TEXTE
37/2012

Uran in Boden und Wasser

Umwelt Bundes Amt
Für Mensch und Umwelt

| TEXTE | 37/2012

Uran in Boden und Wasser

von

Claudia Dienemann, Jens Utermann
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
http://www.uba.de/uba-info-medien/4336.html
verfügbar.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau
Abschlussdatum:	Juni 2012
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/
Redaktion:	Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes Jens Utermann

Dessau-Roßlau, Juli 2012; 2., veränderte Fassung

Inhalt

1 Einleitung 1

2 Vorkommen und Eigenschaften 1

2.1 Einführung 1

2.2 Verwendung von Uran 2

2.3 Humantoxische Wirkungen 3

2.4 Uran in Grund- und Trinkwasser 4

2.5 Uran in Oberflächenwasser 6

2.6 Uran in Böden 8

2.7 Uran in der Luft 10

3 Gesetzliche Regelungen 10

4 Uranlagerstätten – Uranbergbau – Altlastensanierungsgebiete 11

5 Diffuse Uraneinträge in Böden und Wasser 13

5.1 Uraneinträge durch Düngung 13

5.2 Uraneinträge durch Niederschlagswasser 16

5.3 Uraneinträge über die Luft 16

6 Diffuse Uranausträge aus Böden und Transfer in die Nahrungskette 17

7 Fazit und Handlungsempfehlungen 18

Literatur 20

1 Einleitung

Die Versorgung einer wachsenden Weltbevölkerung mit ausreichenden und qualitativ hochwertigen Lebensmitteln sowie der zunehmende Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen zur Energiegewinnung stellen bei begrenzter und sogar schrumpfender landwirtschaftlicher Nutzfläche eine permanente Herausforderung an die Produzenten dar.

In Deutschland überwiegen konventionell wirtschaftende Betriebe[1], die hohe Erträge durch den Einsatz von Mineraldünger und Pflanzenschutzmitteln erzielen. Dabei gelangen insbesondere aus mineralischen Phosphatdüngern auch unerwünschte Schwermetalle wie Uran und Cadmium in den Boden (Schnug & Haneklaus, 2008; Khater, 2008) und damit potentiell auch in das Grundwasser. Das birgt mittel- bis langfristig die Gefahr einer Belastung auch des Trinkwassers mit diesen Spurenelementen (Smidt et al., 2011). Während das deutsche Düngerecht für Cadmium eine indirekte Begrenzung der Einträge in die Böden durch eine Grenzwertsetzung in Verbindung mit einer Kennzeichnungspflicht für das Inverkehrbringen der mineralischen Phosphatdünger vorsieht, existiert eine entsprechende Regelung für Uran derzeit nicht.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie mittel- bis langfristig ein ausreichender Schutz vor einer nicht mehr vernachlässigbaren, unerwünschten Anreicherung von Uran in Böden[2] und einer möglichen Verlagerung ins Grundwasser gewährleistet werden kann.

2 Vorkommen und Eigenschaften

2.1 Einführung

Das Schwermetall Uran ist ein natürlicher Bestandteil der Erdkruste. Deshalb lässt es sich in unterschiedlichen Anteilen in Gesteinen und Mineralen, im Boden, im Wasser und in der Luft nachweisen. Der Durchschnittsgehalt in der Lithosphäre wird von verschiedenen Autoren mit 2,5 – 4 mg/kg angegeben (Rösler & Lange. 1976). Natürlich auftretendes Uran ist ein Isotopengemisch. Es besteht zu 99,27% aus dem Isotop U-238, zu 0,72% aus U-235 und zu 0,01% aus U-234 (Streit, 1992). Sämtliche Isotope sind radioaktiv.

Wegen seiner Elektronenkonfiguration[3] kommt Uran praktisch nicht elementar (d.h. als reines Metall) vor. Es überwiegen die Oxidationsstufen IV (reduzierende Bedingungen, z. B. Kohlen) und VI (oxidierende Bedingungen, z. B. Uranarsenate). Stabile Komplexe bildet Uran u. a. mit Phosphaten, Arsenaten und Karbonaten (Meinrath, 1998).

---

[1] 92,7% aller landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland werden konventionell bewirtschaftet (Quelle: BMELV, 2011)

[2] Gemäß Beschlusslage der gemeinsamen Agrar- und Umweltministerkonferenz vom Juni 2001 in Potsdam sind die Böden vor einer Anreicherung mit Schadstoffen zu schützen, damit auf ihnen dauerhaft gesunde Nahrungsmittel erzeugt werden können.

[3] Bei Edelgasen sind alle Elektronenschalen vollständig besetzt, weshalb sie kaum chemisch reagieren. Im Unterschied dazu hat Uran eine Elektronenkonfiguration von $5f^3$ 6d $7s^2$ – die Schalen sind also unvollständig besetzt, woraus die bevorzugten Oxidationsstufen IV und VI resultieren.

Uranminerale waren schon im 16. Jahrhundert bekannt. Seit 1565 ist auch der Begriff „Pechblende“ für eines der bekanntesten Uranoxide (UO_2) nachweisbar. Sie wurde lange immer anderen Elementen zugeordnet, bis M. H. Klaproth 1789 erkannte, dass es sich um ein bislang unbekanntes Element handelt. Er benannte es nach dem Planeten Uranus, der kurz zuvor (1781) entdeckt worden war, „Uranit“ und bezeichnete es als Halbmetall (Kirchheimer, 1963). Klaproth gelang zeitlebens keine reine metallische Darstellung des Urans; diese erreichte erst Péligot 1841.

Abb. 1: Pechblende aus dem Erzgebirge (Bildquelle: TU Bergakademie Freiberg, A. Massanek)

2.2 Verwendung von Uran

Im 18. und 19. Jahrhundert wurde Uran vorrangig als Färbemittel in der Glas- und Porzellanherstellung[4] verwendet (Kirchheimer, 1963). Mit Entdeckung der Kernspaltung im Jahr 1938 durch Hahn, Straßmann und Meitner veränderten sich Nutzung und Bedeutung des Urans grundlegend. Uran fand und findet als Primärenergieträger in Kernkraftwerken und Nuklearwaffen Verwendung und besitzt damit eine große wirtschaftliche und umweltrelevante Bedeutung.

Nach dem II. Weltkrieg wurde Uran auf dem Gebiet der DDR von der ehemaligen SDAG Wismut in großem Umfang abgebaut und als Reparationsleistung an die Sowjetunion geliefert (vgl. Kapitel 4).

[4] Die Färbungen reichen von gelb-orange bis rot und besonders grün („Annagrün“), beliebt war auch der Effekt unter UV-Licht.

Abb. 2: Hauer im Abbau bei der radiometrischen Erzsortierung, ca. 1960 (Wismut GmbH)

Bis heute wird (abgereichertes) Uran als Gegengewicht im Heck von Flugzeugen (z B. Boeing 747), als Abschirmung in der Atomindustrie, in panzerbrechender Munition oder als Panzeramierung (z. B. M1 Abrams) verwendet.

2.3 Humantoxische Wirkungen

Bei Urankonzentrationen bis zu 60 µg/L im Trinkwasser steht die chemische Toxizität gegenüber der radiologischen Wirkung im Vordergrund; in noch höheren Konzentrationen überwiegt die Wirkung der Radioaktivität. Da das Uranyl-Kation hinsichtlich Größe und Ladungsdichte dem hydratisierten Ca^{2+}-Ion ähnelt, wird es entsprechend gut in Skelett und Nieren eingelagert (Streit, 1992).

Limson Zamora et al. (1998) fanden in einer Studie zur chronischen Aufnahme von Uran aus kontaminiertem Trinkwasser aus privaten Brunnen deutliche Anzeichen für Störungen der Nierenfunktion (Expositionszeiten bis zu 59 Jahren und Urankonzentrationen zwischen 2 µg/L und 78 µg/L).

Das regulatorisch-toxikologische Augenmerk gilt dem nierentoxischen Potenzial des Urans, auf das sich bislang die humantoxikologischen Bewertungen beziehen. Dies gilt auch für die Motivation zur Festsetzung des Uran-Grenzwertes von 10 µg/L Trinkwasser in der ersten Verordnung zur Änderung der Trinkwasserverordnung vom 03. Mai 2011 (Anlage 2 zu § 6 Abs. 2, Chemische Parameter, Teil I). Die Höhe des Grenzwertes wurde von Konietzka et al. (2005) detailliert abgeleitet.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfiehlt seit 2011 einen gesundheitlichen Leitwert (*Guide Value)* für Trinkwasser von 30 µg/L; in der EU-Trinkwasserrichtlinie ist kein Wert für Uran festgelegt. Die WHO hat einen Tolerable Daily Intake (TDI)-Wert für Uran abgeleitet. Dieser Wert gibt an, welche Menge eines Stoffes ein Mensch sein Leben lang täglich aufnehmen kann, ohne dass gesundheitliche Risiken zu befürchten sind. Für die Aufnahme von Uran wurden 0,6 µg/kg Körpergewicht und Tag ermittelt. Dieser Wert liegt auch der Ableitung der Höchstkonzentration von Uran in Mineralwässern zu Grunde.

Das Umweltbundesamt (UBA) und das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) erkennen für die deutschen Verbraucher derzeit kein Risiko infolge einer Aufnahme von Uran mit der

Nahrung. Dies gilt auch für die Aufnahme von Uran mit dem Trinkwasser, wenn der Grenzwert eingehalten wird (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4193.html).

