

113 Forensische Methoden

Bei der Anwendung forensischer Methoden in der Altlastenbearbeitung handelt es sich um spezielle Untersuchungen und Auswertungen hinsichtlich Zeitpunkt, Ablauf, räumlichem und stofflichem Ursprung einer Boden- oder Grundwasserverunreinigung, und damit zum Beispiel zur Ermittlung von Verursachern (Handlungsstörern).

Forensische Methoden sind hauptsächlich bei Schäden durch Mineralölprodukte (MKW-; BTEX-, MTBE-, PAK- Verunreinigungen) und Lösungs-/Entfettungsmittel (chlorierte Kohlenwasserstoffe) sinnvoll einsetzbar. In Einzelfällen können auch andere Schadensursachen, z.B. Grundwasserverunreinigungen aus der Landwirtschaft, dem Bergbau sowie der pharmazeutischen Industrie mit forensischen Methoden untersucht werden.

In vielen Fällen kann im Rahmen einer historischen Recherche und aus den Ergebnissen einer orientierenden bzw. Detailuntersuchung aus der Kenntnis der gewerblichen und industriellen Tätigkeiten zusammen mit den geologisch-hydrogeologischen Verhältnissen an einem Standort ein Verursacher ermittelt werden.

Kommen jedoch an einem Standort und dessen Umfeld mehrere potenzielle Verursacher in Frage, können mit forensischen Methoden unter bestimmten Voraussetzungen die Beiträge mehrerer Verursacher zu einem Gesamtschaden (z.B. zu einer abströmenden Schadstofffahne) voneinander unterschieden und ggf. auch quantifiziert werden.

Die wichtigsten forensischen Methoden in der Altlastenbearbeitung sind:

- Isotopenuntersuchungen,
- Fingerprinting,
- Spurenstoffe und Additive,
- Isotopenhydrogeologische Untersuchungen und Tracermethoden
- Dendroforensische Untersuchungen.

In Deutschland wurden forensische Untersuchungen bisher nur in seltenen Einzelfällen vor Gericht als Beweismittel genutzt. Es ist jedoch ein zunehmendes Interesse an diesen Methoden zur Klärung der Verursacherfrage von Boden- und Grundwasserverunreinigungen festzustellen.

Zur Erhöhung der Aussageschärfe forensischer Untersuchungen ist eine multiple Beweisführung, d.h. die Anwendung unterschiedlicher, voneinander unabhängiger forensischer Methoden zur Klärung eines Sachverhalts sinnvoll. Eine fachkundige Auswertung muss in jedem Fall alle vorliegenden Untersuchungsergebnisse eines Altlastenfalls berücksichtigen. Deshalb bedarf es neben der speziellen Kenntnis der forensischen Methoden und deren Anwendung auch einer interdisziplinären Herangehensweise und einer ganzheitlichen Bewertung aller Fakten und Informationen, um zu einem belastbaren Ergebnis zu kommen.

Die Anwendbarkeit forensischer Methoden in der Altlastenbearbeitung ist vom jeweiligen Schadensfall, der Schadstoffgruppe und der zu bearbeitenden Fragestellung abhängig. Sie stellen ein zusätzliches spezielles Instrument zu den Standardmethoden der Altlastenbearbeitung dar. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, forensische Untersuchungen frühestens im Untersuchungsstadium der Detailuntersuchung und lediglich in Ausnahmefällen bereits beim Kenntnisstand einer orientierenden Untersuchung durchzuführen.

Vor der Planung einer forensischen Untersuchung und der Aufstellung eines forensischen Untersuchungskonzepts sollte eine forensische Machbarkeitsstudie durchgeführt werden, um die für den jeweiligen Standort anwendbaren Methoden auszuwählen sowie die Zielstellung und die Erfolgchancen im Vorfeld einzuschätzen. Sowohl die Planung als auch die Auswertung forensischer Untersuchungsergebnisse müssen unter Einbeziehung aller relevanten Standortdaten und Informationen erfolgen.

