ist abhängig von der hydrogeologischen Situation vor Ort.
- Sorption: Dies ist analog dem m_{II} - Schadstoffeintrag mit dem entsprechenden Ton- und Humusgehalt des Grundwasserleiters zu bewerten.
- Abbaubarkeit: Der biologische Abbau der organischen Schadstoffe findet prinzipiell auch im Grundwasser statt (aber geringere biologische Aktivität als im Boden); $\Delta m = -0,1$.

Grundwasser - m_{IV}

- Aufbereitungsmöglichkeiten: In einem Wasserwerk gibt es erhebliche Probleme bei der Aufbereitung des Grundwassers, das mit Mineralölprodukten verunreinigt ist. Ist keine geeignete Adsorptionsstufe (z. B. Aktivkohlefilter) vorhanden, ist $\Delta m = 0$ anzusetzen.
- Verdünnung: Die Verdünnung ist von der Konzentration an Schadstoffen und dem Dargebot an Wasser (standortspezifisch) abhängig. Außerdem spielen Löslichkeit und Dichte der Schadstoffe bei der Verteilung eine Rolle.

Boden - m_I

- Fallzuordnung: Prinzipiell können alle laut Methodik aufgeführten Fälle auftreten, hauptsächlich aber 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 folgende Schadstoffeigenschaften zu spezifizieren:

- Abdeckung: siehe Grundwasser
- Löslichkeit: Für den Stoffaustrag sind die leicht löslichen bzw. flüssigen Schadstoffe (MKW, BTEX) zu bewerten; $\Delta m = 0$.
- Flüchtigkeit: Für den Schadstoffaustrag sind die leichtflüchtigen Schadstoffe wie BTEX entscheidend. In Abhängigkeit von der Zeit (betriebener Zeitraum, Stilllegungszeitpunkt) ist einzuschätzen, ob Ausgasungen noch relevant sein können.
- Sorption: siehe Grundwasser je nach Humus- bzw. Tongehalt; $\Delta m = -0,1$ bis 0. Öl hat einen starken Einfluss auf das Sorptionsverhalten von Schadstoffen. Mit steigender Ölkonzentration kommt es zu einer schrittweisen Erniedrigung der Adsorption.
- Lösungsvermittler: je nach Stoffspektrum siehe Grundwasser.

Boden - m_{II}

Der Schadstoffeintrag in das Schutzgut Boden ist von fallspezifischen Einflussfaktoren (Hindernisse, Durchlässigkeit, Abdeckungsstärke u. a.) und der vorherrschenden geologischen Situation abhängig, kann

also hier nicht spezifiziert werden.

Boden - m_{III}

- Abbau: Die relevanten vorkommenden Stoffe können prinzipiell gut abgebaut werden. Dort, wo eine erhöhte Schwermetallbelastung (z. B. bei Werkstätten) zu erwarten ist, wird der biologische Abbau gehemmt. Folgende Einordnung ist sinnvoll:
 - Tankstellen nur mit Vergaserkraftstoff, ohne Zusatzeinrichtungen $m_{III} = 0,8$
 - Tankstellen (auch mit Diesel) $m_{III} = 0,9$ (mit Verdacht auf PAK und PCB)
 - Tankstellen mit Werkstatt $m_{III} = 1,0$ (mit Relevanz an Schwermetallen, mit Relevanz an CKW: mit steigendem Chlorierungsgrad nimmt das Sorptionsvermögen zu und damit die biologische Verfügbarkeit ab).
- Toxische Abbauprodukte: Beim Abbau von Kraftstoffadditiven oder von PAK (bei Relevanz) können toxische Abbauprodukte entstehen (z. B. bei Kraftstoffadditiven wie den Scavendern: Vinylchlorid).
- Verweilzeit: Da es sich um unterschiedliche Stoffgemische handelt, kann die Verweilzeit sehr schwanken (ungünstigster Fall: lange Verweilzeit); $\Delta m = 0$.
- Sorption/Bindungsstärke:
 - a) Bewertung bzgl. oraler Schadstoffaufnahme:
Durch unterschiedliches Sorptionsvermögen der Schadstoffe muss die Bewertung nach dem ungünstigsten Fall erfolgen. PAK haben ein hohes Sorptionspotential (längere Belastung der Böden); $\Delta m = +0,1$.
 - b) Bewertung bzgl. Bioverfügbarkeit:
Organische Stoffe sind biologisch verfügbar. PAK weisen eine hohe Sorption und deshalb eine geringere Bioverfügbarkeit als BTEX und Dieselmotorkraftstoffe auf. Mit steigendem Chlorierungsgrad der chlororganischen Schadstoffe (CKW) nimmt das Sorptionsvermögen zu.
- Wirkung: Durch die Anwesenheit organischer Schadstoffe ist eine nachteilige Wirkung auf das Pflanzenwachstum möglich (Sauerstoffschwund in der Wurzelschicht des Bodens, verminderte Bodenfruchtbarkeit, Störung der Mikroflora). Dies ist standortspezifisch einzuschätzen.

