

Themenbericht Uran

Sonderuntersuchungen im Grundwasser

Datenauswertung 2009 bis 2013



Niedersachsen

Themenbericht Uran

**Sonderuntersuchungen im
Grundwasser**

Datenauswertung 2009 bis 2013



Niedersachsen

Herausgeber:
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,
Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Direktion
Am Sportplatz 23
26506 Norden

Der vorliegende Bericht wurde erarbeitet durch:
Anne Keuffel-Türk, NLWKN Betriebsstelle Hannover-Hildesheim
Dr. Lars Germershausen, NLWKN Betriebsstelle Hannover-Hildesheim

Mit Unterstützung durch:
Malte Iltis, NLWKN Betriebsstelle Hannover-Hildesheim
Anouchka Jankowski, NLWKN Betriebsstelle Hannover-Hildesheim
Liane Knölke, NLWKN Betriebsstelle Hannover-Hildesheim

Bildnachweis Titelseite:
NLWKN Betriebsstelle Hannover-Hildesheim

1. Auflage: Oktober 2015, 250 Stück
Schutzgebühr: 5,00 € zzgl. Versandkostenpauschale
Bezug:
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,
Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Veröffentlichungen
Göttinger Chaussee 76 A
30453 Hannover

Online verfügbar unter: www.nlwkn.niedersachsen.de
(→ Service → Veröffentlichungen/Webshop)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis.....	II
Vorwort	III
Zusammenfassung	IV
1 Einleitung.....	1
2 Herkunft und Eigenschaften	1
2.1 Vorkommen in der Erdkruste.....	1
2.2 Anthropogene Uranquellen.....	1
2.3 Chemische Eigenschaften.....	2
2.4 Toxikologische Eigenschaften	2
2.5 Uran in Böden	2
2.6 Uran in Oberflächengewässern.....	4
2.7 Uran im Grundwasser	4
3 Methodik	4
3.1 Sonderuntersuchungsprogramm.....	4
3.2 Messstrategie	4
3.3 Analytik	6
4 Untersuchungsergebnisse und deren Bewertung	7
4.1 Bewertungsgrundlagen	7
4.2 Vergleich der Konzentrationen von U_{gesamt} und $U_{\text{gelöst}}$	8
4.3 Regionale Verteilung der Urankonzentrationen.....	8
4.4 Urankonzentrationen in unterschiedlichen Grundwassertiefen	9
4.5 Vergleich von Urankonzentrationen mit Phosphat- und Nitratgehalten im Grundwasser	10
4.5.1 Phosphat und Uran	10
4.5.2 Nitrat und Uran	11
4.6 Einzelfallbetrachtungen	12
5 Fazit und Ausblick.....	17
6 Literaturverzeichnis	18

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Vereinfachte Konzeptdarstellung des modular aufgebauten Grundwasserberichtes.	III
Abb. 2:	Urankonzentrationen in Böden in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein.	2
Abb. 3:	Uran-Gesamtgehalte in Oberböden Niedersachsens.	3
Abb. 4:	Untersuchte Messstellen im Zeitraum von 2009 bis 2013.	5
Abb. 5:	ICP-MS im Labor der Betriebsstelle Hannover-Hildesheim.	6
Abb. 6:	Korrelation von U_{gesamt} und $U_{\text{gelöst}}$ bei 539 Proben.	7
Abb. 7:	Vergleich der Konzentrationen von $U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt} bei 829 Proben.	8
Abb. 8:	Urankonzentrationen im Grundwasser im Zusammenhang mit der Geologie Niedersachsens.	9
Abb. 9:	Vergleich der Urankonzentrationen von 502 flachverfilterten und 632 tiefverfilterten Messstellen.	10
Abb. 10:	Korrelation zwischen $U_{\text{gelöst}}$ und ortho-Phosphat sowie U_{gesamt} und ortho-Phosphat in Grundwasserproben Niedersachsens.	11
Abb. 11:	Korrelation zwischen $U_{\text{gelöst}}$ und Nitrat sowie U_{gesamt} und Nitrat in Grundwasserproben Niedersachsens.	11
Abb. 12:	Messstellen mit Urankonzentrationen $\geq 10 \mu\text{g/l}$	12
Abb. 13:	Urankonzentrationen der Messstellen Matrum und Tenstedt II.	13
Abb. 14:	Urankonzentrationen der Messstelle Schladen.	13
Abb. 15:	Urankonzentrationen der Messstellen Rhode und Halchter-Ohrum.	14
Abb. 16:	Urankonzentrationen der Messstellen Renshausen-Kühler Grund und Renshausen-Bannerholz.	14
Abb. 17:	Urankonzentrationen der Messstelle Hofschwicheldt.	14
Abb. 18:	Urankonzentrationen der Messstelle Vorwohle.	15
Abb. 19:	Urankonzentrationen der Messstelle Wabachtal.	15
Abb. 20:	Urankonzentrationen der Messstelle Diekholzen.	15

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
BG	Bestimmungsgrenze
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
GLD	Gewässerkundlicher Landesdienst
GÜN	Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
ISO	International Organization for Standardization
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LGLN	Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
U	Uran
UBA	Umweltbundesamt

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Anzahl der auf Uran untersuchten Messstellen im Untersuchungszeitraum.	6
---------	---	---

Vorwort

Grundwasser füllt als frei bewegliches Wasser zusammenhängend die Hohlräume im Untergrund. Es kann in Quellen zutage treten oder unmittelbar in oberirdische Gewässer einspeisen. Grundwasserneubildung findet durch Versickern von Niederschlagswasser oder durch Infiltration von Wasser aus oberirdischen Gewässern statt. Das Grundwasser ist somit ein Teil des Wasserkreislaufes und ein bedeutender Süßwasserspeicher. Eine Vielzahl natürlicher und anthropogener Faktoren beeinflusst seine Beschaffenheit.

Der Zustand des Grundwassers wird in Niedersachsen durch den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) intensiv beobachtet.

Um flächendeckende Aussagen zur Beschaffenheit des Grundwassers treffen zu können, werden Messprogramme im Rahmen des Grundwasserüberwachungssystems Niedersachsen (GÜN) betrieben. Diese dienen der Überwachung der Grundwassergüte und der Grundwassermenge. Das Ziel dieser Messprogramme ist die Beobachtung kurz- und langfristiger Veränderungen, um u. a. die Auswirkungen von Grundwasserschutzmaßnahmen zu beurteilen (NLWKN 2014).

Im Rahmen der Beobachtung der Grundwassergüte gibt es zahlreiche Messprogramme, die nach regionalen oder landesweiten Fragestellungen sowie den Berichtspflichten gegenüber nationalen und internationalen Institutionen festgelegt werden. Die Anzahl der relevanten Messstellen variiert je nach Messprogramm (NLWKN 2014).

Darüber hinaus werden aktuelle umweltpolitische Fragestellungen im Rahmen von Sonderuntersuchungen behandelt. Diese Messprogramme finden im unregelmäßigen Turnus statt und sind zeitlich befristet. Der vorliegende Themenbericht Uran wurde auf Grundlage eines Sonderuntersuchungsprogrammes in Bezug auf den Parameter Uran erstellt.

Er ist Teil des modular aufgebauten Grundwasserberichtes Niedersachsen (Abbildung 1). Kern des Grundwasserberichtes ist der Standardbericht mit den Modulen zur Grundwassergüte und zur Grundwassermenge. Parallel hierzu werden Regionalberichte auf kleinräumiger Betrachtungsebene und Themenberichte zu Schwerpunktthemen mit landesweitem Bezug veröffentlicht.



Abb. 1: Vereinfachte Konzeptdarstellung des modular aufgebauten Grundwasserberichtes (NLWKN 2012)

Zusammenfassung

In den Jahren von 2009 bis 2013 wurde vom NLWKN im Rahmen von Sonderuntersuchungen im Grundwasser der Parameter Uran betrachtet. Da Urangelhalte bisher nicht systematisch erhoben wurden, liegt hiermit ein Überblick über die im Grundwasser vorkommenden Konzentrationen und deren regionale Verteilung in Niedersachsen vor.

Insgesamt wurden 1170 Grundwassermessstellen auf Uran untersucht. Die gemessenen Konzentrationen liegen zwischen Werten unter der Bestimmungsgrenze und Werten bis zu 83 Mikrogramm Uran pro Liter ($\mu\text{g U/l}$). Lediglich in zwölf Messstellen sind in mindestens einer Probe Gehalte von $10 \mu\text{g U/l}$ und mehr festgestellt worden. Das bedeutet: In einem Prozent der Messstellen wird der gesundheitliche Grenzwert der Trinkwasserverordnung von $10 \mu\text{g U/l}$ erreicht bzw. überschritten. Die Trinkwasserverordnung wurde herangezogen, da zur Zeit keine Bewertungsgrundlage für Uran im Grundwasser vorliegt.

Betrachtet man die Urankonzentrationen in der Fläche, sind regionale Unterschiede zu erkennen. Im Norden Niedersachsens im Bereich des Lockergesteins des Niedersächsischen Tieflandes treten vorwiegend Urangelhalte unter der Bestimmungsgrenze und bis zu $2 \mu\text{g/l}$ auf. Im Süden sind weniger Messstellen mit Uranwerten unter der Bestimmungsgrenze zu finden. Im Festgestein und im Übergangsbereich zum Festgestein weisen die meisten

Messstellen Urankonzentrationen zwischen der Bestimmungsgrenze und $2 \mu\text{g/l}$ auf.

Die Konzentrationsverteilung von Uran im Grundwasser deutet auf einen Zusammenhang mit den geogenen Eigenschaften des Untergrundes hin. So sind aufgrund der geologischen Gliederung im Südniedersächsischen Berg- und Bergvorland höhere Hintergrundwerte zu erwarten als im Niedersächsischen Tiefland. Auch die Urangelhalte von Böden und Oberflächengewässern sind stark von den geologischen Verhältnissen abhängig. Von den zwölf Messstellen, die Urankonzentrationen von $10 \mu\text{g/l}$ und mehr aufweisen, befinden sich zehn im Berg- und Bergvorland.

Die beiden Messstellen mit den höchsten Urangelhalten liegen allerdings im Westen Niedersachsens im Lockergestein. Aussagen über die Herkunft des Urans können zum jetzigen Zeitpunkt nicht getroffen werden. Die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen Uran im Grundwasser und der landwirtschaftlichen Nutzung bzw. dem Ausbringen mineralischer Dünger besteht, ist anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht zu belegen. Bei den vorliegenden Daten konnte keine Korrelation zwischen Urankonzentration und Nitrat- oder Phosphatgehalten im Grundwasser festgestellt werden. Zukünftig werden die Messstellen, deren Urangelhalte bei $10 \mu\text{g/l}$ oder darüber liegen, weiter beobachtet.



Grundwassermessstelle

1 Einleitung

Im Rahmen des Grundwasserüberwachungssystems Niedersachsen (GÜN) werden Messdaten erhoben, aufbereitet und gesammelt, die als Grundlage aller wasserwirtschaftlichen Planungen, Entscheidungen und sonstiger Maßnahmen herangezogen werden. So können beispielsweise mit Hilfe dieser hydrologischen Daten Grundwasserschutzaufgaben geplant und zielgerichtet erfüllt werden. Sowohl die Grundwassergüte als auch die Grundwassermenge wird in Niedersachsen im Rahmen von verschiedenen Messprogrammen umfassend überwacht (NLWKN 2014).

Der Parameter Uran (U) im Grundwasser wurde in der Vergangenheit nicht im Grundprogramm vom NLWKN erfasst. Die Untersuchungen begannen im Jahr 2009 aufgrund einer Zusammenarbeit mit der Jacobs University Bremen. Die Universität startete ein Forschungsprojekt, bei dem der Zusammenhang zwischen Urangelhalten im Grundwasser und Phosphatdüngung untersucht werden sollte. Die Betriebsstelle Hannover-Hildesheim des NLWKN stellte die im Rahmen des GÜN erhobenen Uranwerte zur Verfügung.

In den folgenden Jahren wurden die Sonderuntersuchungen auf Uran im Grundwasser seitens des NLWKN schrittweise erweitert, bis im Jahr 2013 schließlich Uranwerte für ganz Niedersachsen vorlagen.

2 Herkunft und Eigenschaften

2.1 Vorkommen in der Erdkruste

Uran ist ein natürlich vorkommendes Schwermetall, das in der Erdkruste Durchschnittsgehalte von 2,5 bis 4 mg U/kg Gestein erreicht (UBA 2012). Es kann in Gesteinen, im Boden, im Wasser und in der Luft erfasst werden. Die Urangelhalte variieren je nach Gesteinsart. Die höchsten Urankonzentrationen weisen in der Regel saure Magmatite (z. B. Granit oder Rhyolith) mit bis zu 10 mg/kg auf. Ton- und Karbonatgesteine können im Mittel Konzentrationen von 2,2 mg U/kg bzw. 3,7 mg U/kg enthalten (MERKEL 2009, LBEG 2011). Die geogenen Urankonzentrationen in den Tonsteinschichten der geologischen Formationen Buntsandstein und Keuper (beide Teil der erdgeschichtlichen Periode der Trias), gefolgt von den kristallinen Gesteinen, fallen daher in der Regel höher aus als in sandigen Lockergesteinen des Quartär (LINDEMANN 2005, BIRKE et al. 2009). Aufgrund der geologischen Gliederung sind im Südniedersächsischen Berg- und Bergvorland demnach höhere Hintergrundwerte zu erwarten als im Niedersächsischen Tiefland (LBEG 2011).

Die natürlichen Urangelhalte in Böden, Grund- und Oberflächengewässern sind demzufolge besonders von

Im vorliegenden Bericht wird auf dieser Datengrundlage eine Beschreibung und erste Bewertung des Grundwassers hinsichtlich des Parameters Uran vorgenommen. Im Untersuchungszeitraum wurden 1170 Messstellen beprobt, um einen Überblick über die im Grundwasser vorkommenden Urankonzentrationen und deren regionale Verteilung zu erlangen. Der Frage nach möglichen Ursachen wurde nachgegangen. Hier können neben geogenen auch anthropogene Faktoren von Bedeutung sein. Die Beeinflussung durch landwirtschaftliche Nutzung und damit verbundener Düngerausbringung kann sich auf den Urangelhalt des Grundwassers auswirken. In diesem Zusammenhang wurde die Beziehung zwischen Phosphat- bzw. Nitratgehalten und der Urankonzentration geprüft. Ebenfalls betrachtet wurde das Grundwasser aus unterschiedlichen Tiefen.