Durch eine gute interdisziplinäre Zusammenarbeit können die forensischen Methoden darüber hinaus weitere wertvolle Informationen zur Gefährdungsabschätzung beitragen. Dies sind z.B. die:

- Präzisierung des geologisch-hydrogeologischen Standortmodells,
- räumliche und zeitliche Einordnung multipler Schadstoffeinträge,
- Quantifizierung von eingetragenen Schadstoffmengen oder
- Bewertung des natürlichen Abbaus organischer Schadstoffe.

113.1 Forensische Machbarkeitsstudie

113.1.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Vor der Planung forensischer Untersuchungen und der Aufstellung eines Untersuchungskonzeptes ist es sinnvoll, eine Forensische Machbarkeitsstudie durchzuführen. Diese beinhaltet die Klärung folgender Fragen:

- Welche konkreten Ziele haben die forensischen Untersuchungen?
- Welche Aussagegenauigkeit müssen die forensischen Ergebnisse haben?
- Welche forensischen Methoden sind im vorliegenden Fall anwendbar?
- Wie hoch ist die Chance, dass die vom Auftraggeber vorgegebene Zielstellung erreicht wird?
- Ist der Aufwand der Forensik (im Sinne von Kosten-Nutzen) verhältnismäßig?

Eine solche forensische Machbarkeitsstudie kann häufig ohne großen Aufwand durchgeführt werden. In komplexen Fällen, für die es keine Referenzfälle gibt oder beim Einsatz neuer forensischer Methoden, die lediglich aus der wissenschaftlichen Forschung bekannt sind, kann eine aufwändigere Machbarkeitsstudie erforderlich werden. Jedoch ist gerade für solche Fälle eine Vorabprüfung der Erfolgsaussichten dringend angeraten.

Auf der Basis der Machbarkeitsstudie wird ein zielgerichtetes Untersuchungskonzept erstellt werden. Das Untersuchungskonzept sollte, wenn möglich, ein stufenweises, adaptives Vorgehen vorsehen, da es zur Erreichung eines bestimmten Beweismilieus häufig notwendig ist, die in einem ersten Schritt erhaltenen Ergebnisse zu verifizieren oder zu präzisieren. Außerdem ist ein sogenannter Multi-Methoden-Ansatz zur Erhöhung der Aussagegesicherheit sinnvoll. Darunter ist der Einsatz mehrerer voneinander unabhängiger Methoden zur Beantwortung derselben Fragestellung zu verstehen.

Es ist von entscheidender Bedeutung, die Nutzungszeiträume potenzieller Störer dokumentieren zu können. Daher spielt die historische Recherche (z.B. Mietverträge, Auswertung von Luftbildern zu verschiedenen Zeitpunkten, Akten der Kataster- und Grundbuchämter) eine besonders wichtige Rolle in der Beweisführung. Sollte

keine bzw. keine für die Fragestellung der forensischen Untersuchungen ausreichende historische Recherche vorliegen, ist diese in die forensische Machbarkeitsstudie zu integrieren.

113.1.2 Kostenermittlung

Bei der forensischen Machbarkeitsstudie und der Erstellung eines Untersuchungskonzepts handelt es sich um Ingenieurleistungen. Der Aufwand für die Leistungserbringung ist vom jeweiligen Projektumfang und der Fragestellung abhängig. In die Kostenermittlung einzubeziehen ist der Aufwand für

- Einarbeitung, Recherche und Auswertung vorhandener Unterlagen,
- Ortstermin zur Geländeinsicht,
- Abstimmung der Ziele mit dem Auftraggeber,
- Erstellung der Machbarkeitsstudie,
- Erstellung eines forensischen Untersuchungskonzept

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 113).

113.1.3 Literatur

entfällt

113.1.4 Information über Leistungsanbieter

Als Leistungsanbieter kommen Sachverständige, Gutachter und Ingenieurbüros in Frage, die über Kenntnisse und Erfahrung in der Durchführung von forensischen Untersuchungen verfügen.