Boden - m_{IV}

- Analysenwerte für Boden: Es sind Analysen am Ort der Bodennutzung durchzuführen und die Analysenwerte anhand SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (in Vorbereitung) zu bewerten.

2.3.3 Orientierende Untersuchung und Bewertung (Beweisniveau 2)

Ergibt sich aus der historischen Untersuchung der Verdacht einer Gefährdung, so ist eine Orientierende Untersuchung mit der vor allem qualitativen Erfassung der realen Schadstoffbelastung durchzuführen. Außerdem werden für eine Bewertung chemisch-physikalische, bodenkundliche, geologische und hydrogeologische Parameter aufgenommen. Mittels Bodenproben (Schürfe, Sondierungen, Bohrungen) aus unterschiedlichen Tiefen entsprechend den Kontaminationsschwerpunkten und Bodenluftuntersuchungen ist das Schadstoffspektrum und die räumliche Schadstoffverteilung im Untergrund zu ermitteln. Da bei Tankstellen ein Belastungsschwerpunkt auf den Kohlenwasserstoffen mit erhöhtem Dampfdruck (Vergaserkraftstoffe) liegt, sind diese durch Anreicherungsprozesse in der umgebenden Bodenluft nachweisbar. Bodenluftsondierungen sind zunächst oberflächlich (1-3 m Tiefe) und im Bedarfsfall bis zum Grundwasserspiegel durchzuführen. Mit abnehmendem Dampfdruck und zunehmenden Flurabstand des Grundwassers sinkt die Nachweisbarkeit einer Grundwasserkontamination mittels Bodenluftuntersuchung. Deshalb kann die Bodenluftanalytik nicht als absolutes Verfahren zur Feststellung von Untergrundbelastungen herangezogen werden, dient aber der Erkennung von unterschiedlichen Belastungszonen (UMWELTBUNDESAMT, 1997).

Grundwasser: In der Regel sind drei Grundwasserpegel (einer im Anstrom, zwei im Abstrom) zu setzen. Das angetroffene Schichtenwasser ist in die Beprobung und Analyse mit einzubeziehen.

Boden: An den Kontaminationsschwerpunkten sind Sondierungen (Rammkernsondierungen) niederzubringen:

- Zapfsäulenbereich
- Umschlagplätze (Standflächen der Tankwagen, zentraler Befüllschacht,..)

- Tankanlagen (Tanks, Domschächte,..)
- Werkstätten, Hebebühnen, Kompressorenraum, Leichtflüssigkeits- und Ölabscheider,..
- Lager (Fasslager, Altöllager,..)
- sonstige Kontaminationsschwerpunkte.

Mindestens 1 bis 2 Sondierungen sind mehr als 1 m unter Tankunterkante durchzuführen. In Abhängigkeit von der organoleptischen und sensorischen Ansprache sind größere Tiefen zu untersuchen (i.d.R. 3 bis 5 m, tiefere Kontaminationen sind die Ausnahme). Bei der Probennahme sind eine meterweise Beprobung beim homogenen Aufbau des Untergrundes (Mischprobe je Meter) und eine getrennte Beprobung bei lithologischen Unterschieden im Bodenaufbau notwendig.

In DK - haltigen Böden dominieren aliphatische Kohlenwasserstoffe, Benzolderivate spielen eher eine untergeordnete Rolle. In VK- haltigen Böden dominieren Benzolderivate, MKW - Belastungen sind meist geringer als bei DK. PAK - Belastungen sind bei DK- und VK - belasteten Böden nachweisbar, eine grundsätzliche Aussage, welche Böden eine größere PAK - Belastung erwarten lassen ist nach STACHEL (1993) nicht möglich.

Die Tabellen 6a und b enthalten die zu bestimmenden Parameter für die Orientierende Untersuchung (OU) sowie eine mögliche Parametererweiterung für die Detailuntersuchung (DU).

Tab. 6a: Analysenplan mit Grundparametern für die OU und die DU

Physikalisch/chemische Grundparameter	Wasser ^{a)}	Boden ^{b)}	Luft ^{c)}
- Geruch, Farbe, Aussehen, Trübung usw.	X	X	X
- pH-Wert, LF, Temp.	X		
- Trockensubstanz bzw. Abdampfdruckstand	X	X	
- Glührückstand	X	X	
- O ₂ - Gehalt	X		X
- N ₂ , CO ₂ , CH ₄			X
- Gesamthärte	X		
- CSB oder TOC	X		