Zur Bewertung der vorliegenden Urankonzentrationen wurden Grenzwerte aus der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) herangezogen, die vom Umweltbundesamt (UBA) und vom Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) erarbeitet wurden. Diese Grenzwerte berücksichtigen die chemisch-toxische Wirkung von Uran auf den Menschen. Im Folgenden wird ausschließlich die chemische Toxizität, nicht aber die Radioaktivität von Uran betrachtet.

den geologischen Verhältnissen abhängig (UBA 2012, NLWKN 2013).

2.2 Anthropogene Uranquellen

Die Urankonzentrationen in der Umwelt können durch verschiedene anthropogene Einflüsse erhöht werden. Zu nennen sind insbesondere der Uranbergbau, die Nutzung von Kernenergie und die Verbrennung von Braun- und Steinkohle. Über mitgefördertes Produktionswasser kann Uran ebenfalls bei der unkonventionellen Erdgasförderung (Fracking) in die Umwelt gelangen, sofern es im Speichergestein enthalten ist (FAIR 2014, SSK 2014). Uran findet u. a. auch Verwendung als Korrosionsschutz, als Strahlenschutzmaterial und in Munition (UTERMANN et al. 2009, LBEG 2011, UBA 2012, NLWKN 2013).

Flächenhafte Einträge von Uran in Böden und Gewässer werden außerdem mit dem Einsatz von Phosphatdüngemitteln in der Landwirtschaft in Verbindung gebracht (u. a. ROGASIK et al. 2008, RÖMER et al. 2010, SMIDT 2011). Laut STATISTISCHEM BUNDESAMT (2012) werden etwa 60 % der Fläche Niedersachsens landwirtschaftlich genutzt.

2.3 Chemische Eigenschaften

Uran ist ein radioaktives Schwermetall (Dichte: ca. 19 g/cm³), das unter Freisetzung von α -Strahlung und in geringem Umfang auch γ -Strahlung zerfällt (BfR 2007).

Es tritt häufig in vierwertiger (U [IV]) und sechswertiger (U [VI]) Form auf und kommt ausschließlich in Verbindungen vor (BfR 2007). U [IV] überwiegt unter anaeroben Bedingungen und bildet oft unlösliche Verbindungen mit natürlichen organischen Stoffen (z.B. Huminstoffe) (SHEPPARD et al. 2005). Unter aeroben Bedingungen ist U [VI] dominierend, das in Wasser sehr gut löslich ist. Es taucht in Verbindung mit Sauerstoff als Uranyl-Ion (UO₂²⁺) auf (LAMAS 2005) und schließt sich mit Karbonaten, Phosphaten oder Sulfaten zu Komplexen zusammen (BfR 2007).

2.4 Toxikologische Eigenschaften

Bei Uran muss zwischen der radiologischen Wirkung und der chemisch-toxischen Wirkung unterschieden werden (LBEG 2011). Für Grund- und Trinkwasser gilt, dass bei einer Urankonzentration von unter 60 µg/l keine radiologische Wirkung zu erwarten ist und daher die chemische Toxizität im Vordergrund steht (UBA 2013), die im Weiteren Gegenstand der Betrachtung ist.

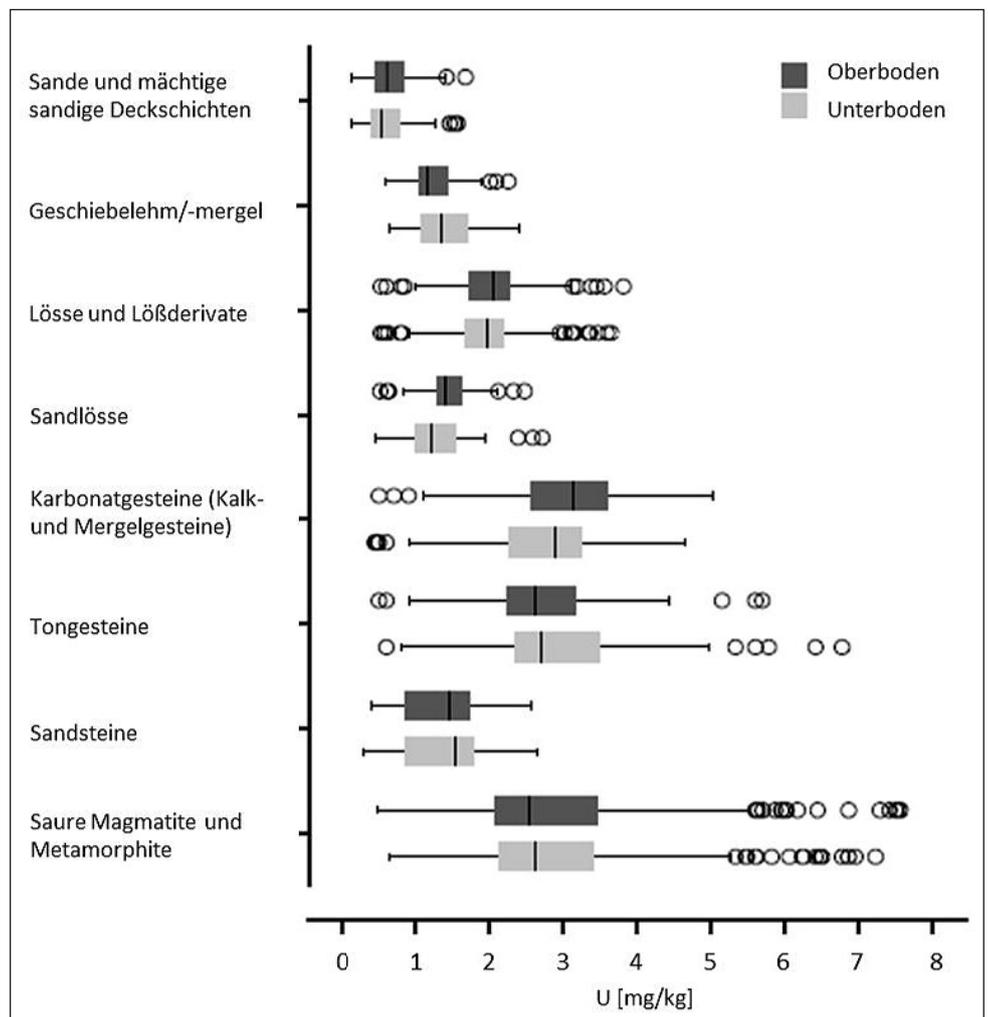
Der Mensch nimmt Uran über die Nahrungskette auf. Da Uran in der Regel nur in geringen Mengen von Kulturpflanzen aus dem Boden aufgenommen wird, ist dieser Teil in der Nahrungskette zu vernachlässigen. Ein weiterer Pfad der Aufnahme von Uran durch den Menschen ist über das Trinkwasser gegeben. Zum Schutz der menschlichen Gesundheit ist daher in der 2013 novellierten Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2013) ein gesundheitlicher Grenzwert festgelegt (siehe Kapitel 4.1).

Erfolgt eine Aufnahme von Uran über die Nahrungskette, so findet eine Einlagerung des Urans vor allem in Niere und Leber sowie im Skelett statt, was bei höheren Konzentrationen zu starken gesundheitlichen Schäden führen kann (UBA 2012, LGL/LFU 2007).

2.5 Uran in Böden

UTERMANN et al. haben im Jahr 2009 aus einer länderübergreifenden Auswertung Medianwerte von Urangelhalten in Böden auf sauren Magmatiten, Metamorphiten, Ton- und Karbonatgesteinen von 2,5 bis 3 mg/kg bekannt gegeben. Für Böden aus Sandlössen und Geschiebelehm wurden Urangelhalte (Medianwerte) von 1 bis 1,5 mg/kg und für Sandböden von etwa 0,5 mg/kg veröffentlicht (siehe Abbildung 2).

Abb. 2:
Urankonzentrationen in Böden in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein, dargestellt als Boxplots mit Median und Ausreißern (verändert nach UTERMANN et al. 2009). Die natürlichen Urangelhalte von Böden auf magmatischen Gesteinen sowie auf Ton- und Karbonatgesteinen sind deutlich höher als in Sandböden.



Für sandige Oberböden in Niedersachsen weist das LBEG (2011) auf pleistozän geprägten Lockergesteinen geogene Urangelhalte von max. 2,07 mg/kg und für Löss- und Festgesteinslandschaften Gehalte von max.

4,47 mg/kg aus. Abbildung 3 zeigt die Urankonzentrationen in Oberböden Niedersachsens bis zu einer Tiefe von 0,3 m.

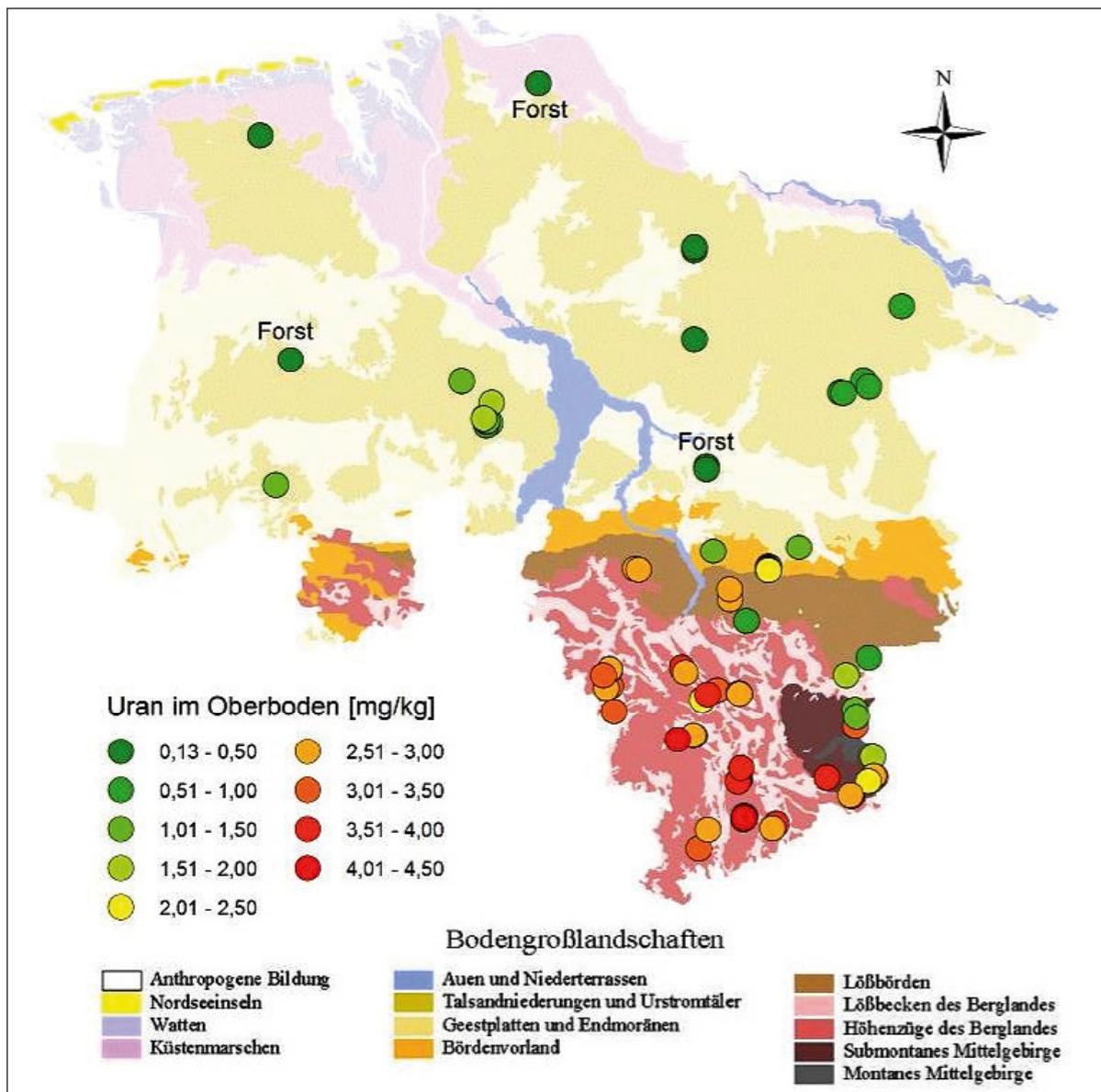


Abb. 3: Uran-Gesamtgehalte in Oberböden Niedersachsens (LBEG 2011). Die höchsten Urankonzentrationen weisen die Böden in Südniedersachsen auf.

2.6 Uran in Oberflächengewässern

Nach BIRKE et al. (2008) liegt der Medianwert der Urankonzentration in deutschen Oberflächengewässern bei $0,33 \mu\text{g/l}$. Der Wert für die niedersächsischen Oberflächengewässer ist mit $0,47 \mu\text{g/l}$ etwas höher (NLWKN 2013).

Die Urangelhalte in den Oberflächengewässern sind in erster Linie von den geologischen Verhältnissen und den Böden in den Einzugsgebieten der Gewässer abhängig (NLWKN 2013). Wie in BIRKE et al. 2008 dargestellt, wurden dennoch erhöhte Urangelhalte in den Oberflächengewässern Südniedersachsens festgestellt, die im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Nutzung von phosphathaltigen Düngemitteln stehen. Auch in kleinen Gebieten östlich von Hannover, im Bereich der Lössbörde, liegt die Vermutung nahe, dass eine Verbindung zwischen den gemessenen Urangelhalten und der jahrzehntelangen intensiven landwirtschaftlichen Aktivität besteht (BIRKE et al. 2009).

2.7 Uran im Grundwasser

In Deutschland können die Urankonzentrationen im anthropogen unbeeinflussten Grundwasser laut MERKEL (2002) zwischen $< 1 \mu\text{g/l}$ und $> 100 \mu\text{g/l}$ liegen.

Aufgrund der Eigenschaften der anstehenden Gesteine in Südniedersachsen sind dort die Urankonzentrationen im Grundwasser höher als im Lockergestein im Norden

Niedersachsens. Besonders in den Verbreitungsgebieten des Buntsandstein, z. B. in großen Teilen des Solling oder nördlich und südlich des Göttinger Waldes, können geogene Urankonzentrationen im Grundwasser von über $5 \mu\text{g/l}$, aufgrund des hohen Tonanteils in einigen Schichten des Buntsandstein, keine Seltenheit sein (FRIEDMANN & LINDENTHAL 2009, LBEG 2011).

Auch im Bereich von Mooren oder anmoorigen Gebieten ist u. U. eine erhöhte Urankonzentration im Grundwasser zu beobachten. An Huminstoffe gebundenes Uran kann, besonders bei der Mineralisierung der organischen Substanz, erneut mobilisiert werden (LGL/LFU 2007, MERKEL 2009).

