



# Untersuchungen zum Vorkommen von Uran im Grund- und Trinkwasser in Bayern

Autoren: L. Friedmann, S. Herb, W. Höbel, C. Höller, M. Kaschube, U. Lessig, G. Leutner, W. Lindenthal, C. Reifenhäuser, A. Schreff

Stand: Dezember 2007

## Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung	4
1.1	Chemische Eigenschaften und Vorkommen von Uran	4
1.2	Uranvorkommen in Bayern	5
1.3	Urangehalte in Grund- und Trinkwasser im Vergleich zu anderen Wässern	5
2	Geologie	6
2.1	Die hydrogeologischen Räume Bayerns	6
2.2	Aufschlüsselung des Uran-Vorkommens in Grund- bzw. Trinkwasser nach geologischer Beschaffenheit des Gewinnungsgebietes	9
3	Entstehung und Durchführung des Messprogramms „Uran in Grund- und Trinkwasser“	12
4	Untersuchungsmethode und Untersuchungsumfang	13
5	Messergebnisse und Auswertung der Daten	14
5.1	Messwerteverteilung in den bayerischen Regierungsbezirken	14
5.2	Zum Uran-Untersuchungsprogramm des LGL	20
5.3	Messwerteverteilung nach untersuchten Wasserarten	22
5.4	Gesamtergebnisse bei den einzelnen Wasserarten	25
5.5	Uran im Trinkwasser	27
6	Toxikologische Bewertung	28
7	Beurteilung von Uranwerten im Trinkwasser	30
8	Entfernung von Uran im Rahmen der Trinkwasseraufbereitung	31
9	Entsorgung und Aspekte des Strahlenschutzes	35
9.1	Rechtliche Vorschriften für die Entsorgung	35
9.1.1	Strahlenschutzrechtliche Regelungen	35
9.1.2	Abfallrechtliche Zulässigkeit	35
9.2	Pilotprojekt Uranentfernung mittels Anionenaustauscher	36
9.2.1	Messergebnisse	36
9.2.2	Bewertung der Entsorgungswege für das Pilotprojekt	36
10	Empfehlungen für die Beratung von Wasserversorgungsunternehmen	37
11	Empfehlungen für die Information der Bevölkerung	38
12	Zusammenfassung	39
13	Literatur	42

# 1 Einleitung

## 1.1 Chemische Eigenschaften und Vorkommen von Uran

Uran ist ein in den Gesteinen der Erdkruste natürlich vorkommendes Schwermetall mit einer mittleren Konzentration von 2-4 Gramm pro Tonne. Überdurchschnittliche Konzentrationen finden sich z.B. in Graniten (4 g pro Tonne) aber auch in Ton- und Sandsteinen (bis 4,2 g pro Tonne).

Natürliches Uran ist radioaktiv und setzt sich aus den drei Isotopen U-238 (Häufigkeit 99,3 %, Halbwertszeit  $4,5 \times 10^9$  Jahre), U-235 (Häufigkeit 0,7%, Halbwertszeit  $7,0 \times 10^8$  Jahre) und U-234 (Häufigkeit 0,005%, Halbwertszeit  $2,5 \times 10^5$  Jahre) zusammen. Beim radioaktiven Zerfall dieser drei Isotope wird Alpha-Strahlung freigesetzt, zusätzlich entsteht auch in geringem Umfang Gamma-Strahlung. U-238 und U-235 bilden jeweils das Anfangsglied einer radioaktiven Zerfallskette, so dass bei Anwesenheit von Uran auch die ebenfalls radioaktiven Tochternuklide (z.B. Ra-226, Rn-222, Pb-210) vorkommen können. Diese Radionuklide werden im vorliegenden Bericht jedoch nicht betrachtet.

Bis vor wenigen Jahren stufte man die Radiotoxizität von Uran höher ein als seine chemische Toxizität. Weitergehende Untersuchungen von Uran ergaben jedoch, dass die chemische Toxizität vordringlich zu betrachten ist.

In der Natur tritt Uran überwiegend in der +4- oder +6-wertigen Form auf. Unter sehr sauren sowie stark reduzierenden Bedingungen ist vierwertiges Uran dominierend. Bei pH-Bedingungen von 4,5-8,5 ist vierwertiges Uran nahezu unlöslich. Sechswertiges Uran ist dagegen sehr gut wasserlöslich, wobei es sehr stabile Komplexe wie z.B.  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  bildet. Maßgeblich für die Wasserlöslichkeit von Uran VI-Verbindungen im pH-Bereich von 6,8-8,5 ist das Vorhandensein von gelöstem Sauerstoff. Unter diesen Bedingungen kann Uran bis zu einigen hundert Mikrogramm/Liter ( $\mu\text{g/l}$ ) im Wasser enthalten sein. Ein vermehrtes Vorkommen von Uran kann aber auch durch organische Liganden (z.B. Huminstoffkolloide) unter Bildung stabiler Komplexe beobachtet werden. Aus diesem Grund sind vielfach erhöhte Urangehalte in anmoorigen Gebieten im Quartär anzutreffen.