Tab. 6b: Analysenplan mit branchenspezifischen Parametern für die OU und die DU

Branchenparameter	Wasser ^{a)}			Boden ^{b)}	Luft ^{c)}	Hinweise	BN ^{d)}
	1)	2)	3)				
- Chlorid	X					Streusalz, Asche - Öl	2-3
- Sulfat	X		X			Akkusäure	2
- Eisen/Mangan	X		X	X ^{1,3)}		Abrieb in Schlämmen	2-3
- Nickel			X	X ³⁾		Organoverbindg. im Kat.	3
- Bor		X	X	X ²⁾		Schmierstoffadditiv	3
- Blei	X	X	X	X		Akkusäure, Additiv	2-3
- Zink	X			X ¹⁾		Rostschutz	2
- KW ⁵⁾	X	X	X	X		Kraftstoff	2-3
- leichtflüchtige KW ⁶⁾	X	X	X	X	X	Kraftstoff	2-3
- BTEX ⁷⁾	X	X	X	X	X	Kraftstoff	2-3
- MTBE	X	X				Kraftstoffadditiv	2-3
- AOX/EOX	X	X	X	X		Kraftstoffadditive	2-3
- lfl.HKW-einzel ⁶⁾	X	X	X	X	X	Additiv - (Dichlorethan)	2-3
- Alkohole (ein- und mehrwertig)	X	X	X	X ^{1,3)}		Glykol, Kühlmittel	2-3
- anionische Tenside			X	X ³⁾		Schmierstoffzusätze	3
- aromatische Amine		X	X	X ³⁾		Schmierstoffzusätze	3
- PAK ⁸⁾	X		X	X		Bitumen, DK	2-3
- Phenolindex ⁹⁾		X	X	X ³⁾		Schmierstoffzusätze	3
- PCB/PCT ¹⁰⁾	X	X	X	X ^{1,3)}		Hydrauliköl	2-3
- organische Säuren		X	X	X ^{2,3)}		Naphthene, Carbonsäure	3
- Extraparameter		X	X		H ₂ S	Chlorparaffin, Molybdän	3

- a) für Grundwasser, Sickerwasser, Oberflächenwasser und Bodeneluat
- b) Matrix - Originalmaterial des Bodens und des Abfalls
- c) Matrix - Bodenluft und Deponiegas (aus allen Sondierlöchern im VK - Bereich und alten Fundamentplatten)
 - 1) Tankstellen, Werkstätten, Betriebshöfe
 - 2) Lagerung von Mineralöl und Mineralölprodukten (Großhandel)
 - 3) Altölaufbereitung
 - 4) Beweismittel, BN 2 = Orientierende Untersuchung, BN 3 = Detailuntersuchung
- 5) Kohlenwasserstoffe (MKW)– neu: Verfahren nach Lösemittelextraktion und GC, DEV H 53; EN ISO 9377
Bestimmung von C₁₀-C₄₀; IR - Spektroskopie nach DIN 38409 H18 (1981) Anfang 2000 zurückgezogen.
Auswertung von Mineralöl-Gaschromatogrammen siehe HLOG (2005)
Es gibt Kohlenwasserstoffe, die weder mit der BTEX – Bestimmung noch mit der MKW – Bestimmung (Summe Kohlenwasserstoffe) erfasst werden. Dafür kann ein Summenparameter C₆-C₁₀ gebildet werden bzw. die Methode nach Hessen angewendet werden, HLOG (2000).
Probennahme: leichter als Wasser - bewegt sich im Kapillarsaum (LNAPL)
- 6) Proben bei leichtflüchtigen Komponenten (kenntlich am Geruch) und bei Notwendigkeit LHKW- Nachweis (GC und EC - Detektion), nach DIN 38407 Teil 4, DIN 38413 Teil 2, (1988)
- 7) BTEX - Aromaten (Kapillargaschromatografie und Flammenionisationsdetektion),
nach DIN 38407 Teil 9, Bestimmung von BTEX - Aromaten
Probennahme: leichter als Wasser - im Kapillarraum
- 8) PAK nach EPA, DIN 38409 H 23, nach Methode Deutsche Einheits Verfahren S4
Probennahme: schwerer als Wasser - Ausbreitung entlang der Sohle (DNAPL)
- 9) Phenolindex - nach DIN 38409 H16
Unterschied zu Einzelkomponente (Phenol.); erst bei Notwendigkeit, wenn Phenolindex sehr hoch
- 10) schwerflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe und polychlorierte Biphenyle (PCB) - Bestimmung nach
DIN 38407, DEV, F2; nur polychlorierte Biphenyle (PCB) nach DIN 51527, Teil1, (1987) oder nach Ballschmitten

FORMALE BEWERTUNG

Die formale Bewertung ist analog der Bewertung nach der Historischen Untersuchung (Punkt 2.3.2) mit entsprechend analytisch unteretzten Werten durchzuführen. Nachfolgend werden nur die Besonderheiten in der Stufe der Orientierenden Untersuchung herausgestellt.

Stoffgefährlichkeit - r₀:

Die formale Bewertung wird mit dem höchsten r₀-Wert (der als relevant (>Prüfwert bzw. >Besorgniswert) nachgewiesenen Stoffe) durchgeführt.