Des Weiteren kann die Landnutzung für den Urangelhalt im Grundwasser von Bedeutung sein. Zum Beispiel haben verschiedene Untersuchungen ergeben, dass Ackerböden, die einer regelmäßigen Behandlung mit Phosphatdüngern unterliegen, höhere Urankonzentrationen in den Oberböden aufweisen als unbehandelte Standorte (u. a. TAKEDA et al. 2006, ZIELINSKI et al. 2006, TAYLOR 2007, ROGASIK et al. 2008, UTERMANN et al. 2009). Laut UBA (2012) weisen Ackerböden im Durchschnitt $0,15 \text{ mg/kg}$ höhere Urangelhalte als Forstböden auf. Damit besteht auch die potentielle Gefahr, dass die Urankonzentrationen durch Verlagerung mit dem Sickerwasser in das oberflächennahe Grundwasser unter landwirtschaftlich genutzten Standorten höher ausfallen als unter Forststandorten (LINDEMANN 2005, UTERMANN & FUCHS 2008).

3 Methodik

3.1 Sonderuntersuchungsprogramm

Die Routine des GÜN sieht die Ermittlung von Urangelhalten im niedersächsischen Grundwasser nicht vor (NLWKN 2014). Im Jahr 2009 erfolgten die ersten Untersuchungen im Zusammenhang mit einem Forschungsprojekt der Jacobs University Bremen, das die Beziehung von Urankonzentrationen im Grundwasser und Phosphatdüngung zum Thema hatte. 2009 und 2010 wurden Grundwasserproben schwerpunktmäßig aus dem Bereich der Betriebsstelle Hannover-Hildesheim untersucht. Danach erfolgte eine Ausweitung auf ganz Niedersachsen

im Rahmen der Sonderuntersuchung, in die der Parameter Uran aufgenommen wurde.

3.2 Messstrategie

Ausgehend von ersten Uranuntersuchungen an GÜN-Messstellen im Bereich der Betriebsstelle Hannover-Hildesheim im Jahr 2009 wurden bis zum Jahr 2013 in ganz Niedersachsen 1170 Messstellen auf Uran untersucht (Abbildung 4).

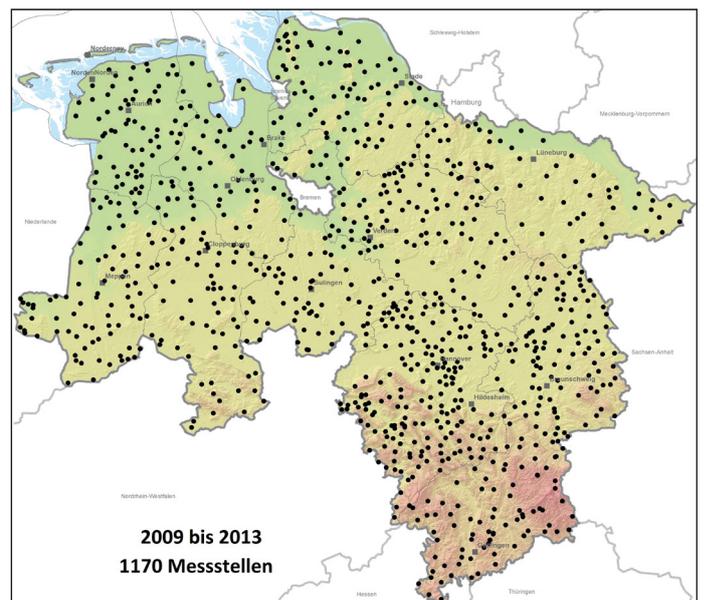
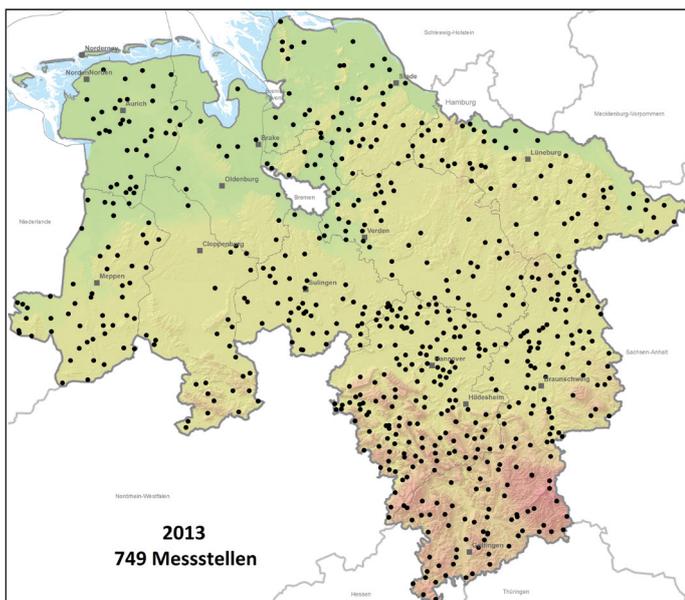
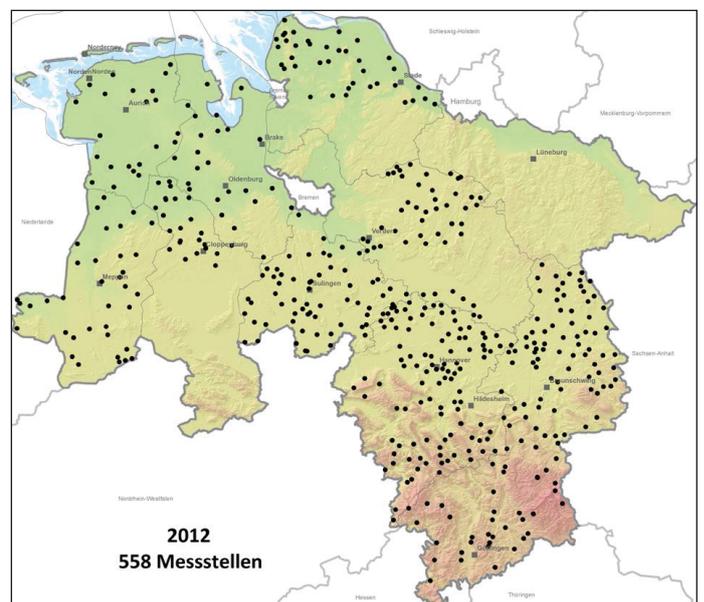
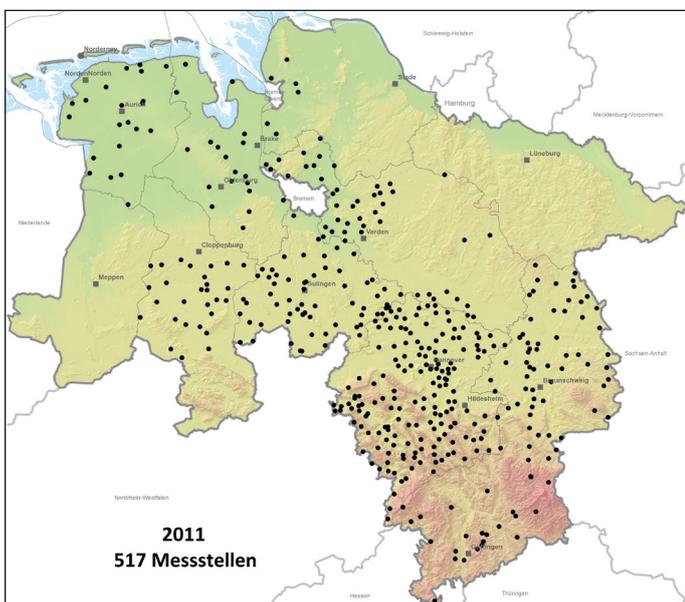
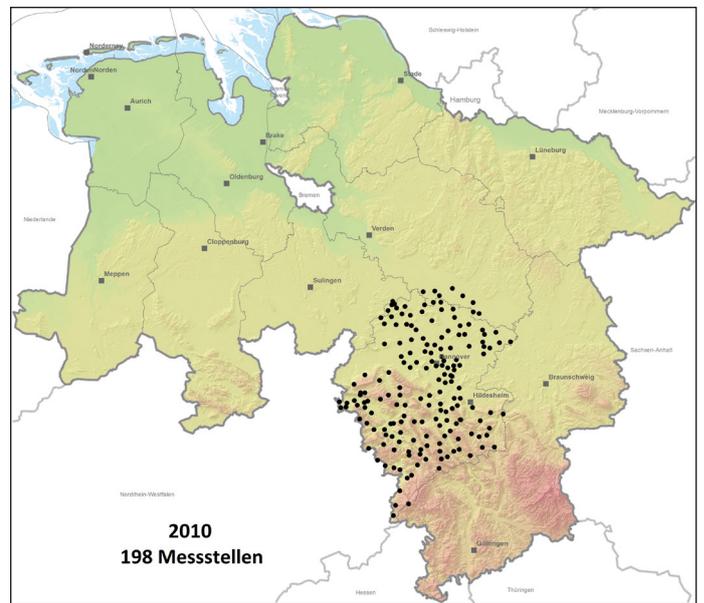
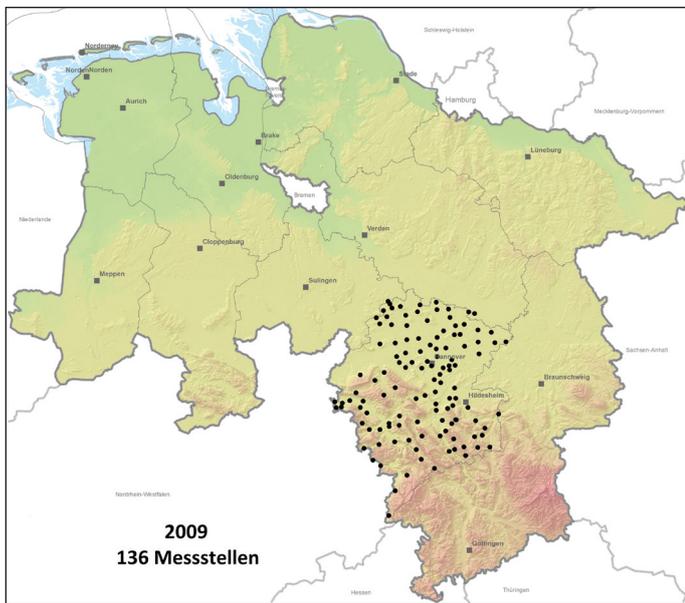


Abb. 4: Untersuchte Messstellen im Zeitraum von 2009 bis 2013. Die Darstellung zeigt die sukzessive Ausweitung der Beprobung in Niedersachsen.

Die Uranuntersuchungen wurden im Bereich der Betriebsstelle Hannover-Hildesheim begonnen. In dieser Region wurden aufgrund der geologischen Verhältnisse, die im Süden bereits vom Festgestein geprägt sind, gegenüber dem Lockergestein des Niedersächsischen Tieflandes eher messbare Befunde erwartet. Um eine landesweite Auswertung zum Parameter Uran durchführen zu können, wurde in den folgenden Jahren das Untersuchungsgebiet im Rahmen der Probenplanung sukzessive ausgeweitet. Im Jahr 2011 kamen Grundwassermessstellen der Betriebsstellen Aurich, Brake-Oldenburg, Cloppenburg, Sulingen, Verden, Süd (Braunschweig-Göttingen) und einige der Betriebsstelle Stade hinzu. 2012 folgten weitere Messstellen der Betriebsstellen Stade und Verden sowie der Betriebsstellen Meppen und Cloppenburg. Seitdem im Jahr 2013 die Beprobung des Grundwassers im Bereich der Betriebsstelle Lüneburg erfolgte, liegen Urankonzentrationen für das Grundwasser in ganz Niedersachsen vor.

In den vorliegenden Proben wurde sowohl das im Grundwasser gelöste Uran ($U_{\text{gelöst}}$), als auch Gesamturan (U_{gesamt}) bestimmt. Bei der Bestimmung von $U_{\text{gelöst}}$ wird die Probe filtriert, und anschließend analysiert, bei U_{gesamt} hingegen werden die Schwebstoffe im Grundwasser mit in die Analytik einbezogen. Es wurde an einer Messstelle

entweder der Parameter U_{gesamt} oder $U_{\text{gelöst}}$ untersucht oder aber auch beide Parameter.

Eine detaillierte Aufstellung der Messstellenanzahlen, die im Zeitraum 2009 bis 2013 auf Uran untersucht wurden, ist in Tabelle 1 zu finden. Ebenfalls zu entnehmen ist die Anzahl der Messstellen, bei denen die Bestimmung von $U_{\text{gelöst}}$, U_{gesamt} oder beiden Parametern durchgeführt wurde. Im Beobachtungszeitraum sind insgesamt 1170 Messstellen beprobt worden. Die Analyse von $U_{\text{gelöst}}$ erfolgte an 1032 Messstellen, die von U_{gesamt} an 570 Messstellen, d.h. dass an insgesamt 432 Messstellen beide Parameter zeitgleich bestimmt wurden.

Legt man den Fokus nicht auf die Anzahl der beprobten Messstellen, sondern auf die Anzahl der Grundwasserproben, so ergibt sich eine Gesamtsumme von 2634 Proben. Davon wurden in 2450 Proben $U_{\text{gelöst}}$, in 1013 Proben U_{gesamt} und somit in 829 Proben beide Parameter gemeinsam untersucht. Da der Parameter Uran von den Betriebsstellen in bereits bestehende Untersuchungsprogramme eingebunden wurde, kann die Anzahl vorliegender Uranuntersuchungen je nach Beprobungsturnus der Betriebsstelle und betriebsstelleninternen Anforderungen messstellenweise variieren.

Zeitraum	Anzahl der Messstellen			
	insgesamt	$U_{\text{gelöst}}$	U_{gesamt}	$\sum U_{\text{gelöst}} + U_{\text{gesamt}}$
2009	136	135	108	107
2010	198	196	80	78
2011	517	387	516	368
2012	558	506	54	2
2013	749	749		
2009 bis 2013	1170	1032	570	432

Tab. 1: Anzahl der auf Uran untersuchten Messstellen im Untersuchungszeitraum. In Niedersachsen wurden von 2009 bis 2013 insgesamt 1170 Messstellen beprobt.

Eine Entwicklung der Urankonzentrationen über die Zeit ist aufgrund der Datenlage flächendeckend für ganz Niedersachsen nicht darzustellen. Zudem weist ein großer Teil der Messstellen Urankonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze auf (diese beträgt bei ca. 90% aller Proben $0,05 \mu\text{g U/l}$ und bei ca. 10% $0,01 \mu\text{g U/l}$). Nur bei 52 Messstellen liegen mindestens fünf Urankonzentrationen über der Bestimmungsgrenze im Zeitraum 2009 bis 2013 (mindestens ein Wert pro Jahr) vor. Die Auswertung dieser Untersuchungsergebnisse lässt keine Schlüsse auf zu- oder abnehmende Urankonzentrationen im Zeitverlauf zu, d.h. Trends sind nicht erkennbar.