Uranlagerstätten können primär oder sekundär entstanden sein. In primären Vererzungen ist die Herkunft des Urans an saure Gesteinsschmelzen gebunden. Daher findet man es bevorzugt in Graniten mit ihren Gangfüllungen bzw. granitischen Gesteinen (z.B. Granitgneisen). In diesen primären Vererzungen liegt Uran im Wesentlichen in vierwertigen, unter normalen Bedingungen in Wasser nur schwerlöslichen Verbindungen vor.

Die sekundären Vorkommen sind exogenen Ursprungs und entstehen durch Verwitterungs- und /oder Umlagerungsprozesse aus primär uranhaltigen Gesteinen bzw. Ablagerungen. In oxidierter sechswertiger Form ist Uran leicht löslich und kann in Lösung transportiert werden.

Durch Reduktion von der 6-wertigen zur 4-wertigen Stufe kann Uran Lösungen wieder entzogen werden (z.B. durch Organismen, kohlige Substanzen, Bitumina und Kohlen). Auch die Adsorption von Uran aus Lösungen ist von großer Bedeu-

tung (Tone, Bentonite) ebenso wie Fällungsprozesse (z.B. durch Phosphate). Dieses so der Lösung entzogene Uran besitzt jedoch die Fähigkeit, durch Änderung seiner Wertigkeit schnell wieder in Lösung zu gehen.

## **1.2 Uranvorkommen in Bayern**

Uranvorkommen sind in Bayern vor allem im Fichtelgebirge und im Bayerischen Wald bekannt. Bereits um 1800 wurden in dort betriebenen Flussspatgruben erstmals Uranpecherze und Uranglimmer aufgefunden. Diese Funde gerieten jedoch z.T. wieder in Vergessenheit (Ziehr 1957). In den 50er und 60er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde in diesen Gebieten bevorzugt auf Uran prospektiert.

Im Rahmen der damaligen bayernweiten Untersuchungen wurde nicht abbauwürdiges Uran in einer ganzen Reihe von anderen Gesteinen unterschiedlichsten Alters nachgewiesen: in der Steinkohle der Rotliegenden, in den triassischen Sandsteinen (vor allem Keuper- und Buntsandstein), in phosphoritführenden Horizonten aus Dogger und Malm sowie tertiären Kohlen. Aufgrund der höheren Urangehalte im Boden konzentrierten sich die Bergwerke, die Uran erkundeten und z.T. auch abbauten, ausschließlich auf das ostbayerische Kristallin.

## **1.3 Urangehalte in Grund- und Trinkwasser im Vergleich zu anderen Wässern**

Deutsche Flüsse weisen im Durchschnitt Urangehalte zwischen 1 und 3 µg/l auf. Die Quelle für das Uran liegt dabei vorrangig im geogenen Aufbau der Gebiete, durch welche die Flüsse verlaufen, in eingeschwemmten uranhaltigen Phosphatdüngern und in speziellen Fällen auch im Uranbergbau (Zwickauer Mulde: ca. 10 µg/l). Meerwasser enthält aufgrund der Mobilität der Uranverbindungen und deren Anreicherung Urankonzentrationen von ca. 3 µg/l (BfR 2007, Maucher 1962).

Aufgrund der ubiquitären Verbreitung von Uran aber auch der sonstigen natürlichen Radionuklide und deren Zerfallsprodukten in der Erdkruste finden sich in allen Grund- und Trinkwässern Spuren von radioaktiven Stoffen. Die Art und Menge der natürlichen Radionuklide im Grund- und Trinkwasser wird hierbei überwiegend von der radiochemischen Beschaffenheit des durchströmten Bodens und der wasserführenden Gesteinsschichten sowie von der chemischen Zusammensetzung des Wassers bestimmt.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand findet sich Uran in Deutschland in unbeeinflusstem Grundwasser in Konzentrationen von weniger als 1 µg bis über 100 µg pro Liter.