2.4 Uran in Grund- und Trinkwasser

Die Urankonzentrationen des Grundwassers variieren in Abhängigkeit von der geogenen Zusammensetzung der wasserführenden Gesteine deutlich (Tabelle 1). Dabei liegt das 90. Perzentil weit unterhalb der Maximalwerte, was darauf hindeutet, dass die Maximalwerte auf wenige Messstellen zurückzuführen sind.

Im Hinblick auf die Trinkwasserversorgung ist anzumerken, dass Brunnen mit auffälligen Urankonzentrationen z. T. stillgelegt wurden oder Maßnahmen zur Reduzierung der Urankonzentration im Trinkwasser getroffen wurden.

Tabelle 1: Urankonzentrationen in Grundwässern Deutschlands differenziert nach Hauptgesteinsarten (N = Anzahl der Proben, P90 = 90. Perzentil aller Proben) (Kunkel & Wendland, 2005, in LAU-ST, 2007 - Auszug).

	N	Minimum [µg/L]	P90 [µg/L]	Maximum [µg/L]
Sande und Kiese des Norddeutschen Flachlandes	790	0,001	1,20	1134,00
Quartäre Sedimente der Flussauen	463	0,06	4,40	58,00
Tertiäre Sedimente	575	0,0003	3,00	23,00
Sandsteine und silikatische Wechselfolgen	457	0,0003	7,20	1450,00
Kalksteinfolgen des Muschelkalks	398	0,02	1,80	11,80
Sandsteinfolgen des Buntsandsteins	402	0,0003	3,60	71,40
paläozoische Sedimentgesteine	62	0,0003	14,90	91,00
saure Magmatite und Metamorphite	627	0,0003	0,57	35,00

Ähnliche Urankonzentrationen lassen sich auch im Sickerwasser / oberflächennahen Grundwasser (SW / oGW) am Übergang von der ungesättigten zur gesättigten Bodenzone belegen. In einer Studie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Utermann et al., 2009) wurden auf 50 Lockergesteinsstandorten im ländlichen Raum Norddeutschlands Urankonzentrationen im SW / oGW gemessen, die in Abhängigkeit von Landnutzung und Substrat um mehrere Zehnerpotenzen variieren können (Abb. 3).

Bei dem Datenkollektiv für ackerbaulich genutzte Flächen steigen die Mediane der Urankonzentrationen im Sickerwasser / oberflächennahen Grundwasser von Sand (< 0,1 µg/L) über Geschiebelehm (ca. 0,5 µg/L) bis zu Löss (> 1 µg/L).

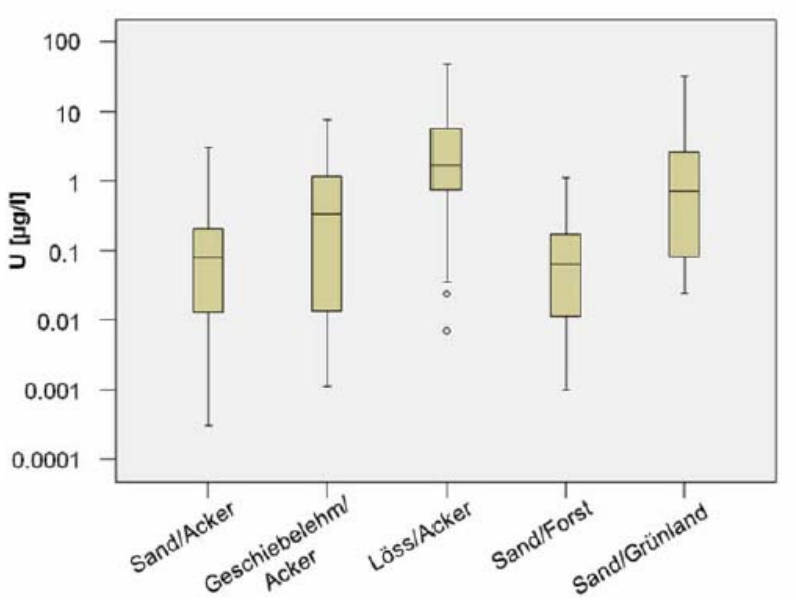

Abb. 3: Urankonzentrationen (Whisker-Boxplots) im Sickerwasser / oberflächennahen Grundwasser von 50 Standorten in Norddeutschland, differenziert nach Standorttypen (Utermann et al., 2009)

Da sich die Art der Trinkwassergewinnung und –aufbereitung regional stark unterscheiden kann, lassen die Urankonzentrationen des Grundwassers nur eingeschränkt Rückschlüsse auf die Urankonzentrationen im Trinkwasser zu.

In Abbildung 4 ist die regionale Verteilung der Urankonzentrationen im Trinkwasser auf Basis von mehr als 4.000 Einzelmessungen in Deutschland dargestellt. Tendenziell spiegeln sich die geogen bedingten Unterschiede der Urankonzentrationen im Grundwasser im Trinkwasser wider. Andererseits können innerhalb eines Bundeslandes vereinzelt sehr hohe Urankonzentrationen im Grundwasser auftreten, während die Urankonzentrationen im überwiegenden Teil der von den Wasserwerken aufbereiteten Proben unterhalb von 1 µg/L liegt.

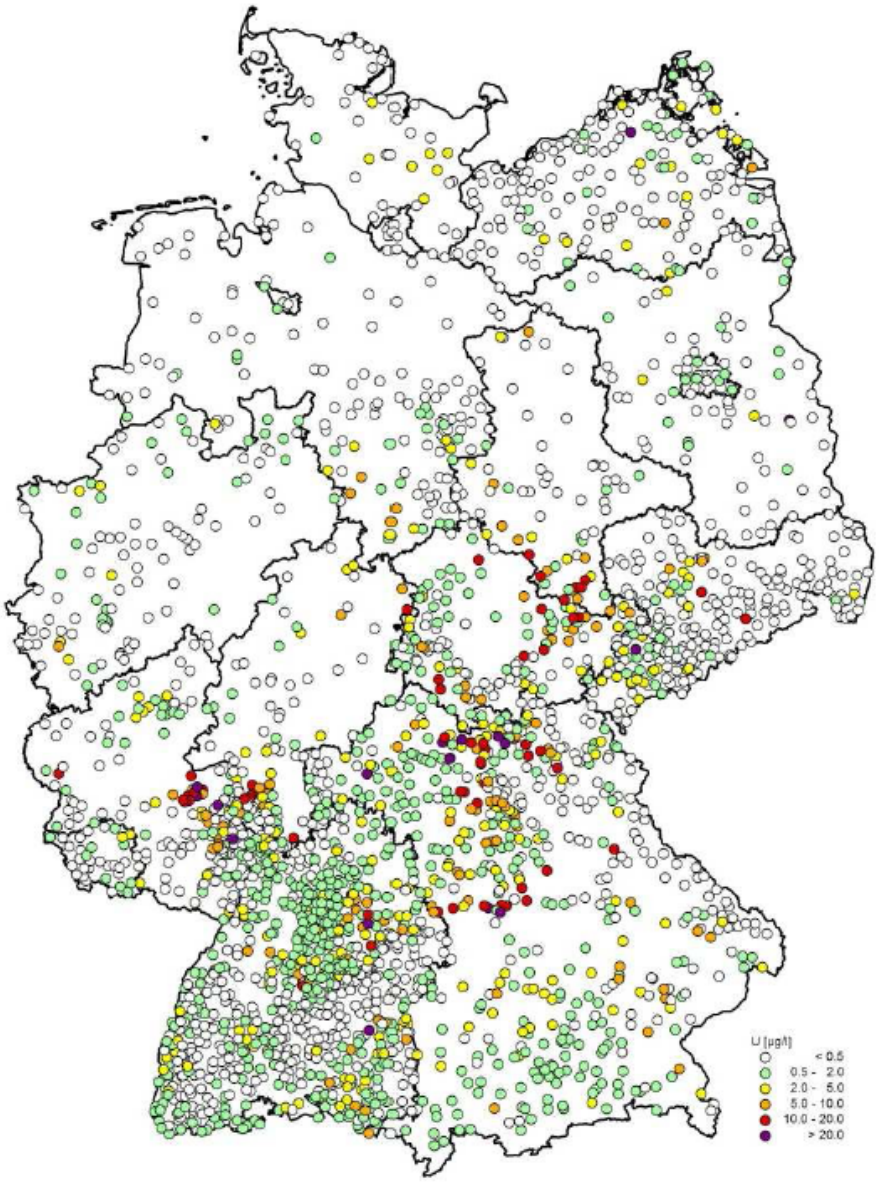

Abb. 4: Regionale Verteilung von Urankonzentrationen im Trinkwasser (Messstelle: Wasserhahn), N = 4092, Daten aus 2003 – 2008 (Smidt et al. 2011)

Es bleibt festzuhalten, dass die überwiegende Mehrzahl der Wasserwerke aller Bundesländer bereits vor der Einführung des Trinkwassergrenzwertes von 10 µg/L am 01.11.2011 Trinkwasser lieferte, das unterhalb dieses Wertes – der bis dahin vom UBA als Richtwert empfohlen worden war – lag. Es ist davon auszugehen, dass heute alle Wasserwerke den Trinkwassergrenzwert von 10 µg/L einhalten.

2.5 Uran in Oberflächenwasser

Schwermetalle kommen auch in Seen und Flüssen bereits natürlicher Weise vor. Die durchschnittliche Urankonzentration liegt in Flusswasser bei 0,04 µg/L und in Meerwasser bei 3,3 µg/L (Seim & Tischendorf , 1990). Die Verteilung der Urankonzentrationen in Oberflächenfließgewässern innerhalb der Bundesrepublik Deutschland ist in Abbildung 5 dargestellt.