113.2 Isotopenuntersuchungen

113.2.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Vgl. LB 112 Nachweismethoden schadstoffmindernder Prozesse

113.3 Fingerprinting

113.3.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Bei einer forensischen Untersuchung werden die Fingerabdrücke des vorgefundenen Schadensbildes (in Form von Analysen) genommen und zur Rekonstruktion des Tathergangs (Entstehung des Schadens) an Hand unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften ausgewertet. Für die Auswertung ist es erforderlich, die in Frage kommenden Schadensursachen, d.h. die Zusammensetzung und chemisch-physikalischen Eigenschaften der möglichen Ausgangsprodukte, deren Verhalten im Untergrund und deren Nachweismethoden zu kennen.

Probennahme

Die Probennahme für die MKW-, AKW- PAK- und LCKW Analytik erfolgt nach den in der Altlastenbearbeitung üblichen Standards.

Bodenproben sollten in 500 g-Schraubdeckelgläser, Wasserproben in 2 L Braunglasflaschen genommen werden. Für die Analyse leichtflüchtiger Verbindungen (vor allem AKW und LCKW) sollte die Probennahme nach E DIN ISO 22155 erfolgen. Für die Analyse von Produktphase reicht eine Probenmenge von wenigen Millilitern aus.

MKW- Fingerprinting

Die Zusammensetzung von Rohöl ist je nach Herkunft und Entstehung der Lagerstätte unterschiedlich. Ebenso unterscheiden sich die Mineralölprodukte Benzin (Vergaserkraftstoff, Flugbenzin), Diesel, Heizöl (leichtes und schweres), Motoröl, Schmieröl in ihrer Zusammensetzung an Kohlenwasserstoffen und ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften wie z.B. Siedepunkt, Dampfdruck, Wasserlöslichkeit.

Das MKW- Fingerprinting beruht auf der Analyse von GC-FID oder GC-MS Chromatogrammen. Aus der Lage und Höhe der Peaks sowie aus dem Verlauf der Basislinie eines Chromatogramms lassen sich graphisch die eine MKW Kontamination verursachenden Mineralölprodukte identifizieren.

Die Grundlagen und Anwendungsbeispiele sind bei Dörr & Hiesl, 2012, Kaolan et al., 1996, Alimi et al., 2003 und Ertel et al., 2009 beschrieben.

Unter bestimmten Standortbedingungen besteht die Möglichkeit, an Hand des Konzentrationsverhältnisses einzelner Peaks im GS-MS Chromatogramm das Alter von Diesel oder Heizöl zu bestimmen (Christensen und Larsen, 1993).

Die Aussagekraft des MKW- Fingerprintings nimmt stark ab, wenn

- äußerst geringe Konzentrationen in Boden und Grundwasser vorliegen,
- die Schadensursache schon so lange zurückliegt, dass die Fingerprints der Proben durch Abbau und Umwandlungsprozesse sehr stark verändert sind,
- wenn sich mehrere Schäden oder Schadstofffahnen überlagern.

Fingerprinting mit aromatischen, polyzyklischen und chlorierten Kohlenwasserstoffen

BTEX- Fingerprinting

BTEX- Fingerprinting wird hauptsächlich zur forensischen Untersuchung von Benzinschäden eingesetzt. Durch die Art des Schadensverlaufs und die im Untergrund ablaufenden Prozesse kommt es zu typischen Verschiebungen in der relativen Zusammensetzung der BTEX- Einzelkomponenten. Für die Anwendung relevant sind die folgenden BTEX-Verteilungstypen:

- Phase im Wasser gelöst: Toluol und Benzol dominieren, höhere Konzentrationen,
- Aerober mikrobiologischer Abbau: m-/p- Xylol dominiert, untergeordnet o-Xylol und Ethylbenzol, niedrigere Konzentrationen,
- Anaerober mikrobiologischer Abbau. Benzol dominiert, niedrigere Konzentrationen,
- Verdunstung, im Wasser gelöst: Toluol und m-/p-Xylol dominieren, höhere Konzentrationen und
- Verdunstung, Gasphase: Benzol dominiert.

Neben diesen typischen, Fingerabdrücken kann man auch abhängig vom Schadenshergang und den Standortverhältnissen Mischformen finden. Für deren Auswertung müssen zusätzliche Informationen z.B. über das mikrobielle Abbaumilieu berücksichtigt werden.