Grundwasser

- Die Stoffeigenschaften sind entsprechend der als relevant ermittelten Stoffe zu spezifizieren.
- Analysenwerte Grundwasser/Eluate: Orientierungswerte bei der Bewertung sind die Prüf-, Maßnahmen- und Orientierungswerte entsprechend SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2003, 2005 die auf eine Trinkwassernutzung abstellen.

Boden

- Die Stoffeigenschaften sind entsprechend der als relevant ermittelten Stoffe zu spezifizieren.
- Analysenwerte für Boden: Die Bodenmesswerte am Ort der Nutzung sind mit den nutzungsabhängigen Prüf- Maßnahmen- und Orientierungswerten entsprechend SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE zu vergleichen.

Weisen die Ergebnisse der Orientierenden Untersuchung auf eine Gefährdung von Schutzgütern hin, ist eine Detailerkundung zur Abgrenzung des Schadensherdes und der Schadstofffahne durchzuführen.

2.3.4 Detailuntersuchung und Bewertung (Beweisniveau 3)

In der Stufe der Detailuntersuchung (BN 3) wird durch weitergehende Untersuchungen und einen direkten Vergleich von Schadstoffkonzentrationen mit den Hintergrund-, Prüf- und Maßnahmenwerten eine Aussage darüber getroffen, ob eine Altlast vorliegt und Sanierungsmaßnahmen einzuleiten sind, ein Monitoring notwendig wird oder kein Handlungsbedarf erforderlich ist (keine Altlast). Zur Bewertung ist SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (in Vorb. c) heranzuziehen.

Bei der Entscheidung für eine Sanierung einer Tankstelle ist meist der Gehalt an MKW sowie der an Monoaromaten ausschlaggebend, PAK treten dagegen weniger als Entscheidungskriterium in Erscheinung.

Im Ergebnis der Detailuntersuchung sind bei Sanierungserfordernis in Abhängigkeit von der hydrogeologischen Situation und der Grundwassernutzung vorläufige Sanierungsziele zu benennen. Entsprechend STACHEL (1993) liegen bisher realisierte Sanierungszielwerte in den folgenden Bereichen:

- | | | |
|---|---|--|
| • mobile, höher siedende KW (Schmieröl) | = | 1000 - 5000 mg/kg, |
| • mobile, niedriger siedende KW (DK, Kerosin) | = | 500 - 2000 mg/kg, |
| • sonstige KW (VK) | = | 50 - 500 mg/kg, |
| • BTEX | = | 2,5 - 30 mg/kg, |
| • Benzol | = | 0,5 - 2 mg/kg, |
| • MTBE | = | 20 - 400 µg/l für Grundwasser
(EPA, 2005; AEHS, 2003) |

2.4 Sanierungsuntersuchung

Hat sich im Ergebnis der abschließenden Gefährdungsabschätzung ein Sanierungsbedarf ergeben, ist als nächster Schritt eine Sanierungsuntersuchung durchzuführen.

In Abhängigkeit von den Sanierungszielen, den betroffenen Schutzgütern, der Nutzung, den standortspezifischen Verhältnissen sowie den rechtlichen, ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen wird die günstigste Maßnahme bzw. Maßnahmenkombination zur Gefahrenabwehr ermittelt. Die Sanierungsuntersuchung dient der zuständigen Behörde und dem Verpflichteten als Entscheidungsvorbereitung über Art und Umfang der im Einzelfall durchzuführenden Sanierungsmaßnahme.

Die Sanierungsuntersuchung umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Projektvorbereitung
- Grundlagenermittlung
- Ergänzende Standortuntersuchungen
- Festlegung von Sanierungszonen
- Erarbeitung standortspezifischer Sanierungsszenarien
- Fachliche Bewertung der Sanierungsszenarien
- Durchführung der Kostenschätzung
- Nutzen-Kosten-Untersuchung
- Konkretisierung der Sanierungsziele
- Entscheidungsprozess
- Erarbeitung des Sanierungskonzeptes.

Der Sanierungsentscheid (Entscheidungsprozess) umfasst die verbindliche Festlegung der endgültigen Sanierungsziele und des Sanierungsszenarios, auf dessen Grundlage das Sanierungskonzept erarbeitet wird. Grundsätzlich sind alle Arbeitsschritte abzuarbeiten, jedoch ist im Einzelfall ein gewisses Maß an Flexibilität hinsichtlich der Bearbeitungstiefe erforderlich.

2.5 Sanierung

Prinzipiell ist der Einsatz aller Sanierungsverfahren, d. h. Sicherungs- und Dekontaminationsmaßnahmen, sowie weiterer Gefahrenabwehrmaßnahmen, wie Umlagerung oder Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen, denkbar.