## 2 Geologie

### 2.1 Die hydrogeologischen Räume Bayerns

Der geologische Untergrund Bayerns ist von großer stratigraphischer und genetischer Vielfalt. Die Geologische Karte 1: 500 000 des (vormaligen) Geologischen Landesamtes (aktuelle Ausgabe von 1996) lässt die Komplexität im Detail erahnen. Es finden sich Gesteine aller erdgeschichtlichen Epochen (vom Präkambrium bis zur Neuzeit) und der unterschiedlichsten Entstehung in Form von sedimentären, magmatischen und metamorphen Gesteinen.

Vereinfacht lässt sich die Geologie Bayerns in 4 Teilbereiche gliedern:

- Das kristalline Grundgebirge: Der Grundgebirgsbereich Ostbayerns (Bayerischer Wald, Oberpfälzer Wald, Fichtelgebirge und Frankenwald) und Nordwestbayerns im Spessart und Odenwald, wo das Grundgebirge im Spessart in Hebungsbereichen am Rande des Rheintalgrabens angeschnitten ist. Das kristalline Grundgebirge bildet aber auch den Untergrund der sonstigen Landesfläche, hier wird es jedoch von jüngeren Schichten überlagert. Es sind die weiteren 3 Teilbereiche:
- Das Deckgebirge nördlich der Donau
- Das Molassebecken zwischen Donau und Alpenrand
- Die Alpen im Süden

Für angewandte **hydrogeologische Fragestellungen** im Übersichtsmaßstab hat es sich bewährt, die Geologie des Untergrundes generalisierend und stark vereinfachend nach den Bedürfnissen der wasserwirtschaftlichen Aspekte in Hydrogeologische Räume zu untergliedern, die einerseits nach stratigraphisch-geologischen Kriterien gegeneinander abgegrenzt werden können, andererseits nach übergeordneten Kriterien wie Grundwasserneubildung, Grundwasserfließverhältnissen in den (vorwiegend in den jeweiligen Grundwasserlandschaften ausgebildeten) Grundwasserleitern (= Poren-, Kluft-, Karstgrundwasserleiter) und Grundwasserbeschaffenheit charakterisiert werden können.

Elf Hydrogeologische Räume (HG) können auf diese Weise beschrieben werden (s.a. Abb. 1):

1. Alpiner Raum: Der bayerische Anteil der Alpen mit überwiegend Kalkalpin (v.a. Wettersteinkalk und Hauptdolomit) und mit vorgelagertem Flysch und Helvetikum (v.a. tonig-sandige Gesteine, in den Tälern auch Sande und Kiese). Es sind überwiegend Kluft- und Karstgrundwasserleiter (Festgestein) ausgebildet, in den Tälern auch Porengrundwasserleiter (Lockergestein).
2. Voralpiner Moränengürtel: vor allem eiszeitliche Kiese, blockreiche Geschiebemergel, Seetone, Porengrundwasserleiter.

3. Schotterflächen und Flusstalfüllungen eiszeitliche und nacheiszeitliche Schotterfluren mit mächtigen Sand- und Kiesablagerungen, Porengrundwasserleiter.
4. Tertiärhügelland: Tone, Sande und Kiese in Wechsellagerung, Porengrundwasserleiter
5. Schwäbisch-Fränkischer Jura: Schwarze Tone im Lias, braune Sandsteine im Dogger (Kluftgrundwasserleiter) und helle (weiße) Riffkalke und Riffdolomite mit dazwischen abgelagerten Plattenkalken im Malm (Karstgrundwasserleiter).
6. Fränkischer Sandsteinkeuper: Sandsteine mit zwischengeschalteten Tonsteinen, Kluftgrundwasserleiter.
7. Fränkischer Gipskeuper: Wenn nutzbar, dann Kluftgrundwasserleiter in gipsführenden Ton- und Mergelsteinen und geringmächtigen Sandsteinlagen.
8. Mainfränkische Muschelkalkplatten: Kluft-Karst-Grundwasserleiter aus Kalk-, Dolomit- und Mergelgesteinen.
9. Ostbayerisches Trias-Kreide Bruchschollenland: Kluftgrundwasserleiter in vorwiegend Sandsteinen mit zwischengelagerten Ton- und Karbonatgesteinen.
10. Buntsandstein-Spessart: Kluftgrundwasserleiter, vor allem rote Sandsteine
11. Kristallines Grundgebirge: Kristalline Gesteine (Magmatite, Metamorphite): Granite, Gneise, Phyllite, Grauwacken, Marmore: Kluftgrundwasserleiter, im Gesteinszersatz auch Porengrundwasserleiter.