Fingerprinting mit C3- und C4- Benzolen

Die Anwendung des Fingerprintings mit C3- und C4- Benzolen erfolgt analog zum BTEX-Fingerprinting. Da einige der Einzelsubstanzen im Gegensatz zu den BTEX einer geringeren Wechselwirkung im Untergrund unterliegen und schlechter mikrobiell abbaubar sind, ermöglicht das Fingerprinting mit C3- und C4- Benzolen eine eindeutigere Zuordnung der aromatischen Kohlenwasserstoffen zu verschiedenen Ausgangsprodukten als bei den BTEX.

PAK- Fingerprinting

Die häufigsten Quellen für hohe Konzentrationen an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Boden und Grundwasser sind ehemalige Gaswerke, teer- und teerölverarbeitende Betriebe und Kokereien. Bei solchen Altlasten ist eine forensische Untersuchung oft nicht erforderlich, da Herkunft, Ort und Zeit der PAK-Kontamination im Rahmen einer historischen Untersuchung meist hinreichend genau festgestellt werden kann.

PAK in höheren Konzentrationen findet man auch in Tankummantelungen. Aus diesen Stoffen können PAK durch unterschiedliche Lösungsprozesse in den Boden gelangen. Deshalb kann das PAK- Fingerprinting zur forensischen Untersuchung von Benzinschäden und speziell zur Rekonstruktion der räumlichen Herkunft und des Schadenshergangs (Überfüllschaden) genutzt werden.

Da insbesondere die PAK mit einer höheren Zahl an aromatischen Ringen schlecht abbaubar und sehr gering wasserlöslich sind, kann das PAK Fingerprinting ebenso wie das Fingerprinting mit C3- und C4- Benzolen zur Identifikation der Herkunft eines Benzinschadens genutzt werden.

LCKW- Fingerprinting

Das LCKW- Fingerprinting ist bei Schäden durch chlorierte Kohlenwasserstoffe in Analogie zu oben beschriebenem BTEX- Fingerprinting einsetzbar.

113.3.2 Kostenermittlung

Beim handelt es sich um eine Teilleistung der forensischen Untersuchungen. Der Aufwand für die Leistungserbringung ist vom jeweiligen Projektumfang und der Fragestellung abhängig.

Bei den chemischen Analysen (MKW, BTEX, Aromaten, PAK, LCKW) handelt es sich um dieselben, die bei der Altlastenerkundung durchgeführt werden.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 113).

weiterführende Leistungen:

LB 130 Analytik

113.3.3 Literatur

Alimi, H., Ertel, T. & Schug, B., (2003), Fingerprinting of Hydrocarbon Fuel Contaminants: Literature Review. - Environmental Forensics 4, 25-38

Christensen, L.B. und Larsen, T.H., (1993), Method for determining the age of Diesel oil spills in soils, Groundwater Monitoring Review, Fall, pp.142 - 149

Dörr, H. und Hiesl, E. S., (2012), Die Anwendung forensischer Methoden in der Altlastenbearbeitung - Methoden und Beispiele zur Ursachen- und Verursacheranalyse bei MKW-, BTEX- und PAK- Schäden in Boden und Grundwasser, Handbuch der Altlastensanierung und Flächenmanagement (Franzius, V., Altenbockum, M., Gerold, T. (Eds.), 3. Auflage, 66. Aktualisierung, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm München

Ertel, T., Dörr, H., Blessing, M., Hansel, H., Philipps, R., Rebel, M. Schöndorf, T., (2009), Forensische Verfahren in der Altlastenbearbeitung, Herausgegeben vom Arbeitskreis Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungsmethoden des Altlastenforums Baden-Württemberg e.V., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, (Nägele u. Obermiller), ISBN 978-3-510-39014-4

Kaplan, Isaac R., Galperin, Yakov, Alimi, Hoddein, Lee, Ru-Po, Lu, Shan-Tan, (1996), Patterns of Chemical Changes During Environmental Alteration of Hydrocarbon Fuels, FALL GWMR, pp. 113 - 124

113.3.4 Information über Leistungsanbieter

Als Leistungsanbieter kommen Sachverständige, Gutachter und Ingenieurbüros in Frage, die über Kenntnisse und Erfahrung in der Durchführung von forensischen Untersuchungen verfügen.