Beim Aushub von kontaminiertem Material ist besonders zu beachten, dass leichtflüchtige Stoffe entweichen können und so eine unkontrollierte Schadstoffverlagerung vom Boden in die Luft erfolgt. Schadstoffspezifische Sicherungsmaßnahmen, wie eine hydraulische Sperre etc., werden hier nicht extra aufgeführt. Im Folgenden sollen Sanierungsverfahren vorgestellt werden, die insbesondere für Tankstellenstand-

orte geeignet sind. Die Reihenfolge der Nennung entspricht der derzeitigen Bedeutung. Verfahrenskombinationen sind möglich.

2.5.1 Biologische Verfahren

Prinzip: Bei diesem Dekontaminationsverfahren findet ein vollständiger (Mineralisation) oder teilweiser (Transformation) mikrobieller Schadstoffabbau statt. Mineralölkontaminationen sind ein Gemisch aus biologisch besser und schlechter abbaubaren Komponenten.

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 (Baumrinde,...), speziell für den Erdölabbau gezüchteten Bakterienkulturen sowie Wasser versetzt und begast bzw. belüftet (Mietenverfahren bzw. Bioreaktor). Eine Einlagerung des Bodens erfolgt meist schichtenweise.

Reaktorverfahren stehen noch am Beginn ihrer Entwicklung, gelten jedoch grundsätzlich als besser zu kontrollierende Systeme, die einen schnellen Sanierungserfolg durch verbesserte Materialhomogenisierung gewährleisten.

Auch mikrobiologische in-situ-Sanierungen bei Tankstellen sind bei günstigen Bedingungen (Schadstoffkonzentration, Bodenverhältnisse) ein anerkanntes Verfahren, insbesondere bei flüchtigen Kontaminationen, deren Aushub nicht möglich ist (Verbauung, Tiefenlage).

Eignung/Anwendung:

- vor allem für Böden bzw. Grundwasser mit Erdölprodukten in mittleren Konzentrationen
- Hohe Konzentrationen von PAK oder CKW beschränken die Effizienz (z. B. bis zu Konzentrationen von ca. 1 600 mg/kg PAK geeignet).
- Die geologisch-hydrogeologischen Eigenschaften 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, homogener Untergrund
 - Möglichkeiten zur Errichtung eines Spülkreislaufes
 - Verhinderung der Schadstoffausbreitung in die Umgebung, z. B. durch eine begleitende Grundwasserhaltung
- Eine Zugabe von mineralölabbauenden Bakterien ist ohne sicheren Nachweis der Notwendigkeit nicht sinnvoll, da bei günstigen Milieubedingungen der Selbstreinigungseffekt wirkungsvoll funktioniert.
- Ex-situ-Verfahren sind dann kritisch zu bewerten, wenn die Böden mit leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen verunreinigt sind, da mit dem Aushub eine Schadstoffverfrachtung verbunden ist.

Mikrobiologische Abbauprozesse zählen derzeit bei Tankstellen zu den am häufigsten angewandten, kostengünstigen Sanierungsverfahren. Vielfach sind Kohlenwasserstoffgehalte von 200-500 mg/kg TS und 0,1-0,2 mg/l im Eluat des biologisch behandelten Bodens erzielt worden (UMWELTBUNDESAMT, 1997).

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. Es erfolgt eine Aufkonzentration von Schadstoffen.

Das ungelöste Öl wird abgeseiht, Benzol und LHKW werden gestrippt und an Aktivkohle adsorbiert.

Stand der Technik: Verfahren mit einer chemisch/physikalischen und/oder biologischen Abwasseraufbereitung und Abluftreinigung.

Eignung/Anwendung:

- gut geeignet bei Böden wie Kies, Mittelsand, schluffigem Sand
- bei Feinkornanteil >25 Gew.-% mit Partikeln <0,02 mm keine Anwendung möglich
- gut geeignet für die Schadstoffe BTEX, aliphatische und höher siedende KW (z. B. Dieselöl)
- mit Einschränkung geeignet bei der Kontamination mit PAK.

2.5.3 Thermische Verfahren

Prinzip: Dekontaminationsverfahren mit dem Ziel der Zersetzung bzw. Oxydation organischer Schadstoffe. Es erfolgt eine Prozessführung als Entgasung, Vergasung oder Verbrennung. Die wesentlichen Prozessschritte sind die Verdampfung/Verbrennung, Nachverbrennung und Abgasreinigung.

Man unterscheidet:

- Hochtemperaturverfahren mit Temperaturen >900 °C (für PAK, PCB,...),
- Mitteltemperaturverfahren mit Temperaturen 300 bis 650 °C (für KW, bestimmte PAK),
- Niedertemperaturverfahren mit Temperaturen <300 °C (für BTEX, LHKW, bestimmte KW).