## Hydrogeologische Räume Bayerns

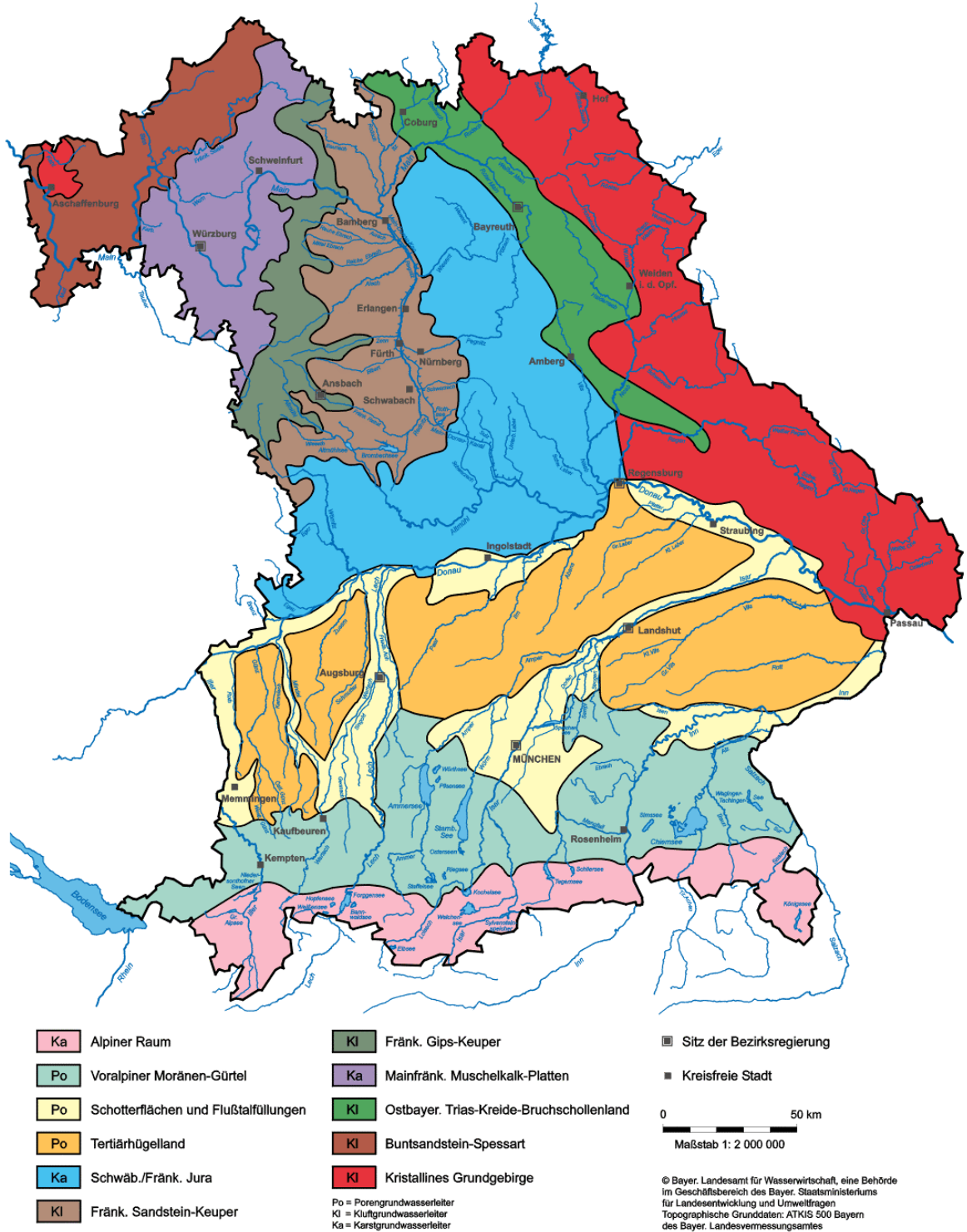


Abb. 1. Hydrogeologische Räume Bayerns: (HG Räume 2 - 4 = Teilbereich „Molasse becken zwischen Donau und Alpenrand“, HG Räume 5 – 10 = Teilbereich „Deckgebirge nördlich der Donau“)