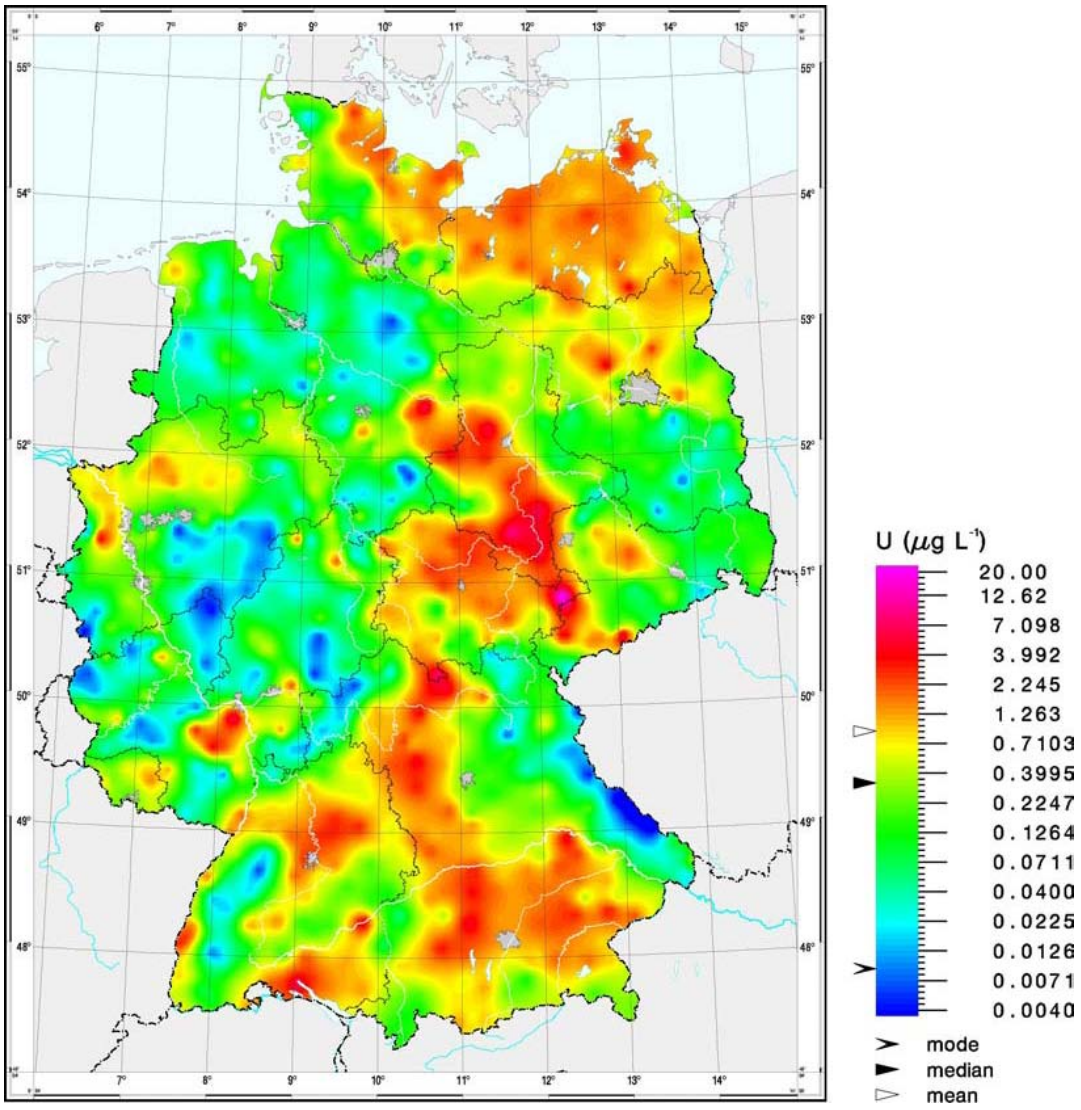

Abb. 5: Verteilung von Uran in Oberflächenfließgewässern Deutschlands nach Birke & Rauch (2008), Darstellung leicht verzerrt

Es zeigen sich deutliche regionale Unterschiede. Besonders hohe Urankonzentrationen treten in den Oberflächengewässern Mecklenburg-Vorpommerns, im nördlichen Harzvorland, im Becken von Saale und Weißer Elster sowie in der Fränkischen und Schwäbischen Alb auf. Die Werte korrespondieren mit den Maximalkonzentrationen im Grundwasser (Tabelle 1, vgl. z. B. „Sande und Kiese des Norddeutschen Tieflandes“) sowie mit den Maximalwerten, die im Trinkwasser einzelner Bundesländer gemessen wurden (z. B. in Bayern, Mecklenburg-Vorpommern, Hessen).

Außer geogen erhöhten Urankonzentrationen in Oberflächengewässern lassen sich Urankonzentrationen bis zu 8 µg/L vor allem in den Flüssen nachweisen, deren Einzugsgebiet sich in (ehemaligen) Uranbergbauregionen mit entsprechend belasteten Sedimenten befindet (z. B. in der Zwickauer Mulde; Wismut, 2008). Durch Überschwemmungsereignisse können Sedimente mit erhöhten Urangehalten auch in die Überflutungsflächen eingetragen werden.

Im Unterschied zu den Fließgewässern liegen derzeit für Standgewässer keine flächenhaften Untersuchungsergebnisse vor. Czegka et al. (2008) untersuchten verschiedene Tagebau-

restseen und natürliche Seen im Raum Leipzig-Halle („Neu-Seenland“), in denen die Urankonzentrationen zwischen 0,41 – 12 µg/L variierten.

2.6 Uran in Böden

Die Urangehalte der Böden sind überwiegend geogenen Ursprungs und schwanken in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des jeweiligen Ausgangsgesteins (Abb. 6). Die bundesweit gemittelten Hintergrundwerte[5] für Uran liegen für Sand bei 1,0 – 1,4 mg/kg TS, für Lehm/Schluff bei 1,6 – 2,5 mg/kg TS (Lockergesteinsböden[6]) bis zu 6,2 mg/kg TS (Festgesteinsböden[7]) (Utermann et al., 2008).

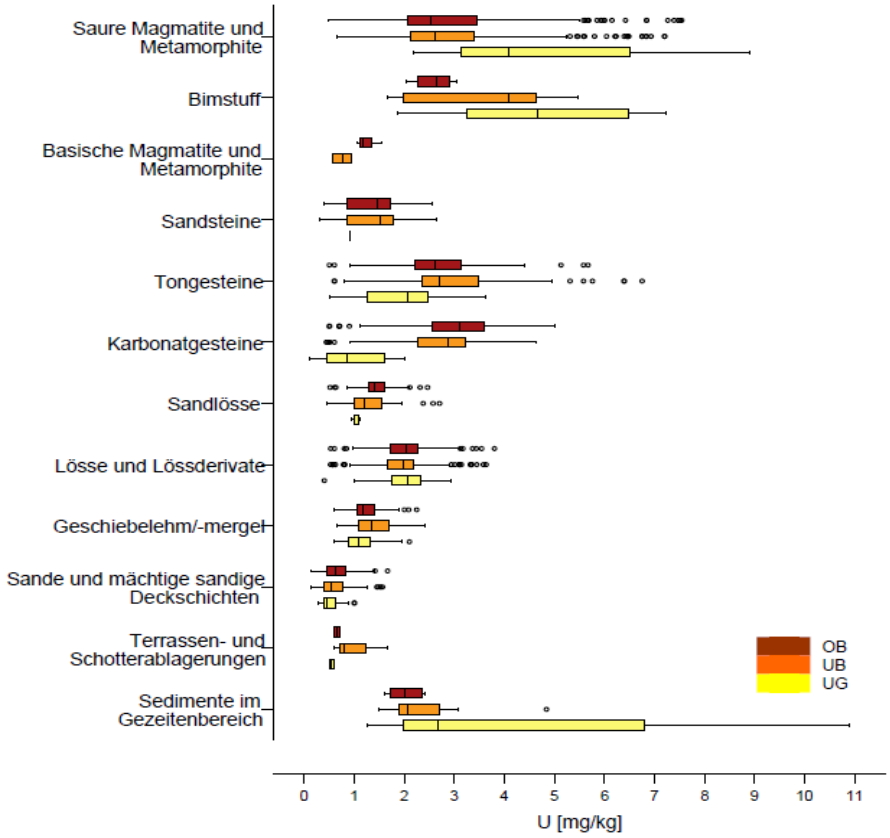

Abb. 6: Boxplots für Gehalte an königswasserextrahierbarem Uran [mg/kg] in Oberböden (OB), Unterböden (UB) und Untergrund (UG), differenziert nach Gruppen von Bodenausgangsgesteinen (Utermann & Fuchs, 2008)

Abb. 7 zeigt eine Übersicht über die Verteilung der Böden in Deutschland. Werden die nach Bodenausgangsgesteinen differenzierten Hintergrundwerte (90. Perzentile) diesen Böden

---

[5] Hintergrundwerte werden hier definiert als das 90. Perzentil der Stichprobe; sie geben den Ist-Zustand der diffus-ubiquitär belasteten Böden an und beinhalten den geogenen Grundgehalt und die ubiquitäre Stoffverteilung als Folge diffuser Einträge in den Boden (LABO 2003).

[6] Lockergestein ist nicht verfestigt, zwischen den einzelnen Bestandteilen besteht kein fester Zusammenhalt (z.B. Kies, Schotter, Geröll, Sand) ; Lockergesteinsböden haben sich aus Lockergestein entwickelt (z.B. Schwarzerde, Fahlerde, Vega).