3.3 Analytik

Für die Uran-Analytik wurde die induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) nach dem Verfahren DIN EN ISO 17294-2 angewendet (Abbildung 5).

Um $U_{\text{gelöst}}$ zu bestimmen wurde die Grundwasserprobe vor der Analytik filtriert, bei U_{gesamt} lediglich umgeschüt-

telt. So erfasst die U_{gesamt} -Analyse auch das an das Sediment gebundene Uran.



Abb. 5: ICP-MS im Labor der Betriebsstelle Hannover-Hildesheim.

4 Untersuchungsergebnisse und deren Bewertung

4.1 Bewertungsgrundlagen

Bisher liegen keine Bewertungsgrundlagen für Urankonzentrationen im Grundwasser vor. Da es aber Beurteilungskriterien für Uran in anderen Wässern gibt, werden diese für die weitere Betrachtung herangezogen. Es handelt sich um den *Gesundheitlichen Grenzwert der Trinkwasserverordnung* sowie den *Grenzwert für abgepackte Wässer mit der Kennzeichnung „geeignet für die Zubereitung von Säuglingsnahrung“*.

- Gesundheitlicher Grenzwert der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2013): **10 µg Uran pro Liter Trinkwasser.**

„Das Umweltbundesamt (UBA) empfahl den Vollzugsbehörden seit 2004, für Uran (U) im Trinkwasser einen gesundheitlichen Leitwert von [...] 10 µg U/l [...] einzuhalten. Er schützt nicht nur nach Auffassung des UBA, sondern auch des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR [...]) alle Bevölkerungsgruppen, Säuglinge und erste Lebensjahre eingeschlossen, lebenslang vor der chemisch-toxischen Wirkung von Uran auf das empfindlichste Zielorgan, die Niere.

Überschreitungen des [...] Grenzwertes [...] für Uran kommen in Deutschland nur selten vor – maximal in 0,6 % aller Haushalte, und dabei vor allem in solchen Haushalten, die ihr Trinkwasser nicht von einem zentralen Wasserversorger, sondern aus einem eigenen Brunnen beziehen“ (UBA 2013).

- Grenzwert für abgepackte Wässer mit der Kennzeichnung „geeignet für die Zubereitung von Säuglingsnahrung“: **2 µg Uran pro Liter Wasser.**

„Der Anfang 2006 vom [...] BfR 2006 empfohlene „Säuglingswert“ von 2 µg U/l ist seit 01.12.2006 als Grenzwert für abgepackte Wässer mit der besonderen Kennzeichnung „geeignet für die Zubereitung von Säuglingsnahrung“ rechtsverbindlich. [...]

Die „Säuglingswerte“ des BfR stehen nicht allein für gesundheitliche Sicherheit, sondern darüber hinaus generell auch für ganz besonders niedrige Gehalte an Spurenstoffen und Mineralien. [...] Trinkwasser, in dem alle Grenzwerte der Trinkwasserverordnung eingehalten sind, eignet sich auch immer zur Zubereitung von Säuglingsnahrung“ (UBA 2013).

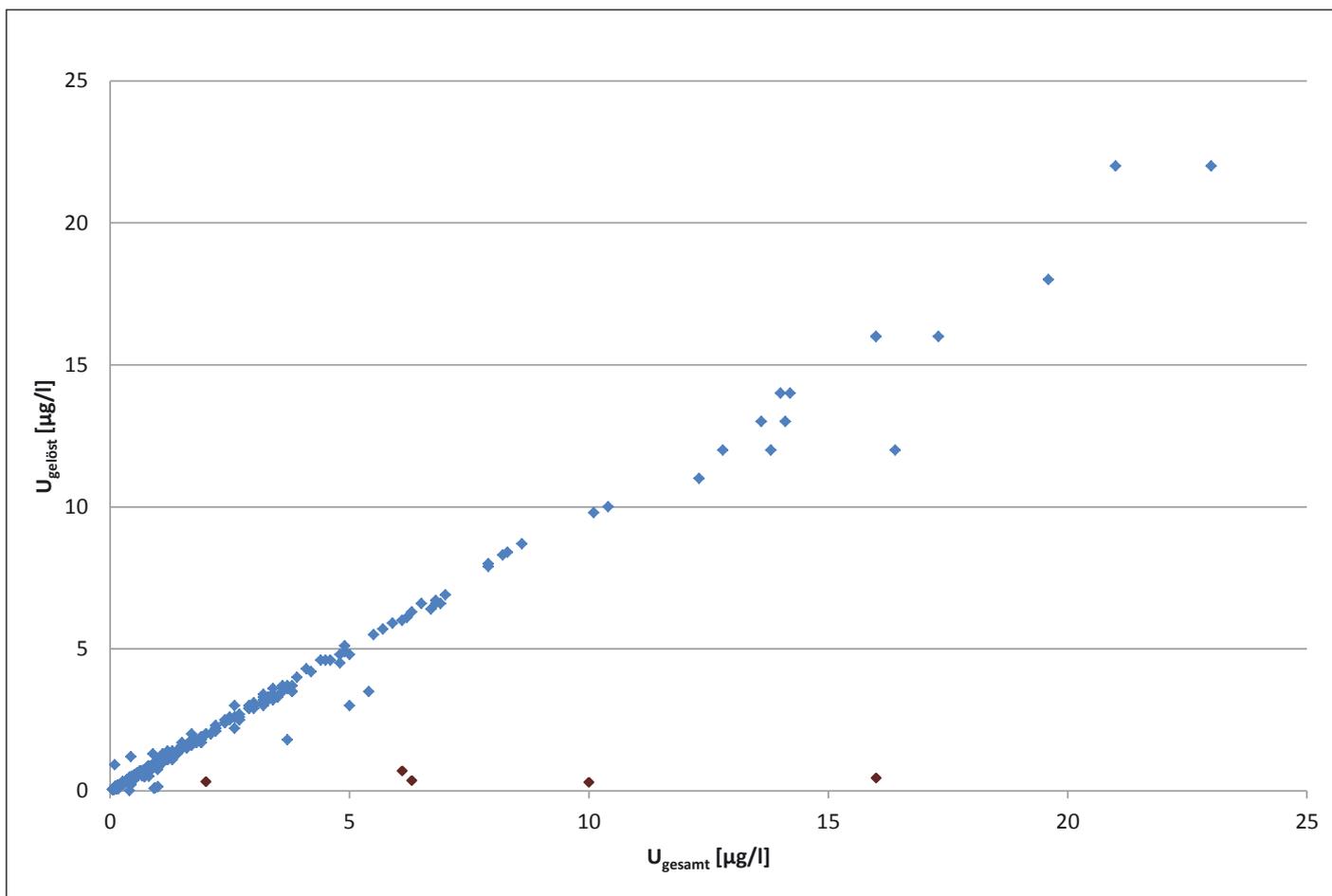


Abb. 6: Korrelation von U_{gesamt} und $U_{\text{gelöst}}$ bei 539 Proben. Die Wertepaare U_{gesamt} und $U_{\text{gelöst}}$ weisen eine hohe Übereinstimmung auf. Eine Ausnahme bilden die Untersuchungsergebnisse der Messstelle Diekholzen (braun gekennzeichnet).

4.2 Vergleich der Konzentrationen von U_{gesamt} und $U_{\text{gelöst}}$

Die Bestimmung der Urankonzentration im Grundwasser erfolgte messstellenbezogen abhängig von der Vorbehandlung entweder als U_{gesamt} oder als $U_{\text{gelöst}}$. Teilweise wurden auch beide Parameter analysiert.

Um der Frage nachzugehen, wie sich die Parameter U_{gesamt} und $U_{\text{gelöst}}$ zueinander verhalten, wurden die Proben, bei denen zeitgleich die Bestimmung beider Parameter erfolgte, verglichen.

Zunächst wurde die Korrelation der Gehalte von $U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt} berechnet. Es standen 539 Proben zur Verfügung; Messwerte unter der Bestimmungsgrenze (BG) blieben unberücksichtigt. Abbildung 6 lässt bis auf wenige Ausnahmen eine hohe Korrelation von U_{gesamt} - und $U_{\text{gelöst}}$ -Werten erkennen. Auffällig sind fünf Wertepaare, die sich grundsätzlich von den anderen unterscheiden (in Abbildung 6 braun gekennzeichnet). Es handelt sich dabei um Grundwasserproben der Messstelle Diekholzen im Landkreis Hildesheim, auf die im Kapitel 4.6 im Rahmen der Einzelfallbetrachtungen noch weiter eingegangen wird.

Um festzustellen, ob es Unterschiede zwischen den Konzentrationen von $U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt} gibt und wie groß diese sind, wurden neben den oben betrachteten 539 Proben weitere 290 Proben mit Werten unter der Bestimmungsgrenze herangezogen. Es standen somit 829 Proben zur Verfügung, bei denen sowohl $U_{\text{gelöst}}$ als auch U_{gesamt} bestimmt wurde. Diese Analysenbefunde wurden Konzentrationsklassen zugeordnet, die in Anlehnung an den Grenzwert der TrinkwV ($U < 10 \mu\text{g/l}$) und den Grenzwert für abgepackte Wässer mit der Kennzeichnung „geeignet für die Zubereitung von Säuglingsnahrung“ ($U < 2 \mu\text{g/l}$) gebildet wurden. Abbildung 7 stellt dar, dass es zwischen den Konzentrationen von $U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt} in den Proben nur äußerst geringe Unterschiede gibt.

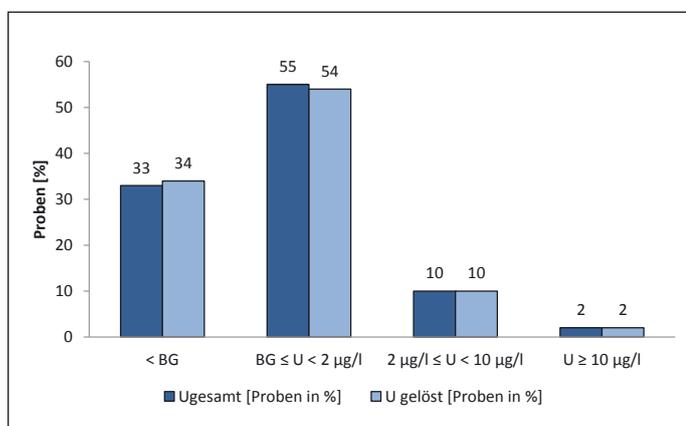


Abb. 7: Vergleich der Konzentrationen von $U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt} bei 829 Proben. Die Gehalte sind gleich oder weisen nur minimale Unterschiede auf.

Gleichauf liegen die Anteile von $U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt} in den Konzentrationsklassen „ $2 \mu\text{g/l} \leq \text{Uran} < 10 \mu\text{g/l}$ “ sowie „ $\text{Uran} \geq 10 \mu\text{g/l}$ “ mit 10 % bzw. mit 2 %. Minimale Unterschiede weisen die Klassen „ $\text{Uran} < BG$ “ und „ $BG \leq \text{Uran} < 2 \mu\text{g/l}$ “ auf. Die Anteile von $U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt} differieren jeweils nur um 1 %. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde eine gemeinsame Auswertung von $U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt} vorgenommen.

4.3 Regionale Verteilung der Urankonzentrationen

Um die Urankonzentrationen in der Fläche darzustellen und regionale Unterschiede aufzuzeigen wurden sämtliche an allen 1170 Messstellen erhobenen Messwerte herangezogen. Alle Uranwerte wurden aufgrund der in Kapitel 4.1 beschriebenen Bewertungsgrundlagen den verschiedenen Konzentrationsklassen zugeordnet. Um die höchsten gemessenen Urankonzentrationen noch zu differenzieren, wurde eine weitere Klasse für Konzentrationen „ $\text{Uran} \geq 20 \mu\text{g/l}$ “ gebildet.

Folgende Konzentrationsklassen wurden festgelegt:

- $\text{Uran} < BG$,
- $BG \leq \text{Uran} < 2 \mu\text{g/l}$,
- $2 \mu\text{g/l} \leq \text{Uran} < 10 \mu\text{g/l}$,
- $10 \mu\text{g/l} \leq \text{Uran} < 20 \mu\text{g/l}$ und
- $\text{Uran} \geq 20 \mu\text{g/l}$.

In die Bewertung ging die höchste Konzentrationsklasse ein, die ein Messwert an einer Messstelle erreichte („worst case“). Das Ergebnis stellt Abbildung 8 dar.

Die regionale Darstellung der Urankonzentrationen zeigt, dass im Bereich des Niedersächsischen Tieflandes im Lockergestein (Quartär) bis auf wenige Ausnahmen vorwiegend Uran unterhalb der Bestimmungsgrenze oder Konzentrationen bis zu $2 \mu\text{g/l}$ festzustellen sind. In Südniedersachsen findet man dagegen nur wenige Grundwassermessstellen, bei denen alle Proben Urangelhalte unter der Bestimmungsgrenze aufweisen. Hier, im Übergangsbereich zum Festgestein und im Festgestein selbst, weisen die meisten Messstellen Gehalte bis zu $2 \mu\text{g/l}$ Uran auf. In einem Streifen von Hannover bis Göttingen sind Urankonzentrationen zwischen 2 und $10 \mu\text{g/l}$ häufig vertreten. Südlich einer Linie zwischen Hannover und Wolfsburg sind auch Gehalte zwischen 10 und $20 \mu\text{g/l}$ gemessen worden. Die höchsten Konzentrationen mit über $20 \mu\text{g/l}$ sind im Westen und Süden Niedersachsens aufgetreten (siehe Kapitel 4.6). Parallelen zu den Urangelhalten in den Böden Niedersachsens (siehe Abbildungen 2 und 3) sind erkennbar. Allerdings werden die Bodeneigenschaften auch von den geologischen Verhältnissen in besonderem Maße beeinflusst (LBEG 2007).