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

Eignung/Anwendung:

- bei hohen Konzentrationen an organischen Schadstoffen und bei schwerflüchtigen Verbindungen mit Verdampfung bis 550°C (Anteile von Vergaserkraftstoff, Heizöl, PAK, PCB, BTEX,...)
- folgende Temperaturen sind in Abhängigkeit von den relevanten Schadstoffen verfahrenstechnisch notwendig:

Schadstoffe	Temperatur für Verdampfung in [°C]	Temperatur für Zerstörung in [°C]
MKW, LHKW	200 - 300	750
BTEX, Naphthalin	200 - 300	800
PAK, PCB	300 - 400	850

- Je nach weiterer Nutzung des Bodens ist zu beachten, dass bis 600 °C der Boden nicht wesentlich verändert wird. Höhere Temperaturen führen zur Zerstörung der Bodenstruktur (toter Boden) bis hin zur Versinterung.

Die thermischen Reinigungsverfahren haben den höchsten Wirkungsgrad innerhalb der Sanierungsverfahren, verursachen aber aufgrund der nachgeschalteten Reinigungsstufen die höchsten Kosten. Ein weiterer Nachteil stellt die Entstehung von Sekundärschadstoffen dar.

Im Folgenden werden geeignete schutzgutbezogene Verfahren benannt, die in Verbindung mit den o.g. prinzipiellen Verfahren für eine Sanierung bei Tankstellen häufig Anwendung finden.

2.5.4 Hydraulische Verfahren zur GW-Sanierung

Prinzip: Das Ziel hydraulischer Sanierungsmethoden besteht darin, durch gezielte Beeinflussung der hydraulischen Verhältnisse die weitere Ausbreitung von Schadstoffen zu unterbinden oder einzuschränken (passive hydraulische Verfahren) oder durch die Entnahme von Kohlenwasserstoffen in Phase oder der im Grundwasser gelösten Anteile den Grundwasserleiter zu reinigen (aktive hydraulische Verfahren). Das gehobene Grundwasser wird in nachfolgenden Verfahrensschritten dekontaminiert (pump and treat).

Weiterhin gibt es zwei innovative Verfahrensmöglichkeiten, die permeablen reaktiven Wände und „Funnel and Gate“. Permeable reaktive Wände werden senkrecht zur Fließrichtung über die gesamte Kontaminationsfahne im Aquifer mit einer festen Reaktorfüllung installiert. Dabei soll die Durchlässigkeit der Wand gleich der mittleren Durchlässigkeit des Aquifers sein (Schutz gegen Umströmung, Sicherung der Langzeitfunktion). Beim Funnel-and-Gate-System werden zwei hydraulisch gegensätzliche Komponenten im Aquifer installiert. Der kontaminierte Grundwasserstrom wird durch einen geringdurchlässigen Trichter zu einem hochpermeablen Durchlassbereich, dem Tor, hingelenkt. In diesem Tor erfolgt durch eine Reaktorfüllung, die zu gegebener Zeit ausgetauscht werden muss, eine Sorption der Schadstoffe.

Stand der Technik: Absenkbrunnen erzeugen durch das Abpumpen des Grundwassers ein hydraulisches Gefälle zum Brunnen, so dass aufschwimmende Kohlenwasserstoffe abgeschöpft und gelöste Kohlenwasserstoffe mit dem Grundwasser abgepumpt werden können. Die aufschwimmende Öllinse sollte getrennt vom kontaminierten Grundwasser mit einer eigenen Absaugvorrichtung (z. B. Skimmer oder oberflächenabsaugende Spezialpumpen) entfernt werden.

Kreiselpumpen bewirken eine zu starke Durchmischung, deshalb sind beim Abpumpen von Öl in Phase Verdrängungspumpen (z. B. Kolbenpumpen, Membranpumpen) einzusetzen.

Bei geringen Flurabständen kann eine hydraulische Sanierung auch mittels Drainagen erfolgen.

Bei einer Kontamination der ungesättigten Bodenzone kann mittels Berieselungsanlagen (Infiltration) eine Mobilisierung und Lösung von Kohlenwasserstoffen erfolgen. Die mobilisierten Anteile werden über einen Absenkbrunnen abgepumpt.

Die Reinigung des gehobenen kontaminierten Grundwassers kann in Abhängigkeit vom Schadstoffgemisch und der -konzentration z. B. mit Leichtflüssigkeitsabscheidern, Aktivkohlefiltern, Bioreaktoren, Strippkolonnen oder mehrstufigen Kombinationen erfolgen.

Beim Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) handelt es sich um ein Sonderverfahren zur Entfernung leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe. Zwei tiefenmäßig versetzt an einer Stelle angeordnete Brunnen (Entnahme- und Infiltrationsbrunnen) bewirken, dass eine Zirkulationsströmung über die Tiefe des Brunnens im Untergrund erzeugt wird, die wiederum durch den vorhandenen Grundwasserstrom überlagert wird. In Abhängigkeit von der Intensität des überlagernden Grundwasserabstromes wird immer ein Teil des Brunnendurchsatzes vom Grundwasseroberstrom neu zugeführt. Ein entsprechender Teil des Wasseraustrittes aus dem Brunnen fließt direkt in den Unterstrom ab. Eine von unten nach oben gerichtete Luftströmung im Brunnen erzeugt einerseits eine Wasserströmung (Mammutpumpen-Effekt) und bewirkt andererseits eine Entgasung des verunreinigten Wassers von seinen leichtflüchtigen Stoffanteilen (Stripp-Effekt). Verfahrensunterschiede liegen in der Erzeugung der Luftströmung im Brunnen durch Anlegen eines Unterdruckes über den Brunnenwasserspiegel (Unterdruck-Verdampfer-Brunnen) oder durch Einblasen von Luft unter den Brunnenwasserspiegel (Hydro-Airlift-Brunnen).