[7] Festgestein ist mechanisch widerstandsfähig, entsprechend ihrer Entstehung werden sie in sedimentäre (z. B. Tonstein), metamorphe (z. B. Gneise, Marmore) und magmatische (z. B. Granite, Basalte) Festgesteine unterschieden; Festgesteinsböden haben sich aus Festgestein entwickelt (z. B. Rendzina, Ranker)

zugeordnet, ergibt sich die in Abb. 8 dargestellte räumliche Verteilung der Uran-Hintergrundwerte. Dabei sind die Hintergrundwerte in klassierter Form getrennt für die Ober- und Unterböden ausgewiesen. Obwohl in dieser Abbildung aus Gründen der besseren Darstellbarkeit mit klassierten Werten gearbeitet wurde, spiegeln die Unterschiede in den Urangehalten deutlich den geologischen Aufbau Deutschlands wider.

Hohe Uran-Hintergrundwerte mit max. 4,5 bis 5,0 mg/kg TS (rote bis orange Farben) weisen Festgesteinsböden aus sauren Magmatiten und Metamorphiten, Tongesteinen sowie Kalk- und Mergelgesteinen auf. Mittlere Werteniveaus (gelbliche Farben) finden sich v.a. im Lössgürtel sowie den Geschiebelehmen Norddeutschlands, während die sandigen Gebiete in Norddeutschland die niedrigsten Uran-Hintergrundwerte (grüne Farben) aufweisen.

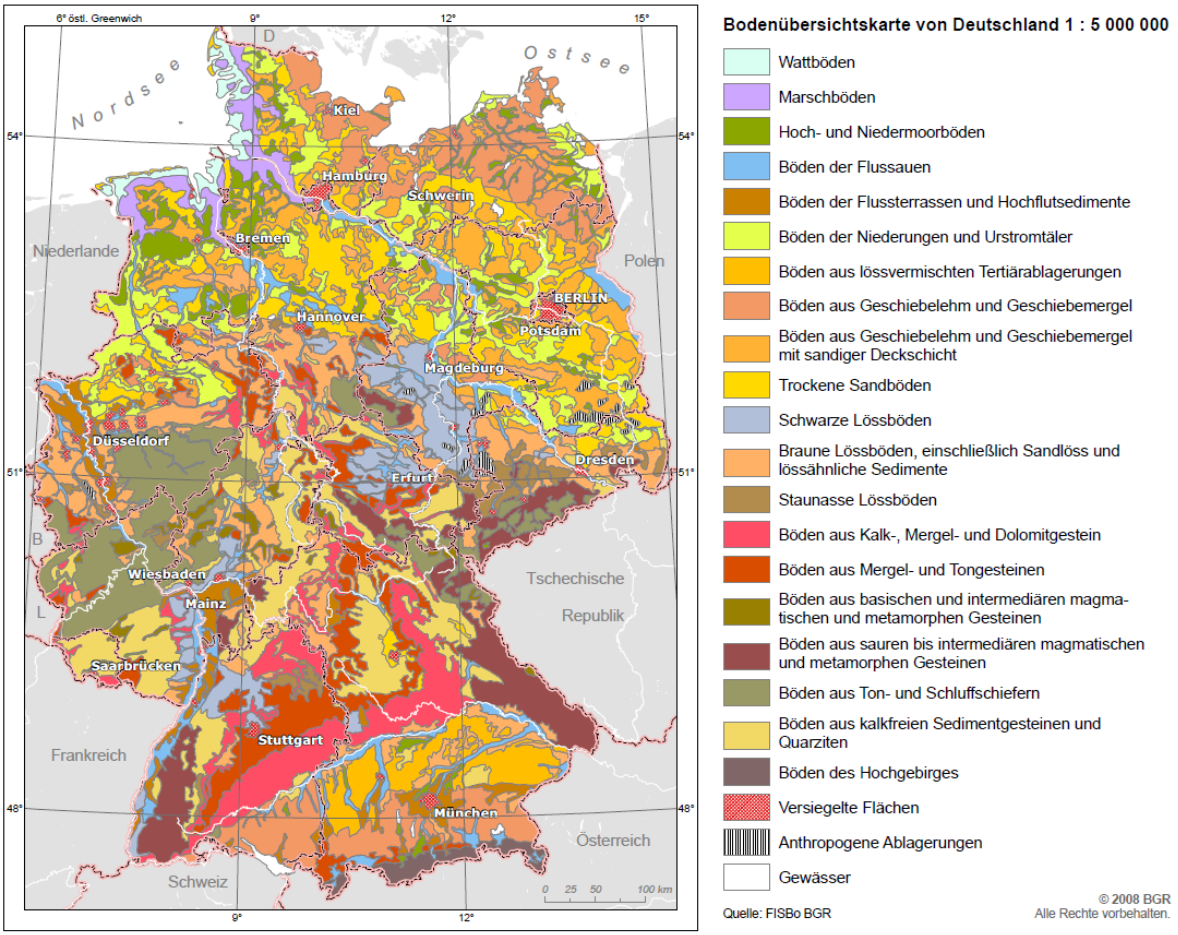

Abb. 7: Bodenübersichtskarte Deutschland (1:5 000 000) (BGR 2008)

Insbesondere im Bereich der Festgesteinsböden mit den relativ höchsten Uran-Hintergrundwerten zeigen die Unterböden ein höheres Werteniveau als die Oberböden, was auf die dominierende geogene Komponente hinweist. Die Mediane (50. Perzentile) der Urangehalte liegen im Falle der unbelasteten Böden aus Sanden, mächtigen sandigen Deckschichten sowie aus Sandlössen, Sandsteinen und Geschiebelehmen/-mergeln zwischen 0,5 mg/kg (Sande) bis 1,5 mg/kg (Geschiebelehme). Für Lössböden werden Mediane von ca. 2 mg/kg angegeben. Die höchsten Urangehalte mit Medianen von ca. 2,5 bis > 3 mg/kg weisen Böden über sauren Magmatiten und Metamorphiten sowie Ton- und Karbonatgesteinen auf (Utermann & Fuchs, 2008).

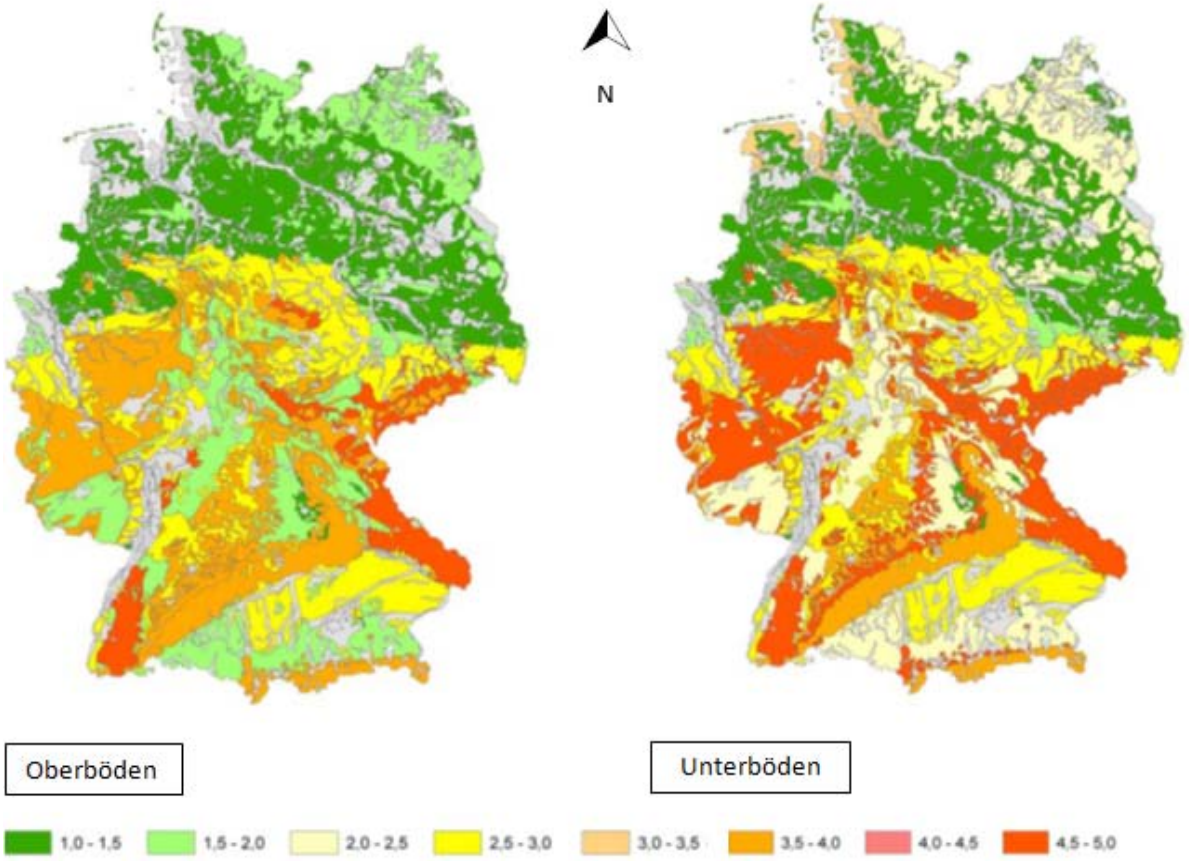

Abb. 8: Verteilung der 90. Perzentile der Hintergrundgehalte (mg/kg) in Böden in Deutschland, differenziert nach Ober- und Unterböden (nach Utermann & Fuchs, 2008), grau: keine Daten

Insgesamt entsprechen die in Abb. 8 dargestellten Hintergrundwerte (90. Perzentile) in Deutschland – abgesehen von Uranerzlagerstätten – den Werten, die von verschiedenen Autoren mit 2,5 – 4 mg/kg als Durchschnittsgehalt für die Lithosphäre angegeben werden (Rösler & Lange, 1976).