Chemische Analysen können von akkreditierten Labors für Altlastenanalytik durchgeführt werden.

113.4 Spurenstoffe und Additive

113.4.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Als Spurenstoffe bezeichnet man allgemein Substanzen, die nur in sehr geringen Konzentrationen in einem Produkt vorkommen. Unter Additiven versteht man Substanzen, die den Mineralölprodukten zur Erzielung oder Verbesserung bestimmter Eigenschaften zugegeben werden. Da sich der Einsatz von Additiven und Spurenstoffen in den Produkten im Laufe der Zeit geändert hat, können sie Informationen über den Zeitpunkt bzw. die Zeitdauer einer Verunreinigung beinhalten. Beispiele für Spurenstoffe und Additive, die in forensischen Untersuchungen angewendet werden, sind der im Rohöl und in Mineralölprodukten enthaltene Schwefel, das Benzinblei, MTBE, TAME, Farbstoffe und sogenannte Biomarker wie z.B. Sterane.

Die Anwendung von Spurenstoffen und Additiven ist bei Dörr und Hiesl, 2009 beschrieben.

Probennahme

Die Probennahme für Spurenstoffe und Additive erfolgt nach den in der Altlastenbearbeitung üblichen Vorschriften und Standards.

Da die Konzentrationen im Allgemeinen niedrig sind, ist die erforderliche Probenmenge jeweils im Vorfeld mit dem Analyseinstitut abzustimmen.

Benzinblei

Analysen von Teraethylblei und Tetramethylblei (Benzinblei) im Boden dienen der zeitlichen Einordnung von Benzinschäden zwischen etwa 1940 bis Anfang der 1980er Jahre (Einsatz von Blei als Antiklopfmittel).

Die im Grundwasser gemessenen Bleikonzentrationen sind jedoch nur sehr eingeschränkt als Zeitmarker interpretierbar, da Blei in Wasser nahezu unlöslich ist und sehr stark an der Bodenmatrix, insbesondere an organischem und bindigem Material adsorbiert. Deshalb ist ein negativer Befund einer Benzinblei-Analyse kein Beleg dafür, dass es sich nicht um eine Benzinverunreinigung aus dem genannten Zeitraum handelt. Allerdings ist ein positiver Befund auf Benzin-Blei (in Verbindung mit einem negativen MTBE- Befund, siehe 113.11) ein sicheres Zeichen für einen Eintragszeitpunkt vor etwa dem Beginn der 1980er Jahre und nach etwa 1940.

MTBE

Analysen von Methyl-tert-butyl Ether (MTBE, als Spurenstoff) dienen der zeitlichen Einordnung von Benzinschäden nach etwa Ende der 1970er/Anfang der 1980er Jahre bis heute (Einsatzes von MTBE als Antiklopfmittel). Diese Methode sollte möglichst immer mit der Analyse von Benzinblei zur Absicherung der Befunde kombiniert werden.

Die Untersuchung von MTBE in Bodenproben ist wegen der geringen Sorptionsfähigkeit wenig zielführend und sollte sich deshalb auf Grundwasserproben beschränken.

Schwefel

Die Analyse organischer Schwefelverbindungen dient im Wesentlichen der zeitlichen Einordnung von Diesel/Heizöl Schäden. Da im Laufe der letzten Jahrzehnte der Schwefelgehalt in Mineralölprodukten in mehreren Stufen gesetzlich begrenzt wurde, können mit Schwefel Analysen länger zurückliegende (Größenordnung: 1970-iger Jahre und älter) Schadenszeitpunkte ermittelt werden.

Generell gilt die Aussage, dass je mehr Schwefel im Rahmen eines Mineralölschadens nachgewiesen werden kann, der Schaden umso länger zurückliegt. Bei negativen Analysebefunden oder vergleichsweise niedrigen Schwefelkonzentrationen ist jedoch nicht zwingend auf ein junges Schadensereignis zu schließen, denn Schwefel kann an der Bodenmatrix und insbesondere an organischen und bindigen Materialien adsorbiert und auch chemisch umgewandelt werden.