Eignung/Anwendung:

- pump-and-treat-Verfahren bei leichtlöslichen Schadstoffen
- GZB bei vorwiegend leichtflüchtigen Stoffen (LHKW, BTEX, kurzkettige Aliphate); besonders für homogene und gut durchlässige Aquifere mit einer Mächtigkeit >5 m geeignet
- Bio-Airlift-Verfahren bei nichtflüchtigen, biologisch abbaubaren Stoffen (MKW, Phenol) mit Installation eines Bioreaktors im Brunnen.

2.5.5 Pneumatische Verfahren zur Bodensanierung, Bodenluftabsaugung

Prinzip: Pneumatische Verfahren dienen der Erfassung der gasförmigen Bodenphase und einer anschließenden Aufbereitung/Verwertung. Bei der Bodenluftabsaugung (aktives pneumatisches Verfahren) wird die Bodenluft mit den leichtflüchtigen Stoffen (LHKW, BTEX, Naphthalin, CKW und kurzkettige Aliphate) mittels angelegtem Unterdruck abgesaugt. Konvektions- und Diffusionsprozesse führen dabei zu einer wesentlichen Absenkung der Schadstoffbelastung in der Bodenluft. Durch eine Versiegelung der Bodenoberfläche durch Folien oder Betonieren des Aushubschlitzes wird eine Kurzschlussführung vermieden. Die Reinigung der Luft kann durch Absorption/Adsorption (Aktivkohle, Kieselgele, Tonerde, Biofilter), thermische Nachverbrennung, katalytische Oxidation, biologische Verfahren oder die Kondensation erfolgen.

Stand der Technik: Bodenluftabsaugbrunnen mit Filterstrecken entsprechend des Schichtenaufbaus des Untergrundes. Dichtungsmaterialien sind Beton, Zement bzw. Ton. Als Saugaggregate werden je nach Durchlässigkeitswerten (Festgestein/Lockergestein) Gebläse, Seitenkanalverdichter oder Vakuumpumpen verwendet.

Eignung/Anwendung:

Die folgende Übersicht enthält die Reichweite der Bodenluftabsaugung in unterschiedlichen Bodenarten.

Bodenart (Erfahrungswerte)	Durchlässigkeit (k_f- Wert für Wasser in [m/s])	annähernde Reichweite in [m]
sandiger Kies (durchlässig)	$>10^{-4}$	50
Sand-Schluff-Gemisch	$10^{-4}-10^{-6}$	20
toniger Schluff (gering durchlässig)	$10^{-6}-10^{-8}$	10

Die Reinigungsleistung im Grobkornanteil ist besser als im Feinkornanteil. Feinkörnige, bindige Böden mit hohem Feuchtgehalt, tonige Böden mit organischem Anteil von 5 % und mehr sind nicht geeignet.

Die Bodenluftabsaugung ist eines der effektivsten und kostengünstigsten Verfahren für die Entfernung von leichtflüchtigen Schadstoffen.

2.5.6 Immobilisierung

Prinzip: Ziel dieses Sicherungsverfahrens ist das Verringern oder Unterbinden von Schadstoffemissionen. Immobilisierungsverfahren sind Verfestigung, Verglasung sowie Fixierung. Wirkmechanismen sind physikalische Einkapselung, 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.

Eignung/Anwendung:

- Immobilisierung von ölkontaminiertem Boden mit Zement bzw. anderen Stoffen, wenn andere Verfahren nicht anwendbar sind
- Böden mit hohem Feinkornanteil
- unsensible Nachnutzungen.

Zusammenfassung: Eine hydraulische Abschöpfung des Öls als Phase auf dem Grundwasser ist als erstes zu prüfen.

Weitere Verfahren sind je nach Einzelfall zu kombinieren. Flüchtige Schadstoffe sind über Bodenluftabsaugung, lösliche Stoffe über hydraulische Verfahren erreichbar (Temperaturabhängigkeit beachten). Einer biologischen bzw. Sorptionsbehandlung ist der Vorzug gegenüber der thermischen Behandlung und der Immobilisierung zu geben.

2.5.7 Sanierungsüberwachung

Die Überwachung der Dekontaminations- und Sicherungsverfahren während der Behandlung ist zum einen als Arbeitsschutzmaßnahme (Emissionen von leichtflüchtigen Schadstoffen) und zum anderen zur Prozessüberwachung und -steuerung unbedingt notwendig. Toxizitätstests können wichtige Hinweise zum Verlauf und dem Zeitpunkt des Abschlusses der Sanierung geben.