2.7 Uran in der Luft

Der Urangehalt in der Luft kann besonders in Ballungsräumen stark schwanken (0,08 - ca. 1,5 ng/m³) (Kownacka et al., 1990). Dies ist vor allem auf anthropogene Ursachen zurückzuführen, die in Kapitel 5.3 ausführlicher betrachtet werden.

3 Gesetzliche Regelungen

Boden

Die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung [BBodSchV, 1999] enthält keine Vorsorge-, Prüf- oder Maßnahmenwerte für Uran in Böden.

Uraneinträge aus Düngemitteln können langfristig zu einer unerwünschten Erhöhung der Urangehalte in Böden führen. Die Düngemittelverordnung enthält bislang für Uran in Phosphatdünger keine Kennzeichnungs- oder Grenzwerte.

Für die radiologische Bewertung von Altlasten durch historischen Bergbau existiert ein „Richtwert“ von 0,2 Bq (U-238) (SSK, 1991b, SSK, 1992), was einem Urangehalt von etwa 16 mg/kg entspricht.

Wasser

Das Umweltbundesamt hatte 2005 einen gesundheitlichen Leitwert für die lebenslange Aufnahme von 10 µg/L Uran im Trinkwasser empfohlen. Dieser Wert hat mit der Änderung der Trinkwasserverordnung vom 03. Mai 2011 am 01. November 2011 als Grenzwert Rechtskraft erlangt.

Abfüller abgepackter Wässer dürfen nur dann mit dem Aufdruck „geeignet für die Zubereitung von Säuglingsnahrung“ für ihr Produkt werben, wenn es (u. a.) nicht mehr als 2 µg /L Uran enthält. Dieser Wert liegt wesentlich unter dem für Säuglinge als toxikologisch unbedenklich abgeleiteten. Er beruht auf § 1 Absatz 2 der Verordnung über solche (diätetischen) Lebensmittel (DiätV, 1963), die für eine besondere Ernährung bestimmt sind und die sich deshalb „aufgrund ihrer besonderen Zusammensetzung oder des besonderen Verfahrens ihrer Herstellung deutlich von den Lebensmitteln des allgemeinen Verzehrs unterscheiden“ müssen.

Für Oberflächengewässer existiert eine Umweltqualitätsnorm für Uran in Höhe von 2 µg/L in der filtrierten Probe (Bundesoberflächengewässerverordnung, 2011).

4 Uranlagerstätten – Uranbergbau – Altlastensanierungsgebiete

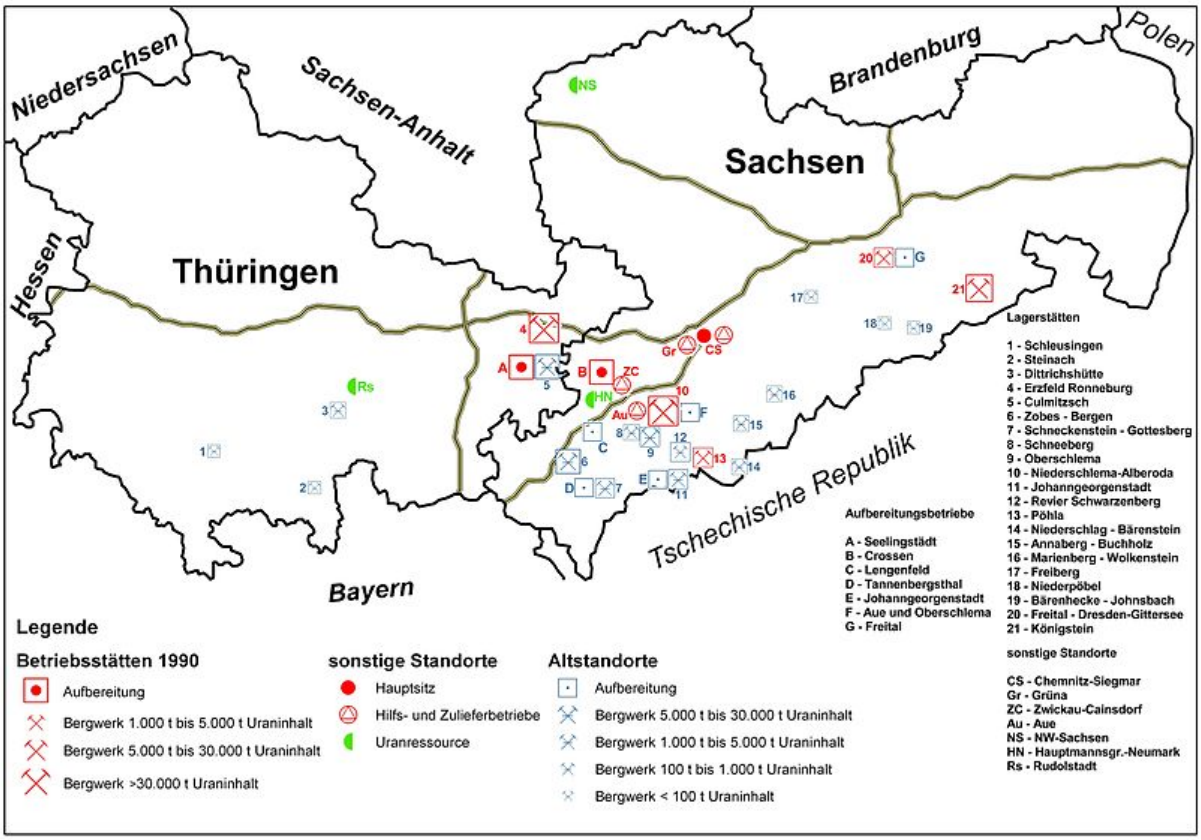

Abb. 9: Standortübersicht der Wismut GmbH in Sachsen und Thüringen (Copyright: geomartin, 2008)

Bis 1990 war die DDR nach der UdSSR, den USA und Kanada der viertgrößte Uranproduzent der Welt; insgesamt wurden ca. 231.000 t Uran gefördert (Gatzweiler, 1996). Wie aus Abbildung 9 ersichtlich, konzentrierte sich der Abbau der Uranlagerstätten auf ein relativ kleines Gebiet in Sachsen und Thüringen.

Kleinere Uranlagerstätten befinden sich auch in Bayern (Oberpfalz, Tirschenreuth), in Baden-Württemberg (Schwarzwald, Menzenschwand) und in Rheinland-Pfalz (Ellweiler) (Koß et al. 1992; Ziegler & Dardel, 1984).

Abb. 10: Industrielle Absetzanlage (IAA) Culmitzsch, 1991 (links) und 2009 (Bildquelle: Wismut GmbH)

Der Abbau des Uranerzes auf dem Gebiet der DDR erfolgte durch die SAG und später durch die SDAG Wismut[8]. Durch diese Aktiengesellschaft wurde das gewonnene Erz aufbereitet und die Aufbereitungsschlämme in so genannte Industrielle Absetzanlagen gepumpt (Abb. 10).

Der aktive Uranerzbergbau in Deutschland wurde 1990 eingestellt. Die von dem zwischen 1962 und 1990 betriebenen Uranbergbau betroffenen Gebiete werden seither saniert (Wismut, 1999). Dabei geht es im Einzelnen um:

- Haldenaufstandsflächen: 1.520 ha
- Haldenvolumen: 312 Mio. m³
- Industrielle Absetzanlagen : 14 (ca. 690 ha, Wismut 1993)
- sonstige Betriebsflächen der SDAG Wismut ca. 1.550 ha (Wismut 1993)
- Wasser (Reinigung / Behandlung): 214 Mio. m³

Das behandelte Wasser wird vorrangig in die Zwickauer Mulde (Abb. 10), untergeordnet auch in die Elbe, Weiße Elster und Pleiße eingeleitet. Dabei wurden zwischen 1999 und 2008 jährlich zwischen 2,2 und 4,5 t Uran in die Oberflächengewässer eingetragen (Wismut, 2008).

[8] SAG: Sowjetische Aktien-Gesellschaft, SDAG: Sowjetisch-Deutsche Aktien-Gesellschaft

Abb. 11: Talsperre Eibenstock (Zu- und Abfluss: Zwickauer Mulde) (Foto: André Krawath)

5 Diffuse Uraneinträge in Böden und Wasser

Während die Altlastenproblemtik als Folge des Uranbergbaus eine eher punktförmige bzw. regional wirksame Belastung der Böden und Gewässer zur Folge hat, tragen verschiedene diffuse Quellen deutschlandweit in unterschiedlichem Ausmaß zur flächenhaften Belastung der Böden und Gewässer mit Uran bei.

5.1 Uraneinträge durch Düngung

Rohphosphat enthält – abhängig von seiner Entstehung – Uran. 90% aller abgebauten Rohphosphate werden zur Düngemittelherstellung genutzt. Entsprechend hängt der Urangehalt im Phosphatdünger von der Herkunft des Rohphosphates ab. Während die wenigen magmatischen Lagerstätten[9] fast frei von Uran sind (Urangehalte < 10 mg/kg; Dybeck 1962), weisen die sedimentären Lagerstätten[10] unterschiedlich hohe Urangehalte auf (Baturin & Kochenov, 2001).