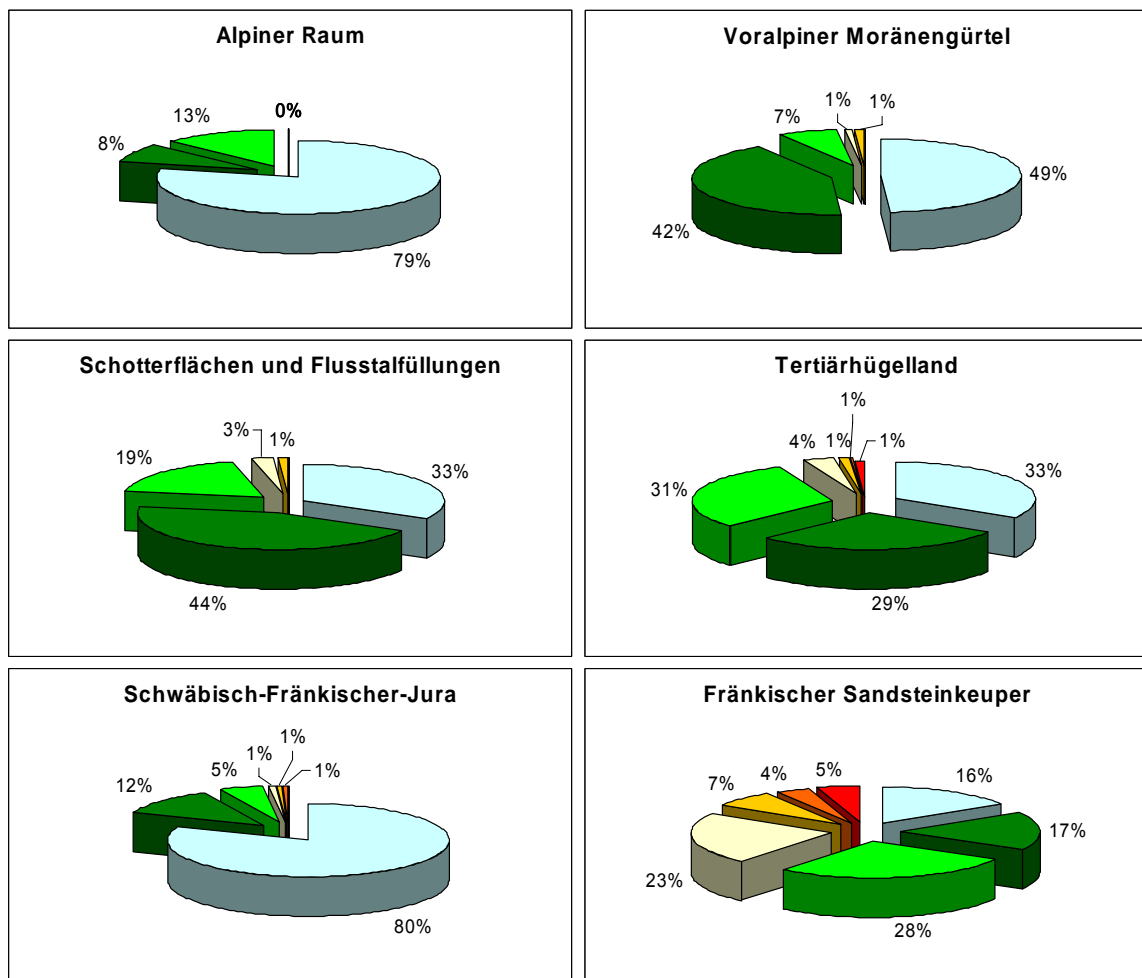


## 2.2 Aufschlüsselung des Uran-Vorkommens in Grund- bzw. Trinkwasser nach geologischer Beschaffenheit des Gewinnungsgebietes

Ursache für die Belastung des Grund- und Trinkwassers in Bayern mit Uran-238 sind natürliche Urangehalte bestimmter geologischer Formationen und deren Verfügbarkeit. Dabei ist für die Situation in Bayern eine Zweiteilung erkennbar:

In Nordbayern sind uranhaltige Gesteine v. a. in den vergleichsweise wasserunlöslichen primären Vererzungen des Kristallinbereichs, wie in den Graniten und Gneisen des Fichtelgebirges und des Bayerischen Waldes, vorhanden. Leicht lösliche umgelagerte Uranverbindungen findet man dagegen in Buntsandsteinformationen und Sedimenten des Unteren und Mittleren Keupers.

In Südbayern dagegen sind, soweit bekannt, v. a. die geologischen Formationen des Tertiär und des Quartär betroffen, in denen Uran häufig organisch gebunden in anmoorigen Gebieten vorliegt. Diese Verhältnisse bestehen z. B. im Erdinger Moos, im Isartal nördlich Landshut oder im Donaumoos. Darüber hinaus werden lokal erhöhte Uranwerte auch im Grundwasser der tertiären Vollschotter der Oberen Süßwassermolasse gefunden.