2.5.8 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 Literaturhinweise

Hinweis:

Das Branchenblatt wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Dresden im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie erstellt (KOHNE, 1996) und im Jahre 2006 überarbeitet und ergänzt.

AEHS (2003): 2003 Survey of States' Soil and Groundwater Cleanup Standards, The Association for Environmental Health and Sciences (AEHS), <http://www.aehs.com/surveys.htm>

BEYER, H. (1962): Lehrbuch der organischen Chemie.- S. Hirzel Verlag, Leipzig.

EPA (2005): Groundwater Clean-up Levels for Oxygenates at LUST Sites: Current & Proposed, <http://www.epa.gov/oust/mtbe/mtbemap.pdf>

FUCHS, H. (1961): Grundsätze des mikrobiellen Abbaues von Kohlenwasserstoffen.- ein Beitrag zum bakteriellen Abbau von Ölen. Die Wasserwirtschaft, Heft 10, Stuttgart.

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2000): Bestimmung von BTEX/LHKW in Feststoffen aus dem Altlastenbereich, Handbuch Altlasten Band 7, Teil 4, Wiesbaden

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2005): Auswertung von Mineralöl - Gaschromatogrammen – Handbuch Altlasten, Wiesbaden

INFU (1990): Informationen für Umwelttechniker.- Tankstellen und Werkstätten.- Universität, Dortmund.

KIRSCH, W. (1968): Korrosion im Boden.- Franckh'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

KOHNE, A. (1996): Auswirkungen von Tankstellen auf den Grundwasserleiter unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse Sachsens.- Diplomarbeit, TU Dresden, Institut für GW-wirtschaft.

- KROLEWSKI, H. (1961): Verhalten von Mineralölen im Boden.- Erdöl + Kohle, Heft 6, Hamburg.
- OTTO, W. (1961): Feld- und Laborversuche zur Durchlässigkeitsbestimmung von Mineralölen auf bindigen Böden. Institut für Ingenieur- und Tiefbau am Institut für Böden und Wasserwirtschaft, Universität, Leipzig, 1961.
- RIEHLE, J. (1969): Leckanzeigen und Lecksicherungen bei der Lagerung wassergefährdender Flüssigkeiten.- Technische Überwachung, Nr. 10.
- RUNGE, W. (1955): Erdöl, -gas und Grundwasser.- Gas- und Wasserfach, Heft 14, München.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1996): Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten.- Materialien zur Altlastenbehandlung in Sachsen, Band 1/1996, Radebeul.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1998 a): Probenahme bei der Technischen Erkundung von Altlasten.- Materialien zur Altlastenbehandlung in Sachsen, Radebeul.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (1998 b): Historische Erkundung von altlastenverdächtigen Flächen.- Materialien zur Altlastenbehandlung in Sachsen, Radebeul.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2002): Handhabung von Orientierungswerten sowie Prüf- und Maßnahmenwerten zur Gefahrenverdachtsermittlung für die Altlastenbehandlung in Sachsen.- Materialien zur Altlastenbehandlung, Dresden.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2005): ORIENT - Bewertungshilfen bei der Gefahrenverdachtsermittlung in der Altlastenbehandlung, <http://www.umwelt.sachsen.de/lfug> >> Informationssysteme
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1995 a): Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Grundwasser.- Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 3, Dresden.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1995 b): Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Boden.- Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 4, Dresden.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1995 c): Empfehlungen zur Handhabung von Prüf- und Maßnahmenwerten für die Gefährdungsabschätzung in Sachsen.- Materialien zur Altlastenbehandlung in Sachsen, Band 2, Dresden.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESENTWICKLUNG (1996): Computergestützte Gefährdungsabschätzung von Altlasten mit dem Programm GEFA.- Materialien zur Altlastenbehandlung in Sachsen, Band 2/1996, 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): Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Luft.- Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 6, Dresden.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (in Vorb. c): Detailuntersuchung.- Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 7, Dresden
- SCHLATTERER, R. (1976): Tankanlagenbau und Tankschutz.- Kommissionsverlag A.W.Gentner, Stuttgart.
- STACHEL, B. (1993): Bodenkontaminationen durch Kraftstoffeintrag im Wirkungsbereich von Zapfsäulen auf öffentlichen Tankstellengrundstücken.- Entsorgungspraxis, EP Nr. 7-8, Hamburg.
- TÜV (1966): Untersuchungen zur Zerstörung der Tanks.- Mannheim.
- UMWELTBUNDESAMT (1997): Technische Grundlagen für die Methoden der Erkundung, Bewertung und Sanierung von mit flüssigen Kohlenwasserstoffen (Mineralöl) belasteten Böden, Wien.
- UMWELTBUNDESAMT (2006): [Verkehr - Aktuelles](http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/index-additive-motorenoele.htm) > Additive und Motorenöle, <http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/index-additive-motorenoele.htm>