Weitere Spurenstoffe und Additive (Farbstoffe)

Eine weitere Gruppe von Spurenstoffen zur Identifikation der Herkunft einer Verunreinigung sind die Farbstoffe, die den verschiedenen Produkten zur Kennzeichnung beigemischt werden. Z.B. ist Heizöl mit einem roten Azofarbstoff (Sudan 1) eingefärbt. Zusätzlich wird als Markierstoff "Solvent Yellow 124" beigemischt.

Zu beachten ist, dass Farbstoffe relativ instabil sind. Der Nachweis des stabileren "Solvent Yellow 124" kann als Hinweis für Heizölschäden ab etwa 1976 gewertet werden, da erst ab diesem Zeitpunkt die Kennzeichnungspflicht in Deutschland eingeführt wurde. Ein Negativbefund ist jedoch nicht für eine forensische Auswertung nutzbar.

Biomarker sind Bestandteile von Rohöl und unterliegen nur einem geringen mikrobiellen Abbau. Zu ihnen zählen Isoprenoide, Terpane, Sterane und Hopane. Sie können zur Unterscheidung und Identifikation der Herkunft eines Mineralölschadens angewandt werden.

113.4.2 Kostenermittlung

Bei der Anwendung von Spurenstoffen und Additiven handelt es sich um eine Teilleistung der forensischen Untersuchungen. Der Aufwand für die Leistungserbringung ist vom jeweiligen Projektumfang und der Fragestellung abhängig.

Bei der MTBE Analyse handelt es sich um dieselben, die bei der Altlastenerkundung durchgeführt werden.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 113).

weiterführende Leistungen:

LB 130 Analytik

113.4.3 Literatur

Dörr, H. und Hiesl, E. S., (2012), Die Anwendung forensischer Methoden in der Altlastenbearbeitung - Methoden und Beispiele zur Ursachen- und Verursacheranalyse bei MKW-, BTEX- und PAK- Schäden in Boden und Grundwasser, Handbuch der Altlastensanierung und Flächenmanagement (Franzius, V., Altenbockum, M., Gerold, T. (Eds.), 3. Auflage, 66. Aktualisierung, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm München

113.4.4 Information über Leistungsanbieter

Als Leistungsanbieter kommen Sachverständige, Gutachter und Ingenieurbüros in Frage, die über Kenntnisse und Erfahrung in der Durchführung von forensischen Untersuchungen verfügen.

Chemische Analysen können von akkreditierten Labors durchgeführt werden.

113.5 Isotopenhydrogeologische Untersuchungen und Tracermethoden

113.5.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Mit isotopenhydrogeologischen Untersuchungen können im Rahmen von forensischen Fragestellungen bei Grundwasserschadensfällen Aussagen zur Dynamik des Grundwassersystems (z.B. Grundwasserneubildung, Abstandsgeschwindigkeit, Verweildauern) getroffen und ein besseres quantitatives Verständnis der hydrogeologischen Standortsituation (Standortmodell) erzielt werden. Dies ist ein wesentlicher Baustein für die Plausibilitätsprüfung der anderen forensischen Untersuchungsergebnisse sowie für die Rekonstruktion des Schadenseintritts und der Schadstoffausbreitung.

In der Isotopenhydrogeologie spielen im Rahmen der forensischen Methoden vor allem die natürlichen Isotope des Wassers (Deuterium und Sauerstoff-18), das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium (^3H) und dessen Zerfallsprodukt ^3He , sowie die Spurenstoffe SF₆ und FCKW eine Rolle. Die Grundlagen für die forensischen Altlastenuntersuchung und Anwendungsbeispiele sind bei Dörr und Hiesl, 2009 beschrieben. Eine zusammenfassende Darstellung der Isotopenmethoden in der Hydrogeologie findet sich bei Moser und Rauert, 1980.