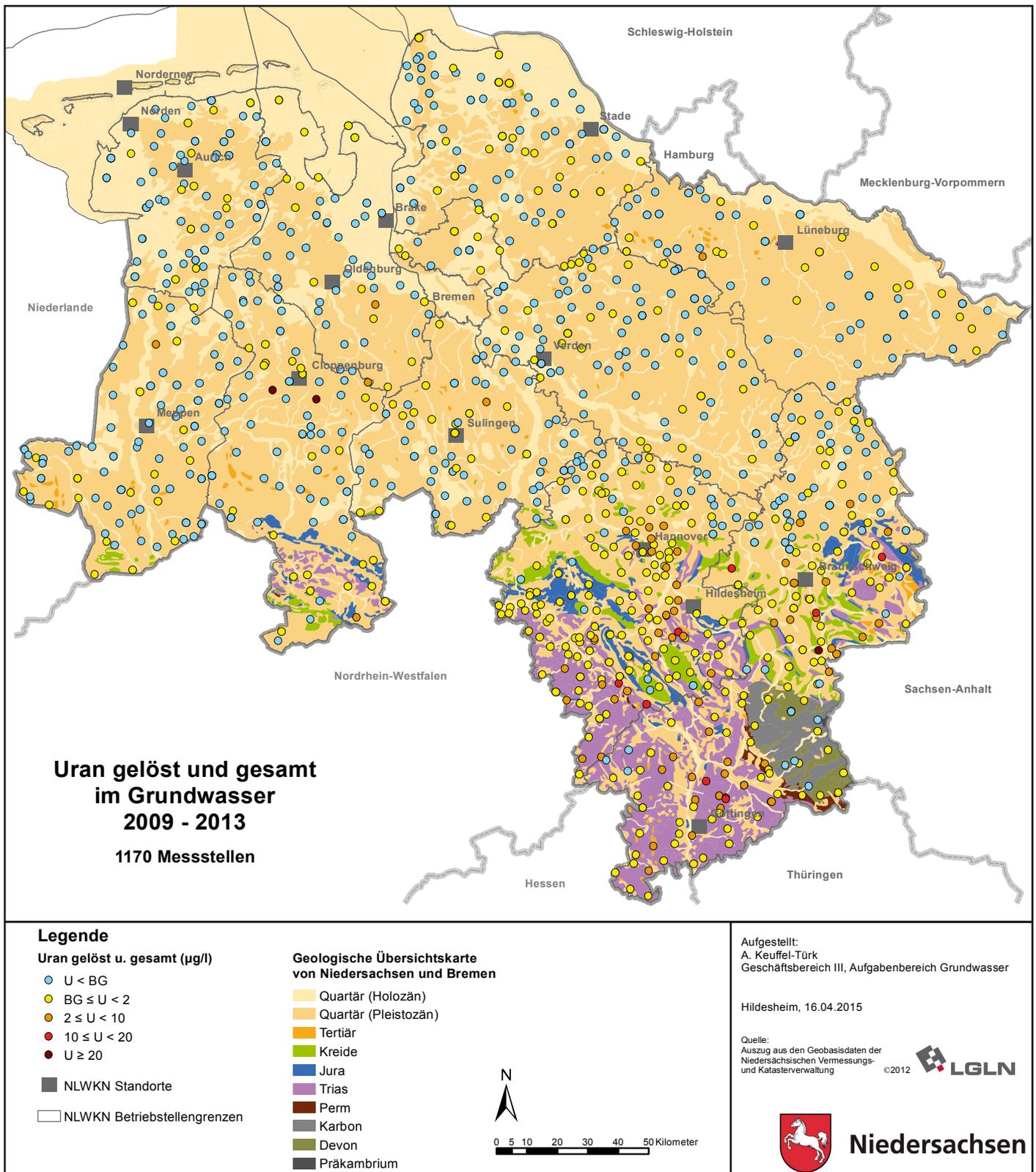


Abb. 8: Urankonzentrationen im Grundwasser im Zusammenhang mit der Geologie Niedersachsens. Messstellen mit Urangehalten im oberen Wertebereich sind vermehrt im Süden Niedersachsens zu finden.

4.4 Urankonzentrationen in unterschiedlichen Grundwassertiefen

Um zu klären, ob oberflächennahes Grundwasser andere Urankonzentrationen aufweist als Grundwasser aus größerer Tiefe, wurden die Entnahmetiefen, aber auch die vorgegebenen Entnahmetiefen sowie Filteroberkante und -unterkante jeder Messstelle betrachtet. Bei einer Entnahmetiefe bzw. Verfilterung bis 15 Meter (m) Tiefe

wurde die Messstelle den flachverfilterten Messstellen zugewiesen. Liegt die Verfilterung unterhalb einer Tiefe von 15 m, dann wurde die Messstelle als tiefverfiltert definiert. Da es keine Standorte gibt, die sowohl über eine flach- als auch über eine tiefverfilterte Messstelle verfügen, die verglichen werden können, erfolgte der Vergleich aller flach- und tiefverfilterten Messstellen über die Gesamtfläche Niedersachsens.

Die gemessenen Uranwerte (gemeinsame Auswertung von $U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt}) wurden den in Kapitel 4.3 beschriebenen Konzentrationsklassen zugeordnet. Lediglich die Klassen „ $10 \mu\text{g/l} \leq \text{Uran} < 20 \mu\text{g/l}$ “ und „ $\text{Uran} \geq 20 \mu\text{g/l}$ “ wurden aufgrund der geringen Messstellenanzahl in diesem Fall zusammengefasst. Da im Zeitraum von 2009 bis 2013 bis zu 16 Messwerte pro Messstelle vorliegen, wurde jeweils die höchste erreichte Konzentrationsklasse in diesem Zeitraum zur Auswertung herangezogen. Das Ergebnis ist in Abbildung 9 dargestellt.

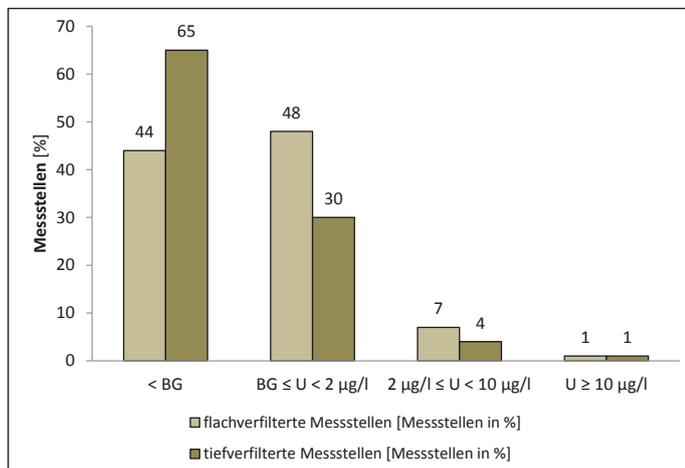


Abb. 9: Vergleich der Urankonzentrationen von 502 flachverfilterten und 632 tiefverfilterten Messstellen. Tendenziell lassen sich Urankonzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze eher in flachverfilterten Messstellen finden.

Von insgesamt 1170 Messstellen wurden 502 als flachverfilterte Messstellen und 632 als tiefverfilterte Messstellen klassifiziert. Bei den verbleibenden 36 Messstellen handelt es sich größtenteils um Quellen bzw. Quelfassungen bei denen eine Zuordnung zu einer Verfilterungstiefe nicht möglich ist.

Urankonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze weisen 44 % der flachverfilterten Messstellen auf, bei den tiefverfilterten Messstellen sind es 65 %. Dagegen ist der Anteil der flachverfilterten Messstellen mit Urankonzentrationen bis zu $10 \mu\text{g/l}$ größer als der der tiefverfilterten. In 48 % der flachverfilterten Messstellen liegt der Urangehalt zwischen der Bestimmungsgrenze und $2 \mu\text{g/l}$, während es bei den tiefverfilterten 30 % sind. In der Konzentrationsklasse „ $2 \mu\text{g/l} \leq \text{Uran} < 10 \mu\text{g/l}$ “ betragen diese Anteile 7 bzw. 4 %. Bei Uranwerten von $10 \mu\text{g/l}$ und darüber unterscheiden sich flach- und tiefverfilterte Messstellen nicht. Hier liegt der Anteil der betroffenen Messstellen bei nur 1 %.

Die hier betrachteten Messstellen weisen generell eher unauffällige Urangehalte auf. Messbare Konzentrationen findet man sowohl in flach- als auch in tiefverfilterten Messstellen. Die Auswertung gibt aber einen Hinweis darauf, dass Uran eher in den flachverfilterten Messstellen und damit im Grundwasser bis zu einer Tiefe von 15 m unter der Geländeoberfläche gefunden wird als in den tieferen Bereichen.

4.5 Vergleich von Urankonzentrationen mit Phosphat- und Nitratgehalten im Grundwasser

Die Auswirkungen anthropogener Einflüsse auf den Uran-gehalt in Grund- und Oberflächenwässern wurden bereits mehrfach (u.a. von BIRKE et al. 2009 und SMIDT 2011) untersucht. Aufgrund der anteilmäßig großen Flächennutzung durch die Landwirtschaft in Niedersachsen ist die Beeinflussung des Urangehalts im Grundwasser durch die Nutzung von Düngemitteln näher zu betrachten.

4.5.1 Phosphat und Uran

Unter anderem weisen UTERMANN & FUCHS (2008) und ZIELINSKI et al. (2006) auf einen deutlichen Zusammenhang zwischen erhöhten Urankonzentrationen im Grundwasser und landwirtschaftlicher Nutzung gegenüber forstwirtschaftlicher Nutzung hin. SMIDT (2011) gibt an, dass Urangehalte im Grundwasser unter Ackerland 3-17mal höher ausfallen können als unter Forststandorten. Uran aus Phosphatdüngung kann dabei die Ursache für die erhöhten Urankonzentrationen im Grundwasser sein (LINDEMANN 2005). Auch bei Langzeituntersuchungen von Böden konnte ein Zusammenhang zwischen der Anwendung von Phosphatdüngern und steigenden Urangehalten nachgewiesen werden (u. a. JONES 1992, TAKEDA et al. 2006, TAYLOR 2007, ROGASIK et al. 2008). Eine quantitative Aussage über die Menge des Urans, das durch die Düngung in Böden und Grundwasser eingebracht wird, kann aufgrund der unterschiedlichen Herstellungsverfahren von Düngemitteln und Eigenschaften der Rohphosphate momentan noch nicht getätigt werden (MERKEL 2009, SMIDT 2011).

Für die Untersuchung der Beziehung zwischen Uran und Phosphat im Grundwasser Niedersachsens wurde der Parameter Uran ($U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt}) und ortho-Phosphat herangezogen. In diese Betrachtungen sind nur Proben mit Uran- sowie Phosphatgehalten oberhalb der Bestimmungsgrenze eingegangen. Für die Auswertung der Beziehung zwischen Uran und ortho-Phosphat standen 659 Proben zur Verfügung.

Durch die Auswertung der Ergebnisse wurden statistisch und graphisch (Abbildung 10) keine Zusammenhänge zwischen den Parametern Uran und ortho-Phosphat nachgewiesen.

Ähnliche Ergebnisse erzielten Untersuchungen von Oberflächengewässern in Niedersachsen mit Hinweis auf die stark differierenden Urangehalte in den eingesetzten Phosphatdüngern (NLWKN 2013). Des Weiteren weisen Phosphate in Böden eine vergleichsweise geringe Mobilität auf (JAMES et al. 1996, MERKEL 2009, SCHEFFER et al. 2010) während anthropogen eingebrachtes Uran besonders im aeroben Bereich eine gute Löslichkeit aufweist und damit schneller verlagert werden kann (BfR 2007, SCHNUG 2012). Anzumerken ist, dass diese

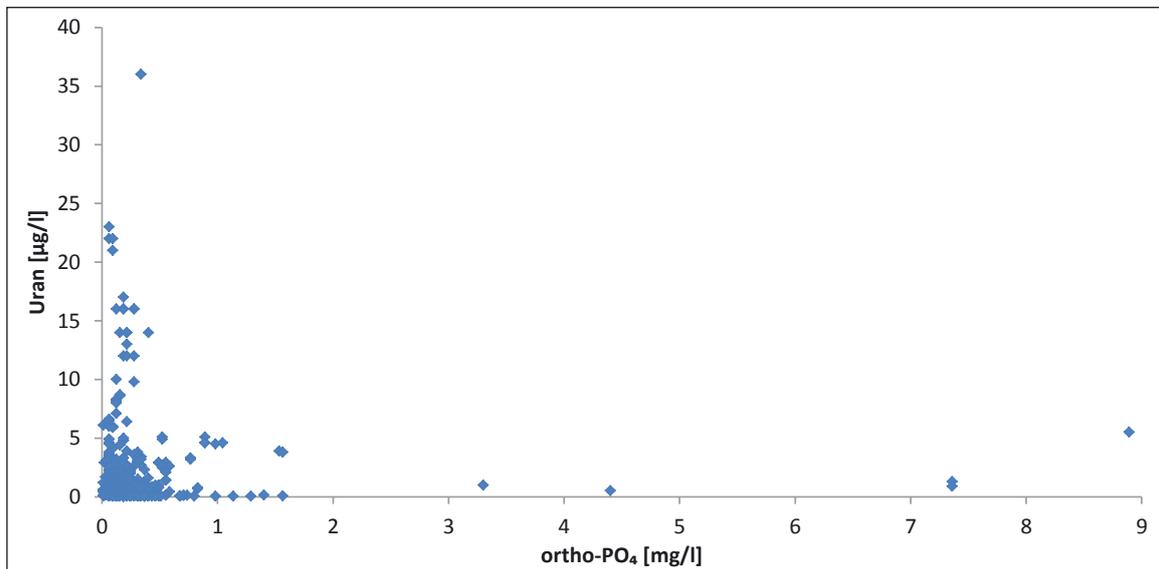


Abb. 10: Korrelation zwischen Uran und ortho-Phosphat in Grundwasserproben Niedersachsens. Es können keine Zusammenhänge nachgewiesen werden.

Ergebnisse flächendeckend gelten, kleinere Teilräume aber dennoch Abweichungen aufweisen könnten.

4.5.2 Nitrat und Uran

Liegt Nitrat in erhöhten Konzentrationen im Grundwasser vor, kann es zur Lösung von geogen gebundenem Uran kommen. Nitrat wirkt hierbei als Oxidationsmittel. Bei der Reduktion von Nitrat im anaeroben Bereich kann geogenes U [IV] zu U [VI] oxidiert werden (BELLER 2004, WU et al. 2010, SCHWERDTFEGER 2014). Damit liegt es dann in wasserlöslicher Form vor (siehe Kapitel 3.3). Erhöhte Nitratgehalte lassen sich auf landwirtschaftliche Quellen zurückführen (BMU 2012). Wieviel Uran durch die mit dem Nitratabbau verbundenen Prozesse im Grundwasser gelöst werden kann, ist noch nicht bekannt (SMIDT 2011).

In 1531 Proben wurden im Untersuchungszeitraum die Parameter Uran und Nitrat bestimmt. Weitere Proben, deren Uran- oder Nitratgehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen, wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Wie schon bei der Auswertung der Beziehungen zwischen Uran und Phosphat, lassen sich auch zwischen den Parametern Uran und Nitrat keine Zusammenhänge nachweisen (Abbildung 11).