Je nach Art der Verarbeitung und abhängig von der Aufschlussmethode variieren somit auch die Urangehalte in den Düngemitteln (vgl. Tabelle 2).

[9] z. B. Russland (Kola-Apatit), Südafrika, Brasilien
[10] z. B. Marokko, Algerien, Tunesien, Ägypten, USA, China

Tabelle 2: Urangehalte (mg/kg Düngemittel) verschiedener Phosphatdünger (Kratz et al., 2008)

Düngertyp / Ursprung	n	Min.	Max.	Mittelwert	Quelle
Superphosphat					
USA	3	60.5	172	**104**	*6, 9*
Mexiko	5	90.2	90.6	**90.5**	*4, 5*
Brasilien	11	21.4	93.7	**65.2**	*2, 13*
Tansania	1			**325**	*8*
Ungarn (RP Kola)	6	1.8	2.0	**2.0**	*1*
Deutschland (RP unbekannt)	1			**91**	*1*
Triple Superphosphat					
USA	4	143	208	**178**	*6, 9, 11*
Mexiko	4	196	197	**197**	*4, 5*
Brazilien	11	14.7	69.7	**50.2**	*2, 13*
Tansania	1			**362**	*8*
Deutschland(RP unbekannt)	2	52.3	160	**106**	*1*
Weicherdiges/gemahlenes Roh-phosphat					
USA	4	8.7	144	**42.9**	*6*
Nord-Afrika	32	10	1117	**205**	*7, 12*
Deutschland (RP unbekannt)	2	56.6	72.9	**64.8**	*1*
NP Dünger					
USA	16	161	165	**163**	*11*
Mexiko	1			**188**	
Brazilien	2	49.6	93.8	**71.7**	*2*
Marokko	1			**133**	*3*
Rumänien (RP unbekannt)	4	3.5	149	**59.4**	*10*
Ungarn (RP Kola)	2	2.8	3.0	**2.9**	*1*
Deutschland (RP unbekannt)	3	0.62	61	**27**	*1*
PK Dünger					
USA	3	69.9	109	**89.4**	*9*
Belgien (RP unbekannt)	1			**98.6**	*3*
Deutschalnd (RP unbekannt)	3	31.2	163	**82.1**	*1*
NPK Dünger					
USA	5	39.7	113	**65.5**	*9*
Brazilien	12	5.2	54.3	**27.1**	*14*
Rumänien (RP unbekannt)	3	24	62	**42.7**	*10*
Ungarn (RP Kola)	8	0.04	1.9	**0.5**	*1*
Belgien (RP unbekannt)	1			**46**	*3*
Deutschland (RP unbekannt)	20	<0.05	33.3	**9.9**	*1*

1 FAL sample collection, 2003-2007; 2 Conceicao & Bonotto, 2006; 3 El Ghawi et al., 1999; 4 Godinez et al., 1997; 5 Guzman et al., 1995; 6 Hamamo et al., 1995; 7 Heiland, 1986; 8 Makweba & Holm, 1993; 9 McBride & Spears, 2001; 10 Pantelica et al., 1997; 11 Robarge et al., 2004; 12 Sam et al., 1999; 13 Saueia & Mazilli, 2006; 14 Yamazaki & Geraldo, 2003;
RP = Rohphosphat

Auch organische Dünger können Uran enthalten. Bei Klärschlamm haben sich die Gehalte zwischen Anfang der neunziger Jahre und 2008 ungefähr verdoppelt (BfS, 1994; 2008), von 1,2 mg/kg TM auf ≈ 2,4 mg/kg TM (Median). Kratz & Schnug (2006) weisen sogar 3,5 mg/kg als Medianwert von 204 deutschlandweit untersuchten Klärschlämmen aus.

Uran wurde auch in Stallmist (Bsp.: Rindermist: 0,05 – 3,7 mg/kg TM) und Gülle (Bsp.: Rindergülle: 0,09 – 0,23 mg/kg TM) nachgewiesen (Kratz & Schnug, 2006).

Eine Abschätzung möglicher Uraneinträge aus verschiedenen Düngemitteln (ausgehend von einer Düngung von 22 kg Phosphor/ha*a) ist anhand Tabelle 3 möglich.

Tabelle 3: Uraneinträge über Phosphor-Düngung mit verschiedenen Mehrnährstoffdüngern sowie Rindergülle und Klärschlamm (ausgehend von: 22 kg Phosphor/ha) (Kratz et al., 2008)

Typ	P-Konzentration [% P] Spannweite	U-Gehalt [mg/kg P] Spannweite	U-Eintrag [g/ha*a] Spannweite	U-Eintrag [g/ha*a] Mittelwert
TSP (Triple-Superphosphat)	16,6 – 20,6	52,3 - 362	5,6 - 48	22
NP (Stickstoff-Phosphat-Dünger)	5,3 – 25,8	0,62 – 198	0,05 - 82	7,0
PK (Phosphat-Kalium-Dünger)	5,8 – 13,4	31,2 - 163	5,1 - 61	23
NPK (Stickstoff-Phosphat-Kalium-Dünger)	1,5 – 13,5	0,04 - 113	0,01 - 166	8,0
Rindergülle	0,43 – 2,1	0,15 – 1,4	0,16 - 7	2,9
Klärschlamm	2,1 – 2,2	0,0005 – 18,5	0,001 - 19	3,2

Es wird deutlich, dass die Urangehalte und resultierende Einträge in die Böden bei organischen Düngemittel weit niedriger als bei gängigen Mineraldünger liegen.

Einen Hinweis auf die schleichende Anreicherung von Uran in Oberböden als Folge der Phosphatdüngung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen identifizieren Utermann & Fuchs (2008) anhand von Bodenuntersuchungen an ca. 1.000 land- und forstwirtschaftlich genutzten Standorten in Deutschland, wo die Gehalte an königswasserextrahierbarem Uran in Ober- und Unterböden erfasst wurden.

Im Vergleich zu Forstböden, für die ein langjähriger Uraneintrag über Phosphatdünger ausgeschlossen werden kann, wiesen ackerbaulich genutzte Böden eine mittlere Anreicherung von 0,15 mg Uran/kg auf. Bezogen auf die mittleren Urangehalte in Sanden und Geschiebelehmen bestätigen diese Befunde den im Rahmen der geochemischen Inventur der Ostsee-Anrainerstaaten (Reimann et al., 2003) für Norddeutschland ausgewiesenen Anreicherungsfaktor von ca. 1,2.

5.2 Uraneinträge durch Niederschlagswasser

Uran kann durch Niederschlagswasser in Böden und Oberflächengewässer eingetragen werden. In Tabelle 4 sind auf der Grundlage von Urankonzentrationen im Niederschlagswasser die minimal und maximal zu erwartenden Uranfrachten für einen durchschnittlichen Jahresniederschlag von 650 mm berechnet.

Tabelle 4: Uranfrachten im Niederschlagswasser bei minimalen und maximalen Konzentrationen (Datenquelle: BfS 2006) und durchschnittlichen Niederschlagswerten von 650 L/m² *a (Lysimeterstation Brandis bei Leipzig, Haferkorn 2000)

		Min.	Max.
Aktivitätskonzentration [mBq/L]		0,02	1,4
Konzentration [µg/L]		0,002	0,113
Fracht [mg/ha*a]		10,5	734

5.3 Uraneinträge über die Luft

Uran kann auf verschiedenste Weise in die Luft gelangen. Die Haupteintragspfade sind Bodenabwehungen, Verbrennung fossiler Stoffe und Pflanzen, gesteinsverarbeitende Industrie, Uranbergbau und Metallverhüttung (Abb. 13). Aus der Luft lagert sich Uran auf dem Boden ab und kann tiefer in den Boden eingetragen oder oberflächlich in Gewässer abgespült werden.

Abb. 12: Haldenlandschaft Schlema, 1965 (Wismut GmbH)

Abhängig von ihrer Entstehung kann sowohl Braun- als auch Steinkohle oft in erheblichem Maße Uran und dessen Tochternuklide (v.a. Radium-222, Blei-210) enthalten. Mit Hilfe moderner Filtertechnik wird Uran zu 99% in den Flugaschen der Kraftwerke zurückgehalten, so dass die Emission aus Kohlekraftwerken heute keine relevante Quelle mehr für diffuse Uraneinträge in Böden und Gewässer darstellen. Die Frage nach dem Verbleib der Flugaschen stellt sich trotzdem, da die Flugaschen eines Kohlekraftwerks keiner strahlenrechtlichen Betrachtung[11] unterliegen. Merkel (2009) rechnet im Zeitraum von 1937 bis 2040 mit einer Freisetzung von 830.000 t Uran in Flugaschen. Bei ordnungsgemäßer Verwertung oder Entsorgung sind heute allerdings auch von Flugaschen keine relevante Uraneinträge in Böden und Gewässer zu erwarten.

6 Diffuse Uranausträge aus Böden und Transfer in die Nahrungskette

Pfad Boden – Grundwasser

Es gibt bislang nur sehr wenige Untersuchungsergebnisse über die Urankonzentrationen im Sickerwasser natürlicher Böden. Gleichwohl gibt es eine Reihe gut belegter wissenschaftlicher Annahmen über das Verhalten von Uran in Böden. Uran wird in Böden bevorzugt an der organischen Substanz, nachgeordnet aber auch an Tonmineralen sorbiert (Merkel, 2009). Da Uran mit organischen Säuren (Humin- und Fulvosäuren) Komplexe bildet, begünstigt das Vorhandensein von Huminstoffen die Rückhaltefähigkeit des Bodens gegenüber Uran.