Probennahme

Für die Probennahme zur Untersuchung der stabilen Isotope des Wassers sind keine speziellen Geräte und Vorgehensweisen notwendig. Probenmengen von 20 bis 100 mL sind für die Analyse ausreichend. Die Probengefäße sollten zur Vermeidung von Verdunstungseffekten vollständig gefüllt sowie gekühlt gelagert und transportiert werden.

Da es sich bei ^3He , FCKW und SF₆ um im Grundwasser gelöste Gase in extrem niedrigen Konzentrationen handelt, bedarf es bei der Probennahme einer besonderen Vorgehensweise und Vorrichtung, um einen Gasaustausch mit der Atmosphäre bei der Probennahme und beim Probentransport zu vermeiden. Dazu ist eine spezielle Probennahmeausrüstung, die von AnalySELabor gestellt wird, erforderlich.

Sauerstoff- und Wasserstoffisotope im Wasser (Sickerwasser, Grundwasser)

Durch die Untersuchung der stabilen Isotope des Wassers kann die Frage nach der Genese z.B. eines kontaminierten Wasserkörpers untersucht werden. Insbesondere können Anteile von Sicker- oder Stauwasser und die Abgeschlossenheit eines Grundwasserleiters gegenüber Stau- und Sickerwasser untersucht werden.

Tritium und Tritium/ ^3He im Grundwasser

Die Tritium-Konzentration im Grundwasser kann zur Datierung angewendet werden. Tritium-freies Grundwasser ist ein Hinweis auf die Entstehung des Grundwassers vor etwa 1960. Da jedoch heute die Tritium-Konzentrationen im Niederschlag bis fast auf die natürliche Hintergrundkonzentration von etwa 4 - 6 TU abgeklungen sind, ist die Anwendung zur Datierung von Grundwasser auf Fälle beschränkt, bei denen Grundwasserneubildungsanteile in und kurz nach den 1960er Jahren zu erwarten sind.

Durch die gleichzeitige Messung von ^3He kann dieser Nachteil überwunden werden (das Edelgas ^3He ist das Zerfallsprodukt von Tritium). Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Tritium - ^3He - Methode ist, dass ein geschlossenes System vorliegt (das aus Tritium entstandene Edelgas ^3He darf nicht entweichen können) und dass

^3He aus anderen Quellen ausgeschlossen oder korrigiert werden kann. Eine Beschreibung der Anwendung der Tritium/ ^3He - Methode zur Altersbestimmung von Grundwasser ist in Schlosser et al., 1988 zu finden.

FCKW- und SF₆- Spurenstoffe im Grundwasser

Die altersmäßige Zusammensetzung von Grundwässern kann auch mit Hilfe der Analyse der Spurengase FCKW und SF₆ untersucht werden. FCKW sind lediglich in Grundwasser, das nach etwa 1940 gebildet wurde, enthalten. SF₆ ist erst in Grundwasser nachweisbar, das nach den 1970er Jahren neugebildet wurde.

Die Anwendung von FCKW und SF₆ zur Altersbestimmung im Grundwasser ist in Plummer, 2003, Fulda 2000 und Oster 1994 beschrieben.

Die Anwendung der FCKW- und SF₆- Methode kann durch mikrobiologische Abbauprozesse eingeschränkt sein. Unter anaeroben Bedingungen kann vor allem F11 abgebaut werden. F12 und SF₆ sind weniger gut abbaubar.

Außerdem besitzen FCKW und SF₆ eine hohe Löslichkeit in Ölen und Fetten, so dass der Kontakt mit einer Ölphase zu Verfälschungen bei der Altersbestimmung führen kann.