Flächendeckend ist in Niedersachsen daher momentan nicht von einer Mobilisierung geogenen Urans durch erhöhte Nitratkonzentrationen in Boden und Grundwasser auszugehen. Auch die vorliegenden Messwerte aus den am intensivsten landwirtschaftlich genutzten Gebieten Niedersachsens lassen in der Fläche keine nachweislichen Zusammenhänge erkennen.

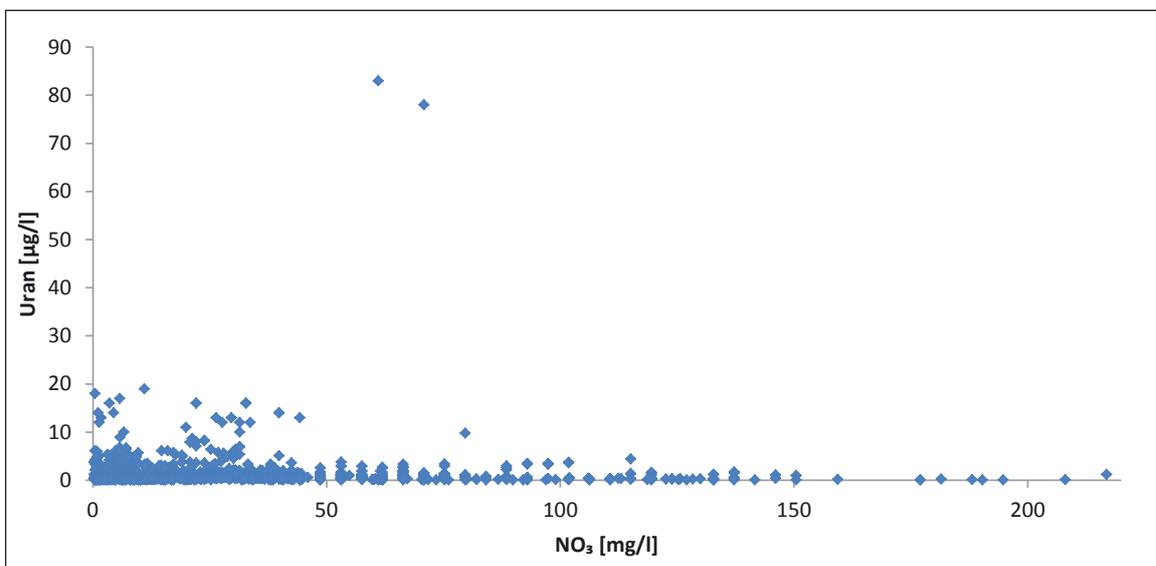


Abb. 11: Korrelation zwischen Uran und Nitrat in Grundwasserproben Niedersachsens. Es können keine Zusammenhänge nachgewiesen werden.

4.6 Einzelfallbetrachtungen

Im folgenden Kapitel stehen die Messstellen mit den höchsten Urankonzentrationen im Mittelpunkt der Betrachtungen.

In 12 Grundwassermessstellen sind Konzentrationen zwischen 10 und 83 µg U/l gemessen worden. Orange-

halte über 20 µg/l wurden an drei Messstellen festgestellt. Zwei davon befinden sich im Westen Niedersachsens, eine weitere liegt in Südniedersachsen. Konzentrationen zwischen 10 und 20 µg U/l wurden an neun Standorten gemessen, die sich alle ebenfalls in Südniedersachsen befinden. Die Lage der Messstellen ist Abbildung 12 zu entnehmen.



Abb. 12: Messstellen mit Urankonzentrationen ≥ 10 µg/l. Von den 12 Messstellen mit den höchsten Urangelhalten liegen 10 im Süden Niedersachsens.

Bei den Messstellen, die sich im südlichsten Teil Niedersachsens im Festgestein befinden, handelt es sich um Messstellen, die unterhalb einer Tiefe von 15 m verfiltert sind und damit zu den tiefverfilterten Messstellen gezählt werden (siehe Kapitel 5.3). Die Standorte Renshausen-Bannerholz, Renshausen-Kühler Grund, Bühle, Vorwohle, Wabachtal und Diekholzen gehören dazu und weisen deutlich größere Filtertiefen als 15 m auf. Alle anderen Messstellen (Schladen, Halchter-Ohrum, Rohde, Hofschwicheldt sowie Matrum und Tenstedt II im Westen) sind mit Filtertiefen bis zu 15 m flachverfilterte Messstellen.

Bei genauerer Betrachtung der zwölf Messstellen ist festzustellen, dass die Datengrundlage, die zur Einteilung in eine dieser beiden Konzentrationsklassen geführt hat, sehr inhomogen ist. Zur Klassifizierung wurde, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, der höchste an einer Messstelle aufgetretene Wert herangezogen. So liegt in einem Fall beispielsweise lediglich ein Messwert aus dem Beobachtungszeitraum vor, in einem anderen gibt es insgesamt 16 Werte. Nachfolgend werden die Messergebnisse im Einzelnen erläutert.

Messstellen mit Urankonzentrationen $\geq 20 \mu\text{g/l}$

Messstelle **Matrum** und Messstelle **Tenstedt II** liegen im Landkreis Cloppenburg.

Beide Messstellen wurden in den Jahren 2011 auf U_{gesamt} und 2012 auf $U_{\text{gelöst}}$ untersucht. Mit 78 bzw. 83 $\mu\text{g U/l}$ weist die Messstelle Matrum die höchsten Urankonzentrationen in Niedersachsen im Untersuchungszeitraum auf. In Tenstedt II wurden Gehalte von 29 und 36 $\mu\text{g U/l}$ festgestellt. Beide Messstellen weisen in den Jahren 2011 und 2012 Uranwerte in ähnlicher Größenordnung auf (Abbildung 13).

Im Grundwasser der Messstelle **Schlادن** (Landkreis Wolfenbüttel) wurden im Jahr 2011 viermal und im Jahr 2012 einmal Urangelhalte größer bzw. gleich 20 $\mu\text{g/l}$ festgestellt. In einer ähnlichen Größenordnung befand sich mit 18 $\mu\text{g/l}$ auch die 2012 gemessene Urankonzentration (Abbildung 14). Der im Jahr 2013 beobachtete Konzentrationsunterschied zwischen $U_{\text{gelöst}}$ und U_{gesamt} kann mit den vorliegenden Informationen zum jetzigen Zeitpunkt nicht erklärt werden.

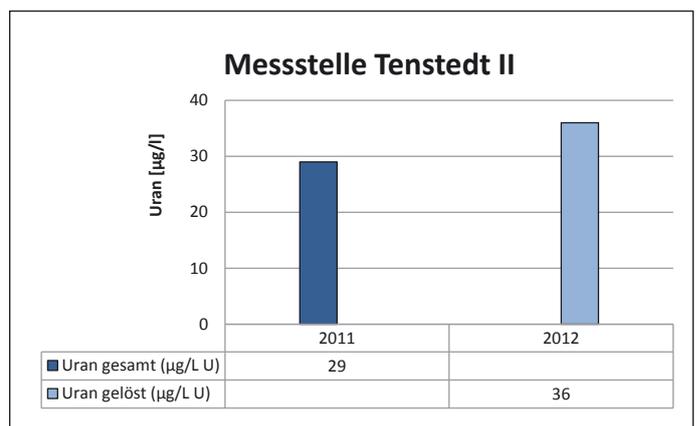
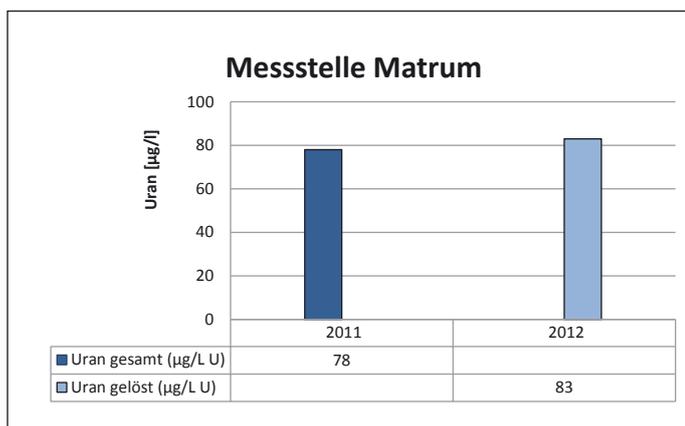


Abb. 13: Urankonzentrationen der Messstellen Matrum und Tenstedt II. An diesen Standorten wurden die höchsten Urangelhalte im Grundwasser gemessen.

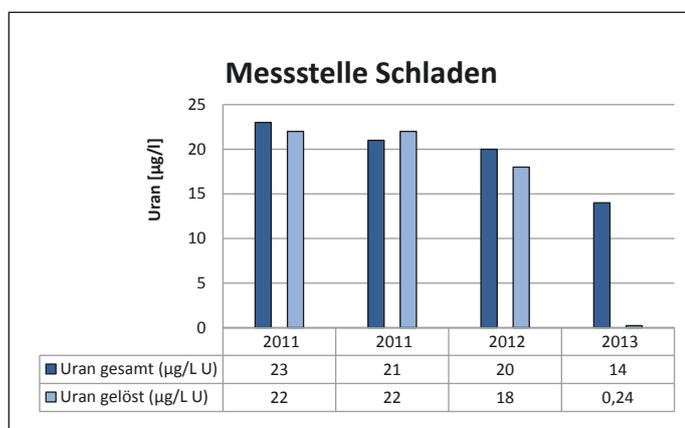


Abb. 14: Urankonzentrationen der Messstelle Schlادن.

Messstellen mit Urankonzentrationen ≥ 10 und $< 20 \mu\text{g/l}$

Neun Messstellen weisen Urankonzentrationen zwischen 10 und 20 $\mu\text{g/l}$ auf.

Bei drei Messstellen liegen nur zwei bzw. drei Messwerte aus einem bzw. zwei Jahren vor.

Messstelle **Bühle** (Landkreis Northeim) wurde im Beobachtungszeitraum nur einmal beprobt. Im Jahr 2013 betrug der U_{gelöst}-Gehalt 11 $\mu\text{g/l}$.

Jeweils drei Uranwerte liegen für die Messstellen **Rhode** (Landkreis Helmstedt) und **Halchter-Ohrum** (Landkreis Wolfenbüttel) vor. Die Urankonzentrationen dieser flach-

verfilterten Messstellen liegen zwischen 12 und 16 $\mu\text{g/l}$ (Abbildung 15).

Die Messstellen **Renshausen-Kühler Grund** und **Renshausen-Bannerholz**, die sich im Landkreis Göttingen befinden, weisen jeweils vier Uranwerte aus zwei Jahren auf. Die Gehalte liegen mit 12 bis 14 $\mu\text{g/l}$ eindeutig in der Konzentrationsklasse $10 \mu\text{g/l} \leq U < 20 \mu\text{g/l}$ (Abbildung 16).

An der Messstelle **Hofschwicheldt** (Landkreis Peine) liegen vier Messwerte aus dem Jahr 2011 vor, die jeweils 16 μg Uran pro Liter aufweisen. In einer weiteren Probe im Jahr 2013 wurde mit 9,8 $\mu\text{g/l}$ weniger Uran festgestellt (Abbildung 17).

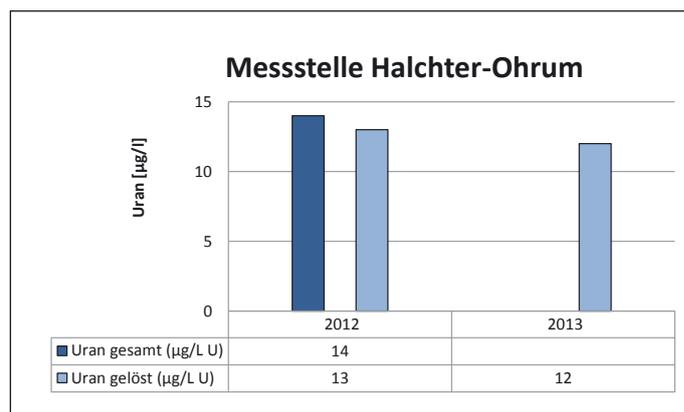
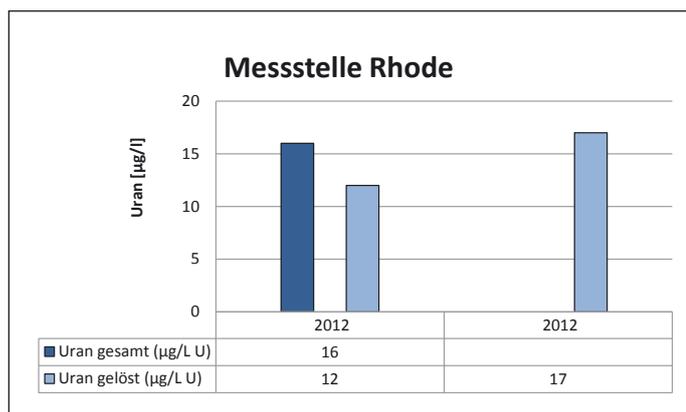


Abb. 15: Urankonzentrationen der Messstellen Rhode und Halchter-Ohrum.

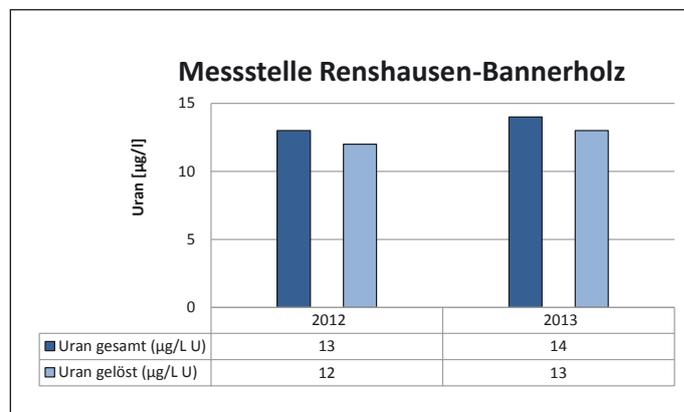
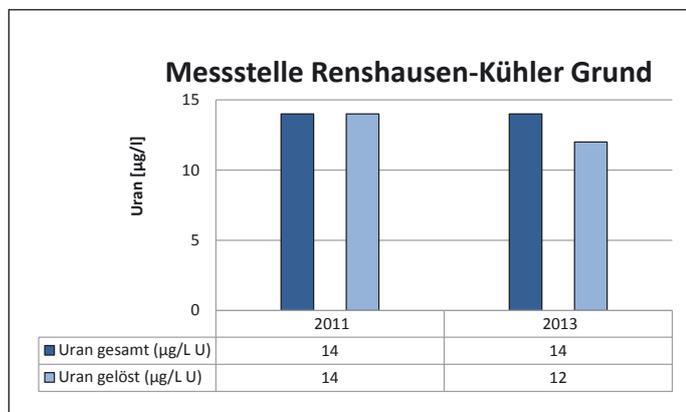


Abb. 16: Urankonzentrationen der Messstellen Renshausen-Kühler Grund und Renshausen-Bannerholz.