Grundsätzlich ist die Mobilität von Uran abhängig von der chemischen Speziierung[12]. In aquatischen Systemen sind vor allem die Uranyl-Carbonato-Komplexe von Bedeutung. Sie führen einerseits zu einem Anstieg der Urankonzentrationen in der Lösungsphase und verhindern gleichzeitig aufgrund ihrer Ladung eine Fixierung des Urans im Boden. Gerade unter den bodenchemischen Bedingungen landwirtschaftlich genutzter Böden bedingt der besondere Chemismus der Uran-Verbindungen eine höhere Mobilität und somit Verlagerung in tiefere Bodenschichten und ins Grundwasser. Insofern ist der Eintrag von Uran über Phosphatdünger in landwirtschaftlich genutzte Böden deutlich kritischer zu werten als geogen im Boden vorhandenes Uran. Schon heute lassen sich in oberflächennahen Grundwässern sandiger Substrate unter Acker im Vergleich zu Forst im Mittel 2-fach erhöhte Urankonzentrationen nachweisen, allerdings in einem Konzentrationsbereich < 10 µg/L (Utermann et al., 2009, Huhle et al., 2008).

Sickerwässer von Tailings [13] aus der Uranerzaufbereitung enthalten durchschnittlich 1 – 15 mg/L Uran (Brackhage et al., 1999, Dienemann et al., 2002).

Pfad Boden – Pflanze

Gefäßpflanzen können Uran grundsätzlich über die Wurzel aufnehmen und dort anreichern. Wenn eine Aufnahme durch Pflanzen stattgefunden hat, lassen sich in den Wurzeln die höchsten Urangehalte messen; in den oberirdischen Pflanzenteilen sind die Urangehalte noch deutlich geringer (Brackhage et al., 1999, Barley et al., 2005)

[11] Eine strahlenschutzrechtliche Relevanz ist aufgrund der geringen Radiotoxizität nicht gegeben.
[12] Speziierung bezeichnet in diesem Fall die chemische Ausprägung (Spezies) von Uran (…)
[13] Tailings sind feinkörnige Rückstände, die in Form von Schlämmen vorliegen

Insgesamt ist der Pfad Boden – Pflanze von untergeordneter Bedeutung, da die Aufnahme sehr gering ist. Der Entzug von Uran mit Ernteprodukten liegt deutlich unter 0,5 g/ha Uran (Kratz et al., 2008).

7 Fazit und Handlungsempfehlungen

Die Urangehalte in Böden schwanken naturbedingt zwischen < 1 mg/kg und ca. 5 mg/kg Boden. Im Grundwasser variieren die Urankonzentrationen stärker zwischen < 0,001 µg/L und ca 10 µg/L, liegen i. d. R. jedoch unterhalb von 10 µg/L. Höhere Urankonzentrationen finden sich in Oberflächengewässern, die durchschnittlichen Urankonzentrationen liegen in Flusswasser bei 0,04 µg/L und in Meerwasser bei 3,3 µg/L. Auch Sedimente und Böden im Einflussbereich ehemaliger Uranbergbauregionen (z. B. Zwickauer Mulde) enthalten vermehrt Uran.

Durch menschliches Tun wird Uran in die Böden Deutschlands primär im Zuge der Verwendung uranhaltiger, mineralischer Phosphatdünger auf landwirtschaftlich genutzten Flächen eingetragen. Eine Reduzierung des Eintrags durch Entfernung von Uran aus den Rohphosphaten sowie die Rückgewinnung von Uran aus Kraftwerksaschen ist technisch möglich, wird wohl aber erst mit deutlich steigenden Rohstoffpreisen wirtschaftlich attraktiv.

Um die unerwünschte Anreicherung von Uran in Böden im Zuge der Düngung landwirtschaftlich genutzter Flächen mit mineralischen Phosphatdüngern zu begrenzen, setzt sich das Umweltbundesamt in Übereinstimmung mit der Kommission Bodenschutz (KBU 2011[14]) unter Vorsorgeaspekten für die folgenden Maßnahmen ein:

1. Der Urangehalt in Phosphatdüngern sollte in der Düngemittel-Verordnung wie folgt geregelt werden:
    - Kurzfristige Einführung einer Kennzeichnungspflicht von Phosphatdüngern ab einem Urangehalt von 20 mg/kg P_2O_5. Diese Kennzeichnung ermöglicht es dem Anwender gezielt Uran-arme Phosphatdünger einzusetzen.
    - Mittelfristige Festlegung eines Uran-Grenzwertes in Höhe von 50 mg/kg P_2O_5. Die Einführung eines Grenzwertes für das Inverkehrbringen von Düngemitteln setzt voraus, dass für die Entfernung von Uran aus den Rohphosphaten entsprechende technische Kapazitäten vorhanden sind und die Maßnahme wirtschaftlich vertretbar ist. Der Grenzwert berücksichtigt die Uranentzüge durch Kulturpflanzen.
2. Entsprechende Begrenzungen sollten sowohl für die Uran- als auch die Cadmiumgehalte in Phosphatdüngern auf EU-Ebene eingeführt werden.

Forschungsbedarf besteht insbesondere zum ökotoxikologischen Verhalten von Uran, vor allem im Hinblick auf Uranwirkungen auf die Fauna des Grundwassers und des Bodens. Auch die standortspezifischen und produktionstechnischen Randbedingungen des Einflusses der Mineraldüngung auf die Urankonzentrationen des Sickerwassers und des Grundwassers

[14] Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt, Positionspapier: Uran-Einträge in landwirtschaftliche Böden durch Düngemittel: http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/kbu/download.htm

sowie die Mobilität und damit Verlagerung des Urans sind noch nicht ausreichend untersucht.

Literatur

Barley, R.W.; Hutton, C.; Brown, M.M.E.; Cusworth, J.E.; Hamilton, T.J. (2005): Trends in biomass and metal sequestration associated with reeds and algae at Wheal Jane Biorem pilot passive treatment plant, Science of The Total Environment, Vol. 345, 279-286

Baturin, G.N.; Kochenov, A.V. (2001): Uranium in Phosphorites, Lithology and Mineral Resources, 36/4, 303-321

Birke, M.; Rauch, U. (2008): Uranium in stream water of Germany; *in:* De Kok, L.; Schnug, E. (Hrsg.): Load and Fate of fertilizer derived Uranium, Backhuys Publishers, Leiden. 79-91

BMELV (2011): Ökologischer Landbau in Deutschland, Informationsschrift, Stand: Juli 2011 (http://www.bmelv.de/SharedDocs/Standardartikel/Landwirtschaft/Oekolandbau/OekologischerLandbauDeutschland.html)

Brackhage, C.; Dienemann, H.; Dannecker, A.; Dudel, E.G. (1999): Radionuclide and heavy metal distribution in soil and plants from a 35-year old reclaimed uranium mining dump site, Poster, 5th Intern. Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, Wien, 10. – 15.07.1999

Brackhage, C.; Dudel, E.G. (2002): Long-term differences in transfer and accumulation of potentially toxic trace elements and radionuclides in trees on uranium mining dumps (Erzgebirge, Germany); in: Merkel, B. J.;Planer-Friedrich, B.; Wolkersdorfer, C. (Hrsg.): Uranium in the Aquatic Environment, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 471-478.

Bundesamt für Risikobewertung (BfR) (2009): Ausgewählte Fragen und Antworten zu Uran in Mineralwasser, 28.01.2009, www.bfr.bund.de

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (1995): Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1994, Salzgitter

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2007): Jahresbericht 2006, 98 p. http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-201005041837

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2009): Jahresbericht 2008, 96 p., http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-201004291811

Bundes-Bodenschutz- und-Altlastenverordnung (BBodSchV) (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die durch Artikel 5 Absatz 31 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist

Bundesoberflächengewässerverordnung (OGewV) (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer, Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juli 2011 (BGBl. I S. 1429)

Czegka, W.; Junge, F.W.; Hausmann, J.; Wennrich, R. (2008): Uranium in anthropogenic Lakes oft he New Central German Lake District. *in:* Merkel, B.J.; Hasche-Berger, A. (Hrsg.): Uranium, Mining and Hydrologeology, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 201-213

Deutscher Bundestag (2008): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Hans-Josef Fell, Bärbel Höhn, Sylvia Kotting-Uhl, weiterer Abgeordneter und der

Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: „Zukunft der Kohleverstromung“ – Drucksache 16/8554; Drucksache 16/9032 5.5.2008

Deutsches Atomforum (2008): Jahresbericht 2008 - Zeit für Energieverantwortung. Berlin 2009

Diätverordnung (DiätV) (1963): Verordnung über diätetische Lebensmittel, Diätverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. April 2005 (BGBl. I S. 1161), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 1. Oktober 2010 (BGBl. I S. 1306) geändert worden ist

Dienemann, C.; Dudel, E.G.; Dienemann, H.; Stolz, L. (2002): Retention of Radionuclides and Arsenic by Algae Downstream of U Mining Tailings *in:* Merkel, B.; Planer-Friedrich, B.; Wolkersdorfer, C. (Hrsg.): Uranium in the Aquatic Environment, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 605-613

Dybek, J. (1962): Zur Geochemie des Urans; Clausthaler Hefte zur Lagerstättenkunde und Geochemie der mineralischen Rohstoffe. Clausthal, TU Clausthal, Heft 1, 163 pp..