113.5.2 Kostenermittlung

Bei der Anwendung Isotopenhydrogeologischen Methoden handelt es sich um eine Teilleistung der forensischen Untersuchungen. Der Aufwand für die Leistungserbringung ist vom jeweiligen Projektumfang und der Fragestellung abhängig.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 113).

weiterführende Leistungen:

LB 130 Analytik

113.5.3 Literatur

Dörr, H. und Hiesl, E. S., (2012), Die Anwendung forensischer Methoden in der Altlastenbearbeitung - Methoden und Beispiele zur Ursachen- und Verursacheranalyse bei MKW-, BTEX- und PAK- Schäden in Boden und Grundwasser, Handbuch der Altlastensanierung und Flächenmanagement (Franzius, V., Altenbockum, M., Gerold, T. (Eds.), 3. Auflage, 66. Aktualisierung, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm München

Fulda, C, und Kinzelbach, W., (2000), Sulphur hexafluoride (SF₆) as a new age-dating tool for shallow groundwater: methods and first results, Tracers and Modelling in Hydrogeology (Proceedings of the TraM'2000 Conference held at Liège, Belgium, May 2000). IAHS Publ. no. 262

Moser, H., und Rauert, W., (1980), Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd.8, Isotopenmethoden in der Hydrologie, Borntraeger Verlag, ISBN 978-3-443-01012-6

Oster, H. (1994), Datierung von Grundwasser mittels FCKW: Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen, Heidelberg

Plummer, N.L., (2003), Environmental tracers and how they are used to understand the aquifer, U.S. Geological Survey Circular 1222, James R. Bartolino and James C. Cole, eds.

Schlosser, M., Stute, M., Dörr, H. Sonntag, C. und Münnich, K.O., (1988), ^3He dating of shallow groundwater, Earth Planet Sci. Lett. 89, pp.352 - 363

113.5.4 Information über Leistungsanbieter

Als Leistungsanbieter kommen Sachverständige, Gutachter und Ingenieurbüros in Frage, die über Kenntnisse und Erfahrung in der Durchführung von forensischen Untersuchungen verfügen.

Isotopen- und Spurenstoffanalysen werden von spezialisierten Labors für Isotopenanalytik und teilweise auch von Universitätsinstituten (sofern die Untersuchung ein Forschungs- oder Entwicklungsaspekt enthält) durchgeführt werden.

113.6 Dendroforensische Untersuchungen

113.6.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche/technische Grundlagen)

Mit dendroforensischen Untersuchungen können im Rahmen forensischer Fragestellungen der Eintrittszeitpunkt und der zeitliche Verlauf eines Schadens sehr genau untersucht werden. Grundvoraussetzung ist ein Bewuchs mit entsprechend alten Bäumen an geeigneten Stellen. Dazu werden die im Holz datierter Jahresringe von Bäumen enthaltenen chemischen Elemente analysiert. In der forensischen Praxis hat sich besonders Chlor zur Untersuchung des zeitlichen Verlaufs von LCKW- Verunreinigungen bewährt.

Probennahme

Für die Untersuchung wird ein Baumkern vom jüngsten bis zum ältesten Jahresring in gleichmäßigen Abständen (z.B. 50 µm) durchgemessen. Damit erhält man den Konzentrationsverlauf über die gesamte Lebensdauer des Baumes in einer zeitlichen Auflösung von weniger als einem Jahr. Durch die Analyse eines unbelasteten Baumkerns aus dem Zustrombereich einer Kontamination können standortspezifische Hintergrundkonzentrationen ermittelt und berücksichtigt werden. Die Methodik und ihre Anwendung im Rahmen forensischer Untersuchungen ist in Balouet und Oudijk, 2006 und Balouet et al., 2009 beschrieben.

113.6.2 Kostenermittlung

Bei der Anwendung dendroforensische Untersuchungen handelt es sich um eine Teilleistung der forensischen Untersuchungen. Der Aufwand für die Leistungserbringung ist vom jeweiligen Projektumfang und der Fragestellung abhängig.

Das Leistungsregister mit Positionen und Kostenangaben ist Bestandteil der internetbasierten Datenbank (LB 113).

113.6.3 Literatur

Balouet, J.-C. und Oudijk, G., (2006), The use of dendroecological methods to estimate the time frame of environmental releases. Environmental Claims Journal 18 (10), pp. 35-52

Balouet, J.-C. et al., (2009), Use of dendrochronology and dendrochemistry in environmental forensics: Does it meet the Daubert Criteria? Environmental Forensics 10, pp. 268-276

113.6.4 Information über Leistungsanbieter

Als Leistungsanbieter kommen nur sehr wenige spezialisierte Anbieter in Frage.