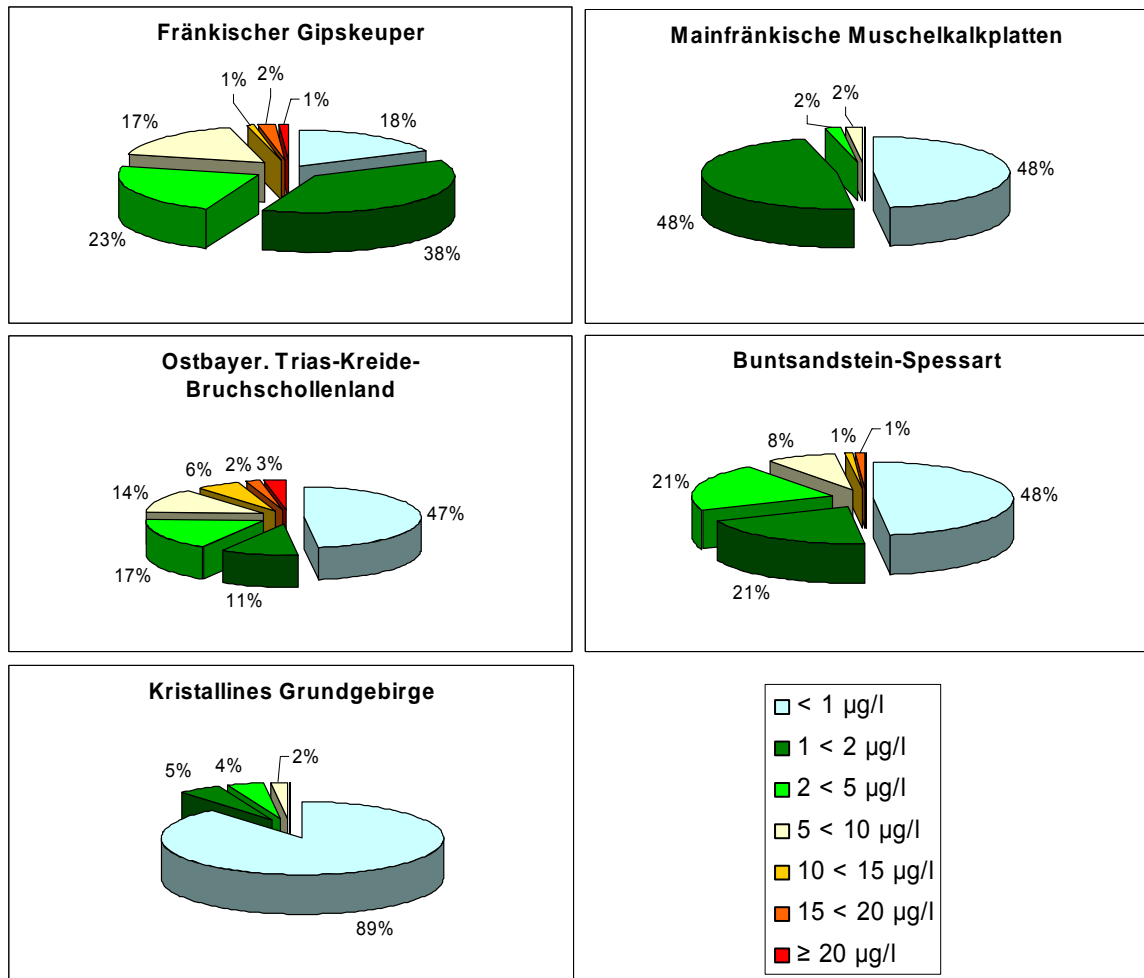


Abb. 2. Prozentuale Verteilung des Urangehaltes im Grund- und Trinkwasser in Abhängigkeit von der geologischen Formation

In Abb. 3 sind die Uranwerte als Messpunkte dargestellt, wobei die Messwerte in übersichtliche, von der Darstellung in Abb. 2 abweichende Größenklassen zusammengefasst wurden. Es zeichnen sich markant Bereiche ab, in denen Uran im Grund- und Trinkwasser mit erhöhten Konzentrationen auftritt. Diese Bereiche sind farbig unterlegt hervorgehoben. Der Vergleich mit der Abbildung 1 zeigt für Nordbayern die deutliche Zuordnung zu den hydrogeologischen Räumen 6, 7, 9 und 10 mit den in diesen hydrogeologischen Räumen abgebildeten stratigraphischen Einheiten, während in Südbayern erhöhte Uranwerte in regional ausgeprägten Schwerpunkten auftreten.