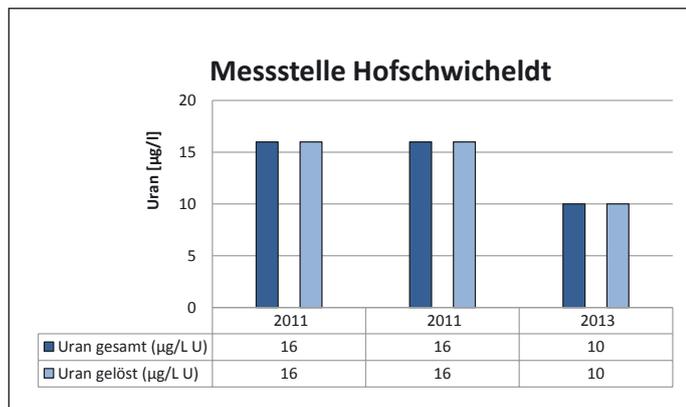


Abb. 17: Urankonzentrationen der Messstelle Hofschwicheldt.

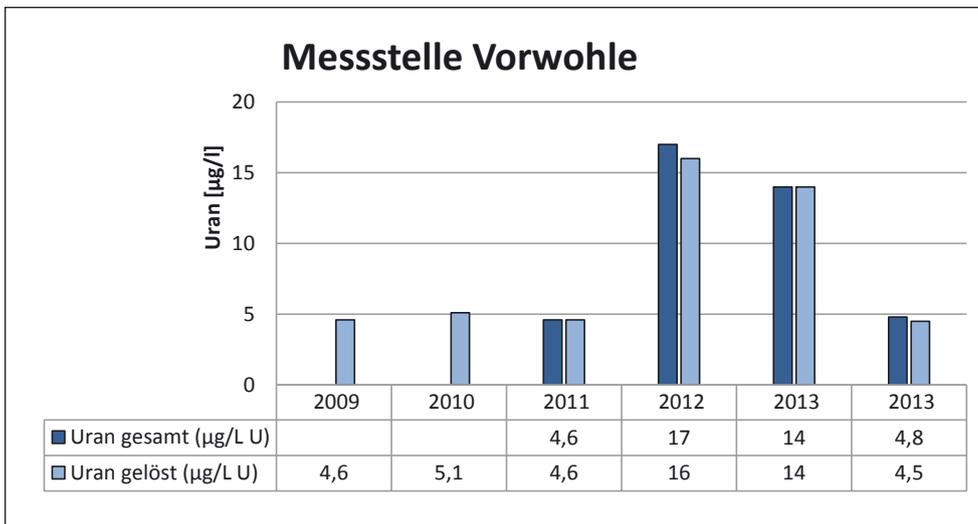


Abb. 18: Urankonzentrationen der Messstelle Vorwohle.

Messstelle **Vorwohle** im Landkreis Holzminde fällt durch zwei Proben aus den Jahren 2012 und 2013 auf, bei denen die Konzentrationen von U_{gesamt} und $U_{\text{gelöst}}$ zwischen 14 und 17 µg/l liegen. Wie Abbildung 18 zeigt, sind alle anderen Messwerte kleiner oder gleich 5,1 µg/l.

Die Urangehalte an der Messstelle **Wabachtal** (Landkreis Holzminde) liegen alle, bis auf eine Ausnahme, zwischen 4,9 und 6,7 µg/l. Lediglich in der Grundwasserprobe der ersten Jahreshälfte 2013 erreichte sowohl U_{gesamt} als auch $U_{\text{gelöst}}$ genau den Wert von 10 µg/l (Abbildung

19). Dies führte zur Einteilung in die Konzentrationsklasse „10 µg/l ≤ Uran < 20 µg/l“. Unter Berücksichtigung aller Messungen wäre hier die Zuordnung zur Konzentrationsklasse „2 µg/l ≤ Uran < 10 µg/l“ angemessener.

Bei der Messstelle **Diekholzen** im Landkreis Hildesheim sind es zwei Werte, die dazu führen, dass die Messstelle in die Konzentrationsklasse „10 µg/l ≤ Uran < 20 µg/l“ einzuordnen ist. Wie Abbildung 20 zeigt, überschreiten alle anderen Urankonzentrationen nicht den Wert von 6,3 µg/l.

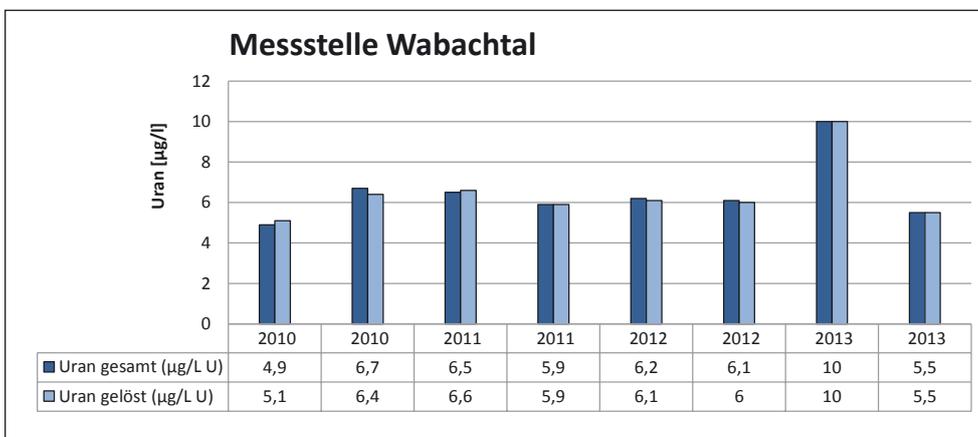


Abb. 19: Urankonzentrationen der Messstelle Wabachtal.

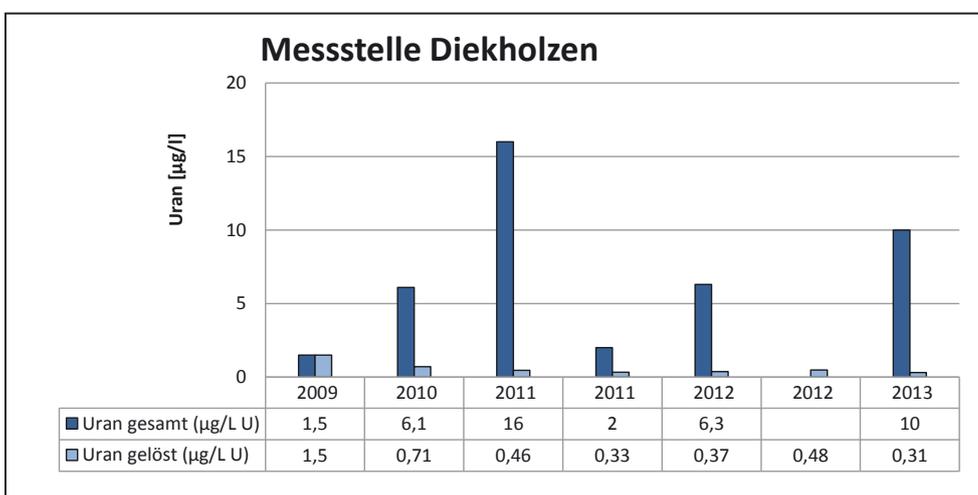


Abb. 20: Urankonzentrationen der Messstelle Diekholzen

Die Messstelle Diekholzen weist zusätzlich eine Besonderheit auf. Die Konzentrationen von $U_{\text{gelöst}}$ liegen generell in einem sehr niedrigen Bereich ($1 \mu\text{g/l}$ und darunter), während sich die höheren Urangelhalte ausschließlich auf die Gesamtgehalte beziehen. Diese Erkenntnis steht im Widerspruch zu den Ergebnissen des niedersachsenweiten Vergleichs von U_{gesamt} - und $U_{\text{gelöst}}$ -Konzentrationen, die keine wesentlichen Unterschiede zeigten (siehe Abbildung 6). Das geförderte Grundwasser dieser Messstelle wies ab 2010 eine graue Farbe und eine sehr starke Trübung auf. In einigen Proben bildete sich ein grauer Bodensatz. Beim Parameter U_{gesamt} wird die unfiltrierte Probe analysiert, d.h. es werden auch die Trübstoffe erfasst. Daher ist die Urankonzentration von U_{gesamt} höher als die des Parameters $U_{\text{gelöst}}$, bei dem die Analytik nach Filtration der Probe erfolgt. Die Urankonzentrationen der Messstelle Diekholzen sind weiter zu beobachten. Es ist sowohl U_{gesamt} als auch $U_{\text{gelöst}}$ zu bestimmen.

Von den zwölf Messstellen, die Urankonzentrationen von $\geq 10 \mu\text{g/l}$ aufweisen, befinden sich die beiden Messstellen (Matrum und Tenstedt II) mit den höchsten Gehalten im Westen Niedersachsens. Dies steht im Gegensatz zu den regionalen Verhältnissen von Geologie und Böden, die im Bereich der pleistozän geprägten Lockergesteine eher geringe Uranwerte erwarten lassen (FRIEDMANN & LINDENTHAL 2009, LBEG 2011). Die Urangelhalte anderer Grundwassermessstellen im Bereich dieser beiden Standorte betragen daher auch weniger als $2 \mu\text{g/l}$ oder liegen unter der BG (Abbildung 8). Eine im Rahmen der Auswertung durchgeführte Betrachtung geologischer Bohrprofile des LBEG sowie der Probeentnahmetiefen (Verfiltration im Bereich abgelagerter Sande aus dem Pleistozän) an den Messstellen und in deren Umfeld lassen keine eindeutigen Erkenntnisse zu. Der Einfluss lokaler eiszeitlicher Ablagerungen von Geschiebe mit sauren Magmatiten aus Skandinavien, wie in BÖTTCHER et al. 2012 thematisiert, ist an diesen Standorten nicht zu erwarten.

Ob die punktuell hohen Urangelhalte eine Folge einer anthropogenen Beeinflussung (Phosphatdüngung) sind (u. a. ROGASIK et al. 2008, RÖMER et al. 2010, SMIDT 2011), ist derzeit nicht geklärt. Die Landnutzung im Umfeld der beiden betroffenen Messstellen liefert keine weiteren Hinweise. Sie weist keine Besonderheit im Vergleich zu den anderen Messstellen im dortigen Bereich auf, bei denen geringere oder keine Urangelhalte gemessen wurden.

Die anderen zehn Messstellen mit vergleichsweise hohen Urangelhalten befinden sich alle im Südosten Niedersachsens im Berg- bzw. Bergvorland. Auch für diese und die umliegenden Messstellen, mit z.T. deutlich geringeren Urankonzentrationen, wurden geologische Bohrprofile verglichen.

Bedingt durch die Geologie sind im Bereich des Festgesteins höhere Urankonzentrationen zu erwarten. Beispielsweise liegen die Verfiltrationen der Messstellen Wabachtal, Vorwohle, Bühle, Renshausen-Kühler Grund und Renshausen-Bannerholz jeweils in den geologischen Schichten des Buntsandstein der Trias (Abbildung 8). Dennoch gibt es auch Messstellen im näheren Umfeld, deren Grundwasser aus denselben geologischen Formationen stammt, das aber eine deutlich geringere Urankonzentration aufweist (unter $2 \mu\text{g/l}$).

Im Süden sind die meisten Grundwassermessstellen, eingeschlossen der o. g., auch in größerer Tiefe (hier in über 20 m Tiefe) verfiltriert (Abbildung 12). Umliegende Messstellen, die geringere Urankonzentrationen aufweisen, sind dagegen häufig in geringerer Tiefe verfiltriert. In vielen Fällen stammen die Proben aber auch dort aus denselben oder ähnlichen geologischen Schichten.

Vergleichsweise geringe Filtertiefen weisen die Standorte Hofschwicheldt, Rohde, Halchter-Ohrum und Schladen auf. Das Grundwasser fließt diesen Messstellen allerdings meist aus Lockergesteinen mit Ton- und Kalkanteilen zu, während die beprobten Messstellen im Umfeld das Grundwasser häufig aus größeren pleistozänen Sanden oder Feinkiesen beziehen. Ein Einfluss durch die geologischen Verhältnisse liegt also hier ebenfalls nahe. Dennoch muss erneut darauf hingewiesen werden, dass auch Messstellen beprobt wurden, deren Umfeld vergleichbare geologischen Gegebenheiten zu den o. g. aufweist, an denen deutlich niedrigere Urankonzentrationen gemessen wurden (z. B. Messstelle Süpplingenburg mit max. $0,078 \mu\text{g U/l}$ in der Nähe der Messstelle Rohde). Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass externe Einflüsse eine Rolle spielen.

Für alle zwölf Messstellen ist es notwendig die Datengrundlage zu erweitern. Z. T. ist die Anzahl der gemessenen Uranwerte zu gering, oder die Konzentrationschwankungen der an einer Messstelle erhobenen Daten zu groß, so dass eine abschließende, statistisch fundierte Bewertung nicht möglich ist.

5 Fazit und Ausblick

In der Vergangenheit fand im Rahmen der Grundwasserüberwachung Niedersachsens keine Untersuchung von Uran statt. Um einen Überblick über die Urankonzentrationen im Grundwasser zu erhalten, wurde im Jahr 2009 damit begonnen, den Parameter Uran in das Untersuchungsprogramm des NLWKN mit aufzunehmen. Nach fünf Jahren liegen inzwischen Urangelhalte von Messstellen aus ganz Niedersachsen vor.

Die Urankonzentrationen liegen zwischen Werten unter der Bestimmungsgrenze bis zu 83 µg/l. Festzuhalten ist, dass nur in zwölf von insgesamt 1170 Messstellen zumindest in einer Probe Konzentrationen von 10 µg U/l und mehr festgestellt wurden. Das bedeutet, lediglich in einem Prozent der Messstellen wird der gesundheitliche Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 10 µg U/l erreicht bzw. überschritten. Die TrinkwV wird hier in Ermangelung einer Bewertungsgrundlage für Grundwasser herangezogen.

Aufgrund dieser Ergebnisse ist festzustellen, dass es in Niedersachsen flächenhaft keine Urankonzentrationen über dem Grenzwert der TrinkwV und keine damit eventuell verbundenen Probleme im Grundwasser gibt.