Friedmann, L.; Herb, S.; Höbel, W.; Höller, C.; Kaschube, U.; Lessig, G.; Leutner, G.; Lindenthal, W.; Reifenhäuser, C.; Schreff, A. (2007): Untersuchungen zum Vorkommen von Uran im Grund- und Trinkwasser in Bayern; Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit & Bayerisches Landesamt für Umwelt

foodwatch (2009): http://foodwatch.de/kampagnen__themen/mineralwasser/trinkwasser/index_ger.html abgerufen im Oktober & November 2011

Gatzweiler, R. (1996): Lagerstätten- und produktionsbedingte Umweltauswirkungen des Uranerzbergbaus *in:* Siehl, A. (Hrsg.): Umweltradioaktivität, Ernst & Sohn, Berlin, 97-114

geomartin (2008): Karte der Standorte der Wismut in Thüringen und Sachsen, freie GNU-Lizenz, verfügbar unter http://de.wikipedia.org/wiki/Wismut_%28Unternehmen%29

Haferkorn, U. (2002): Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes – Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis, Dissertation, Universität Göttingen, 157 pp.

Huhle, B.; Kummer, S.; Merkel, B. (2008) Mobility of uranium from phosphate fertilizers in sandy soils. In: de Kok, L. J. and Schnug, E. (eds.) (2008) Loads and fate of fertilizer-derived uranium. Backhuys Publishers, Leiden. ISBN/EAN 978-90-5782-193-6, 47-56.

Khater, A.E.M. (2008) Uranium and Heavy metals in Phosphate Fertilizers. *in:* Merkel, B.J.; Hasche-Berger, A. (Hrsg.): Uranium, Mining and Hydrologeology, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 193-199

Kirchheimer, F. (1963): Das Uran und seine Geschichte, Schweizerbart’sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 371 pp.

Konietzka, R.; Hermann, H.D.; Voss, J.U. (2005): Vorschlag für einen gesundheitlichen Leitwert für Uran in Trinkwasser, Umweltmed Forsch Prax 10 (2), 133-143

Koß, V.; Winkler, A.; Bütow, E. (1992): Experimental Investigation and Modelling of the Migration of Radionuclides from the Ellweiler Uranium Mill Tailing; Radiochemica Acta 58/59, 447-451 Oldenbourg Verlag München

Kownacka, L.; Jaworowski, Z.; Suplinska, M. (1990): Vertical Distribution and Flows of Lead and Natural Radionuclides in the Atmosphere, The Science of the Total Environment (91), 199-221

Kratz, S.; Schnug, E. (2006): Rock phosphates and P fertilizers as sources of U contamination in agricultural soils *in:* Merkel, B.; Hasche-Berger, A. (Hrsg.): Uranium in the Environment – Mining Impact and Consequences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 57-67

Kratz, S.; Knappe, F.; Rogasik, J.; Schnug, E. (2008). Uranium balances in agroecosystems. In: de Kok, L. J. and Schnug, E. (eds.) (2008) Loads and fate of fertilizer-derived uranium. Backhuys Publishers, Leiden. ISBN/EAN 978-90-5782-193-6, 179-190.

Kunkel, R.; Wendland, F. (2005): Länderübergreifende Auswertungen der Urankonzentrationen in den Grundwässern Deutschlands. Forschungszentrum Jülich GmbH

LABO (2003): Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz: Hintergrundwerte für organische und anorganische Stoffe in Böden. 3. überarbeitete und ergänzte Auflage *in:* Rosenkranz, D.; Einsele, G.; Harreß, H.-M.; Bachmann, G. [Hrsg.]: Handbuch Bodenschutz, Kennziffer 9006, Erich Schmidt Verlag, Berlin

LAU-ST – Landesamt für Umweltschutz/Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft (2007): Urankonzentrationen im Grundwasser von Sachsen-Anhalt, 26 pp., http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Master-Bibliothek/Landesbetriebe/LHW/neu_PDF/5.1/Dokumente_GLD/Uranbericht_2002-2005.pdf

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) (1998): Uran in Oberböden, Karte

Limson Zamora, M.; Tracy, B.L.; Zielinski, J.M.; Meyerhof, D.P.; Moss, M.A. (1998): Chronic Ingestion of Uranium in Drinking Water: A Study of Kidney Bioeffects in Humans, Toxicological Sciences, Volume 43/1, 68-77

Ludwig, F.; Berthold, G. (2009): Uran in hessischen Grund- und Rohwässern – Sachstand; Geologie, Wasser und Boden GmbH, Boppard-Buchholz; Vortrag Bildungsseminar Rauschholzhausen, 28 Folien, http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/wasser/grundwasser/artikel/Ludwig_Uran.pdf

Meinrath, G. (1998): Aquatic Chemistry of Uranium - A Review Focussing on Aspects of Environmental Chemistry, Freiberg, On-line Geoscience Vol.1, 100 pp.

Merkel, B.J. (2009): Uran im Trink- und Mineralwasser, Vortrag Centrum für Technologie und Umwelt, Osnabrück www.cut-os.de/downloads/Vortrag_Merkel_internet.pdf

Rausch, H.; Sziklai, I.L.; Borossay, J.; Torkos, K.; Rikker, T.; Zemplén-Papp, E. (1995): Distribution of toxic and radiation components in air particulates, The Science of the Total Environment, Vol. 173-174, 283-291

Reimann, C.; Siewers, U.; Tarvainen, T.; Bityokova, L. (2003): Agricultural soils in northern Europe: A Geochemical Atlas, Geologisches Jahrbuch: Sonderhefte, SD 5

Rösler, H.J.; Lange, H. (1976): Geochemische Tabellen, 2. Auflage, Ferdinand-Enke-Verlag, Stuttgart, 674 pp.

Schnug, E.; Haneklaus, S. (2008): Dispersion of uranium in the environment by fertilization. *in:* Merkel, B.J.; Hasche-Berger, A. (Hrsg.): Uranium, Mining and Hydrologeology, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 45 -53

Seim, R.; Tischendorf, G. (1990) Grundlagen der Geochemie, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 632 pp.

Smidt, G.A.; Hassoun, R.; Erdinger, L.; Schäf, M.; Knolle, F.; Utermann, J.; Duijnisveld, W.H.M.; Schnug, E. (2011): Uranium in German tap and groundwater – occurrence and origins *in:* Merkel, B.J.; Schipek, M. (Hrsg.): The New Uranium Mining Boom – Challenge and lessons learned, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 807-820

Strahlenschutzkommission (1991a): Strahlenschutzgrundsätze für die Nutzung von durch den Uranbergbau kontaminierten Flächen zu forst- und landwirtschaftlichen Zwecken sowie als Grünanlage (Parkanlage) und Wohngebiet
http://www.ssk.de/de/werke/1991/volltext/ssk9104.pdf

SSK - Strahlenschutzkommission (1991b): Strahlenschutzgrundsätze bei der Freigabe von durch den Uranbergbau kontaminierten Flächen zur industriellen Nutzung Empfehlung der Strahlenschutzkommission http://www.ssk.de/de/werke/1991/volltext/ssk9103.pdf

SSK - Strahlenschutzkommission (1992): Strahlenschutzgrundsätze für die Verwahrung, Nutzung oder Freigabe von kontaminierten Materialien, Gebäuden, Flächen oder Halden aus dem Uranerzbergbau/Radiological Protection Principles Concerning the Safeguard, Use or Release of Contaminated Materials, Buildings, Areas or Dumps from Uranium Mining, Band 23, 1. Auflage, deutsch/englisch, Bonn

Streit, B. (1992): Lexikon Ökotoxikologie. 1.Auflage. 1. korrigierter Nachdruck. VCH Weimheim, New York, Basel Cambridge, 731pp.

Trinkwasserverordnung (TrinkwV) (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch, Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. November 2011 (BGBl. I S. 2370), die durch Artikel 2 Absatz 19 des Gesetzes vom 22. Dezember 2011 (BGBl. I S. 3044) geändert worden ist

Utermann, J.; Fuchs, M. (2008): Uranium in German soils *in:* De Kok, L. und Schnug, E., (Hrsg.): Load and Fate of fertilizerderived Uranium, Backhuys Publishers, Leiden, 33- 47

Utermann, J.; Fuchs, M.; Düwel, O. (2008): Flächenrepräsentative Hintergrundwerte für Arsen, Antimon, Beryllium, Molybdän, Kobalt, Selen, Thallium, Uran und Vanadium in Böden Deutschlands aus länderübergreifender Sicht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Archiv Nr. 10040/08, 71 pp.

Utermann, J.; Duijnisveld, W.H.M.; Godbersen, L.; Fuchs, M. (2009): Uran in Böden und Sickerwässern – gibt es Indizien für eine phosphordüngerbürtige Uran-Anreicherung? Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Ges., 191 (2), 4 pp. -
http://eprints.dbges.de/191/2/Utermann_DBG_2009.pdf

Wismut (1993): Ergebnisse der Umweltüberwachung und Sanierungstätigkeit 1992. – Sanierungsbetriebe Freistaat Sachsen; Wismut GmbH, Chemnitz

Wismut (1999): Chronik der Wismut, Wismut GmbH, Chemnitz, CD-ROM, 2737 pp., beziehbar über die Homepage der Wismut GmbH (www.wismut.de) oder durch Selbstabholung in der Geschäftsstelle Chemnitz

Wismut (2008): „Sanierungsfortschritt Wismut, Voraussetzung für die Zukunft der Region“, Umweltbericht 2008, Wismut GmbH, Chemnitz, 93 pp.

Ziegler, V.; Dardel, J. (1984): Uranium deposits in Europe, *in:* De Vivo, B.; Ippolito, F.; Capaldia, G.; Simpson, P.R. (Hrsg.): Uranium Geochemistry, Mineralogy, Geology, Exploration and Resources, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 201 pp.