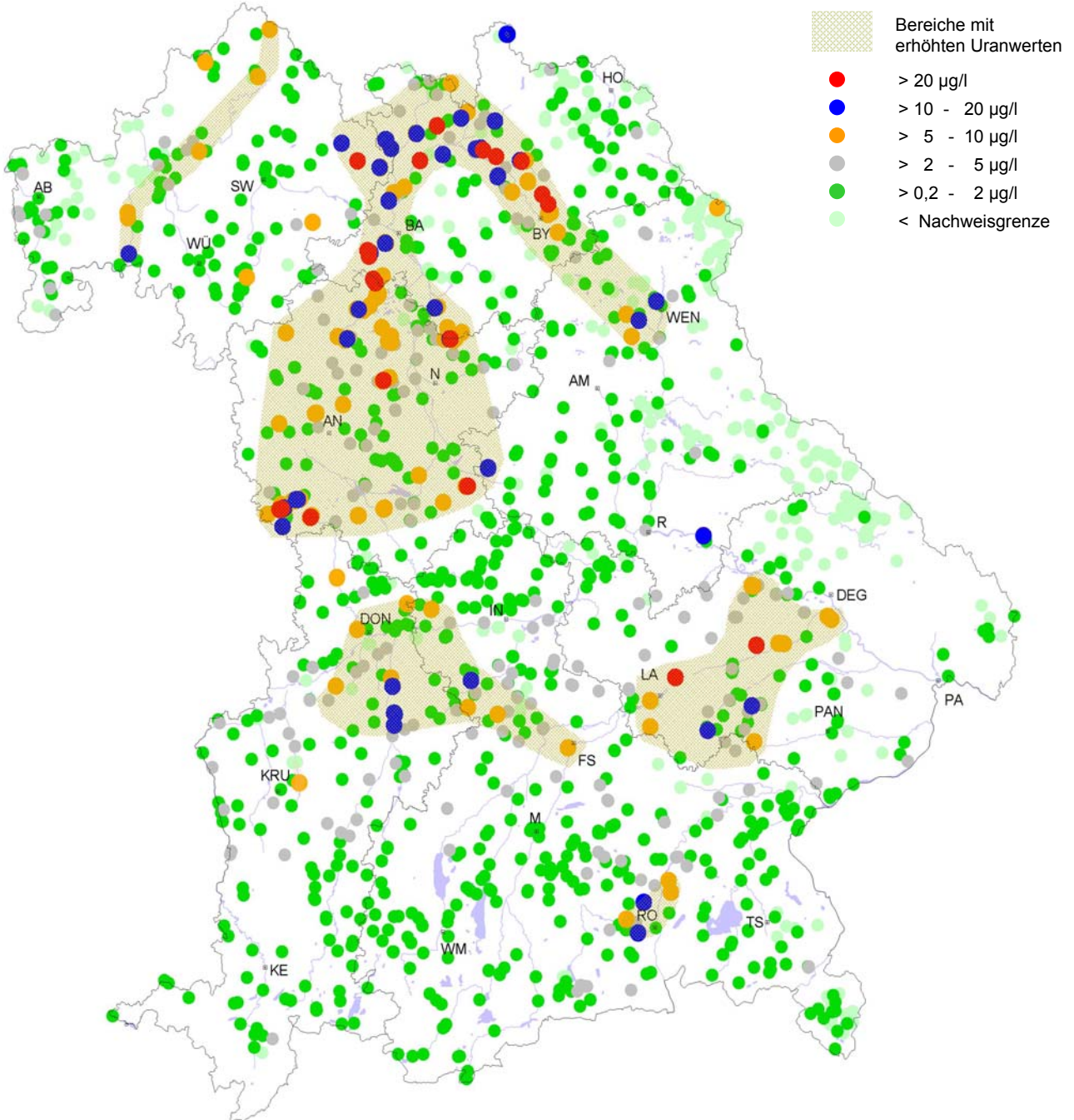


Abb. 3. Natürliche Uranwerte im Grund- und Trinkwasser Bayerns

### 3 Entstehung und Durchführung des Messprogramms „Uran in Grund- und Trinkwasser“

Im Herbst 2000 hat das damalige Landesuntersuchungsamt für das Gesundheitswesen Nordbayern Informationen über einen erhöhten Urangehalt aus einem Brunnen einer Brauerei im Landkreis Roth (Mittelfranken) erhalten. Die Brauerei verwendet das Brunnenwasser unter anderem als „Quellwasser“ im Sinne der Mineral- und Tafelwasser-Verordnung (MTV). Da davon ausgegangen werden konnte, dass es sich hier um keinen Einzelfall handelt und generell wenig Kenntnisse über die Urangehalte in Grund- und Trinkwässern vorlagen, wurde zur Verbesserung der Datenlage in Nordbayern mit einem Uran-Untersuchungsprogramm begonnen. Zur Untersuchung gelangten zunächst Trinkwässer aus großen, zentralen Wasserversorgungen, so wie sie an die Verbraucher abgegeben werden. Dies waren sowohl Wässer, die ohne Aufbereitung direkt vom Gewinnungsort (Brunnen) in das Trinkwassernetz eingespeist wurden, als auch Mischwässer aus mehreren Wasserfassungen. Bei Überschreitung des damals von der Gesundheitsverwaltung festgelegten Leitwerts zur gesundheitlichen Beurteilung (5 µg/l Uran) wurden zusätzlich, sofern vorhanden, auch die Einzelbrunnen der betroffenen Wasserversorgungsunternehmen untersucht.

Das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) ist vom damaligen Bayerischen Staatsministerium für Gesundheit, Ernährung und Verbraucherschutz im Januar 2002 angewiesen worden, das bestehende Untersuchungsprogramm in Absprache mit dem vormaligen Landesamt für Wasserwirtschaft (jetzt LfU) auch auf den südbayerischen Raum auszudehnen. Vornehmliches Ziel dieses „Uran-Sonderuntersuchungsprogramms“ sollte sein, rasch einen landesweiten Überblick über alle Problemgebiete in Bayern zu erhalten (Screening-Programm). Die Probenahmestellen wurden hierbei im Zeitraum 2001–2003 nach hydrogeologischen Gesichtspunkten von der Wasserwirtschaftsverwaltung unter Berücksichtigung der Anzahl des mit Trinkwasser versorgten Personenkreises