Im Norden Niedersachsens im Bereich des Lockergesteins des Niedersächsischen Tieflandes treten vorwiegend Urankonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze sowie Konzentrationen bis zu 2 µg/l auf. Im Süden sind dagegen weniger Messstellen mit Uranwerten unter der BG zu finden. Im Übergangsbereich zum Festgestein und im Festgestein, weisen die meisten Messstellen Urankonzentrationen zwischen BG und 2 µg/l auf.

Diese Verteilung deutet auf einen Zusammenhang von Urangelhalten im Grundwasser und den geogenen Eigenschaften des Untergrundes hin.

Von den zwölf Messstellen, die Gehalte von 10 µg U/l und mehr aufweisen, liegen zehn im Berg- und Bergvorland, die beiden mit den höchsten Urankonzentrationen dagegen im Westen Niedersachsens im Lockergestein. Aussagen über die Herkunft des Urans dieser zwei Messstellen sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Ein Zusammenhang zwischen Uran im Grundwasser mit der landwirtschaftlichen Nutzung und dem Aufbringen mineralischer Dünger ist anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht zu belegen. Bei den vorliegenden Daten konnte keine Korrelation zwischen Urankonzentration und Nitrat- oder Phosphatgehalten im Grundwasser festgestellt werden. Anzumerken ist, dass diese Ergebnisse flächendeckend gelten, in kleineren Teilräumen können dennoch Abweichungen auftreten.

Untersuchungen zu Uran im Grundwasser anderer Bundesländer kommen zu ähnlichen Ergebnissen (LGL/LFU 2007, LAU/LHW 2007, HLU 2010, LUNG 2012, LANUV 2014). Der größte Teil der untersuchten Messstellen wies sehr geringe Urangelhalte auf. In Bayern lagen z.B. 73 % aller Uranwerte unter 2 µg/l. Der Höchstwert betrug dort 75 µg/l. In Sachsen-Anhalt wurden Urankonzentrationen bis zu 68 µg/l festgestellt und in Hessen bis zu 86 µg/l, während der Maximalwert in Mecklenburg-Vorpommern bei 34 µg/l lag. In Nordrhein-Westfalen sowie in den bereits genannten Bundesländern konnte ein Zusammenhang zwischen den Urankonzentrationen im Grundwasser und den geogenen Verhältnissen bzw. den geologischen Formationen im Grundwassereinzugsbereich hergestellt werden. In Hessen, Nordrhein-Westfalen und Mecklenburg-Vorpommern erfolgten Untersuchungen, um den Einfluss der Landwirtschaft und damit der Phosphatdüngung auf den Urangelhalt des Grundwassers zu prüfen. Dabei konnte eine Korrelation von Uran im Grundwasser und Landwirtschaft/Düngung nicht nachgewiesen werden. Untersuchungen der Jacobs University Bremen weisen auf erhöhte Urangelhalte in gedüngten Ackerböden von Dauerbeobachtungsflächen in Niedersachsen hin. Die Ergebnisse auf deren Mobilität sind jedoch noch wenig belastbar (SMIDT 2011).

Als Ergebnis der Bestandsaufnahme bleibt festzuhalten, dass in der Fläche die Urangelhalte im Grundwasser in Niedersachsen unter 10 µg/l und damit unterhalb des Grenzwertes, den die TrinkwV vorgibt, liegen. Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse besteht zum jetzigen Zeitpunkt kein weiterer Handlungsbedarf.

Bei den zwölf Messstellen, die Konzentrationen von 10 µg U/l und mehr aufweisen, ist die Datengrundlage sehr inhomogen. Die Bandbreite reicht von nur einem einzigen Messwert aus einer Beprobung bis zu acht Probenahmen mit insgesamt 16 Messwerten bei einer Messstelle. Zudem sind auch innerhalb einer Messstelle schwankende Urankonzentrationen zu beobachten. Diese Messstellen sind weiterhin auf Uran zu untersuchen und die Ergebnisse erneut zu bewerten. Unter Einbindung von standortspezifischen Gegebenheiten lassen sich gegebenenfalls Aussagen über mögliche Ursachen dieser punktuell höheren Urankonzentrationen abschätzen.

6 Literaturverzeichnis

- BELLER, H. R. (2005): Anaerobic, Nitrate-Dependent Oxidation of U(IV) Oxide Minerals by the Chemolithoautotrophic Bacterium *Thiobacillus denitrificans*. In: *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 71, Nr. 4, S. 2170-2174.
- BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung) (2007): BfR empfiehlt die Ableitung eines europäischen Höchstwertes für Uran in Trink- und Mineralwasser. Gemeinsame Stellungnahme Nr. 020/2007 des BfS und des BfR vom 05. April 2007.
- BIRKE, M., RAUCH, U. & H. RASCHKA (2008): Geochemischer Atlas von Deutschland. In: *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, Band 77, S. 13-15. Wien. URL: < http://www.landesmuseum.at/pdf_frei_remote/BerichteGeolBundesanstalt_77_0013-0015.pdf> Zugriff: 28.11.2014
- BIRKE, M. & U. RAUCH (2008a): Uranium in stream water of Germany. In: DE KOK, L. J. & E. SCHNUG (2008): *Loads and fate of fertilizer-derived uranium*. S. 79-91. Leiden: Backhuys Publishers.
- BIRKE, M., RAUCH, U. & H. LORENZ (2009): Uranium in stream and mineral water of the Federal Republic of Germany. In: *Environmental Geochemistry and Health*, 31, S. 693-706.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) [Hrsg.] (2012): Nitratbericht 2012. Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Stand: September 2012. URL: < http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Klima-und-Umwelt/Nitratbericht-2012.pdf?__blob=publicationFile> Zugriff: 30.10.2014.
- FAIR, J. H. (2014): Radionuclides in Fracking Wastewater – Managing a Toxic Blend. In: *Environmental Health Perspectives*, Vol. 122, 2, S. 50-55.
- FRIEDMANN, L. & W. LINDENTHAL (2009): Uran im Grund- und Trinkwasser in Bayern. In: *Wasser und Abfall*, 4/2009, S. 21-24.
- HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) [Hrsg.] (2010): Uran in hessischen Grund- und Rohwässern, Abschlussbericht. Wiesbaden. URL: < http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/wasser/sonstige_berichte/uran_in_hess_Grundaessern_Abschlussbericht_2010.pdf>
- JAMES, D. W., HOTUBY-AMACHER, J., ANDERSON, G. L. & D. A. HUBER (1996): Phosphorus mobility in calcareous soils under heavy manuring. In: *Journal of Environmental Quality*, 25, S. 770-775.
- JONES, R. L. (1992): Uranium and phosphorus contents in Morrow plot soils over 82 years. In: *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23, S. 67-73.
- LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) [Hrsg.] (2014): Diffuse Stoffeinträge ins Grundwasser. Grundwasserbelastungen aus diffusen Quellen – Ergebnisse der 2. Bestandsaufnahme. Symposium zur EG-WRRL – „Halbzeit – WRRL auf der Zielgeraden?“. URL: < http://www.dwa-nrw.de/tl_files/_media/content/PDFs/LV_Nordrhein-Westfalen/wrri/wrri2014/leuchs-text.pdf>
- LAMAS, M. (2005): Factors affecting the availability of uranium in soils. In: *Landbau-forschung Völknerode, Sonderheft 278*. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig.
- LAU/LHW (Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt/Landesbetrieb für Hochwasserterschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt) [Hrsg.] (2007): Urankonzentrationen im Grundwasser von Sachsen-Anhalt. < http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/arbeitsbericht_uran_mv_2012.pdf>
- LBEG (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie) (2007): Erdgeschichte von Niedersachsen – Geologie und Landschaftsentwicklung. *GeoBerichte 6*. Hannover.
- LBEG (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie) (2011): Uran im Boden und Grundwasser in Niedersachsen. Stellungnahme. Hannover.
- LGL/LFU (Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit und Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2007): Untersuchungen zum Vorkommen von Uran im Grund- und Trinkwasser in Bayern.
- LINDEMANN, I. (2005): Schwer zu schlucken – keine Entwarnung für Uran in Trinkwässern. In: *Strahlentelex*, Nr. 440-441, 19. Jahrgang, S. 1-4.
- LUNG (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern) [Hrsg.] (2012): Bestandsaufnahme zur Klärung erhöhter Uran-Gehalte im Grund- und Trinkwasser in Mecklenburg-Vorpommern. URL: < http://www.lung.mv-regierung.de/dateien/arbeitsbericht_uran_mv_2012.pdf> Zugriff: 05.11.2014
- NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz) (2012): Regionalbericht für das Hase-Einzugsgebiet – Darstellung der Grundwassersituation, Reihe Grundwasser, Band 12, 121 S., Dezember 2012.
- NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz) (2014): Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen (GÜN) – Güte- und Standsmessnetz Grundwasser, Reihe Grundwasser, Band 18, 46 S., Juli 2014.
- NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz) (2013): Uran in Oberflächengewässern Niedersachsens. Veröffentlichung zum Thema Gewässergüte, Ausgabe 8/2013. Hildesheim.
- MERKEL, B. J. (2002): Uran in Trinkwasser. Internetbeitrag aus dem Institut für Geologie der TU Bergakademie Freiberg. URL: < <http://tu-freiberg.de/geo/hydro/prof-dr-broder-j-merkel/uran-trinkwasser-leitungswasser-mineralwasser-heilwasser>> Zugriff: 29.10.2014
- MERKEL, B. J. (2009): Uran im Trink- und Mineralwasser. Vortrag am Centrum für Technologie und Umwelt, Osnabrück. URL: < http://www.cut-os.de/downloads/Vortrag_Merkel_internet.pdf> Zugriff: 07.10.2014
- RÖMER, W.; GRÜNDEL, M. & F. GÜTHOFF (2010): U-238, U-235, Th-232 und Ra-226 in einigen ausgewählten Rohphosphaten, Phosphatdüngern, Boden- sowie Pflanzenproben aus einem P-Düngeversuch. In: *Journal für Kulturpflanzen*, 62 (6), S. 200-210. Stuttgart: Ulmer.
- ROGASIK, J., KRATZ, S., FUNDER, U., PANTEN, K., BARKUSKY, D., BAUMECKER, R., GÜTSE, R., LAUSEN, P., SCHERER, H. W., SCHMIDT, L. & E. SCHNUG (2008): Uranium in soils of german long-term fertilizer experiments. In: DE KOK, L. J. & E. SCHNUG (2008): *Loads and fate of fertilizer-derived uranium*. S. 135-147. Leiden: Backhuys Publishers.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G. W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K. & B.-M. WILKE (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Auflage. Heidelberg: Springer.
- SCHNUG, E. (2012): Uran in Phosphor-Düngemitteln und dessen Verbleib in der Umwelt. In: *Strahlentelex*, Nr. 612-613, S. 3-10.
- SCHWERDTFEGGER, B. (2014): Uran: Herkunft und Verhalten im Grundwasser. Vortrag: 1. Wiesbadener Grundwassertag. URL: < http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/wasser/hydrogeologie/Fortbildungs-und_Vortragsveranstaltungen/Grundwassertag2014/Uran_Herkunft_Verhalten_Schwertfeger.pdf> Zugriff: 14.11.2014.
- SHEPPARD, S. C., SHEPPARD, M., GALLERAND, M. O. & B. SANIPELLI (2005): Derivation of ecotoxicity threshold for uranium. In: *Journal of Environmental Radioactivity*, 79, S. 55-83.
- SMIDT, G. A. (2011): Mobility of fertilizer-derived uranium in arable soils and its contribution to uranium concentrations in groundwater and tap water. PhD-Thesis. Jacobs University Bremen.
- SSK (Strahlenschutzkommission) (2014): Radiologische Betrachtung zu unkonventioneller Förderung von Erdgas (Hydraulic Fracturing – Fracking). Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet am 17./18. Juli 2014. Bonn.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (D_STATIS) (2012): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei – Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Fachserie 3, Reihe 5.1. URL: < https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Flaechennutzung/BodenflaechennutzungPDF_2030510.pdf?__blob=publicationFile> Zugriff: 13.11.2014.
- TAKEDA, A., TSUKADA, H., TAKAKU, Y., HISAMATSU, S. & M. NANZYO (2006): Accumulation of uranium derived from long-term fertilizer applications in a cultivated Andisol. In: *Science of the Total Environment*, 367, S. 924-931.
- TAYLOR, M. D. (2007): Accumulation of uranium in soils from impurities in phosphate fertilisers. In: *Landbauforschung Völknerode*, 57, S. 133-139.
- TRINKWV (Trinkwasserverordnung) (2013): Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. August 2013 (BGBl. I S. 2977), die durch Artikel 4 Absatz 22 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist.
- UBA (Umweltbundesamt) [Hrsg.] (2012): Uran in Boden und Wasser. *Texte 37/2012*. 2. veränderte Fassung. Dessau-Roßlau.
- UBA (Umweltbundesamt) [Hrsg.] (2013): Uran (U) im Trinkwasser: Kurzbegründung des gesundheitlichen Grenzwertes der Trinkwasserverordnung (10 µg/l U) und des Grenzwertes für „säuglingsgeeignete“ abgepackte Wasser (2 µg/l U). Hintergrund, Januar 2013. Dessau-Roßlau. URL: < <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4193.pdf>> Zugriff: 14.10.2014
- UTERMANN, J. & M. FUCHS (2008): Uranium in German soils. In: DE KOK, L. J. & E. SCHNUG (2008): *Loads and fate of fertilizer-derived uranium*. S. 33-47. Leiden: Backhuys Publishers.
- UTERMANN, J., DUIJNISVELD, W. H. M., GODBERSEN, L. & M. FUCHS (2009): Uran in Böden und Sickerwässern – gibt es Indizien für eine Phosphordünger-bürtige Uran-Anreicherung? Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der DBG, Kom. I, „Böden – eine endliche Ressource. Bonn, September 2009.
- WU, W. M., CARLEY, J., GREEN, S. J., LUO, J., VAN NOSTRAND, J., LOWE, K., MEHLHORN, T., CARROL, S., BOONCHAYANANT, B., LOEFFLER, F., WATSON, D., KEMNER, K., ZHOU, J., KITANIDIS, P., KOSTKA, J., JARDINE, P. & C. CRIDDLE (2010): Effects of nitrate on the stability of uranium in a bioreduced region of the subsurface. In: *Environmental Science and Technology*, 44/13, S. 5104-5111.
- ZIELINSKI, R. A., OREM, W. H., SIMMONS, K. R. & P. J. BOHLEN (2006): Fertilizer-derived uranium and sulphur in rangeland soil and runoff – A case study in central Florida. In: *Water Air and Soil Pollution*, 176, S. 163-183.