ausgewählt. Nach diesen Vorgaben wurden von den Gesundheitsämtern die entsprechenden Proben gezogen und am LGL untersucht. Um ein vollständigeres Bild zu erhalten, wurden in einem zweiten Untersuchungsschritt im Zeitraum 2004–2006 in Bereichen, in denen aufgrund der geologischen Beschaffenheit eine erhöhte Uranbelastung des Trinkwassers vorhanden oder zu erwarten war („hot spots“), verstärkt Proben entnommen. Bei dieser zweiten Untersuchungsserie konnten keine weiteren signifikanten Belastungsschwerpunkte mit Uran festgestellt werden.

Zur Auswahl der Probenahmestellen wurden folgende Kriterien herangezogen:

- Größere Trinkwassererschließungen (ab ca. 10l/sec. oder 3.000 Einw.)
- Anlagen, die keine unterschiedlichen Grundwasserleiter erschließen
- Anlagen mit bereits bekannten Problemen mit anderen Schwermetallen
- Trinkwassergewinnungsanlagen, in deren Einzugsbereich sich Moore befinden
- Anlagen mit bekannten anorganischen Anreicherungen im Aquifer, die auf ein Uranvorkommen hindeuten

Für Bayern ergaben sich dabei folgende Untersuchungsschwerpunkte:

- (Sandstein-)Keuper (Mittel- und Oberfranken)
- Tertiärgestein (Landshut, Ingolstadt, Aichach, Günzburg, Dillingen)
- Gebiete mit Fluss-Sedimenten (Iller, Günz, Mindel)
- Anmoorige Gebiete (Mobilisierung von Uran durch Huminstoffe)

Untersuchungen wurden verstärkt an (Tief-)Brunnenwässern durchgeführt, da sekundäre Uranvorkommen besonders in tieferen Sedimentationsschichten zu vermuten waren. Im Verlauf des Messprogramms zeigte sich, dass Uran auch oberflächennah in anmoorigen Gebieten vorkommen kann. Ferner wurden stichprobenartig Trinkwasserproben aus Quellen sowie aus Ortsnetzen zur Untersuchung auf Uran vorgelegt. Einzelwasserversorgungsanlagen wurden nur in Ausnahmefällen beprobt. Sie sind zwar zahlenmäßig häufiger in Bayern vertreten (über 35.000) als zentrale Wassergewinnungsanlagen (ca. 3.400), versorgen aber im Gegensatz zu diesen nur einen kleinen Teil der Bevölkerung.

#### **4 Untersuchungsmethode und Untersuchungsumfang**

Über das gesamte Uran-Messprogramm hinweg wurden insgesamt 3.560 Grund- und Trinkwasserproben vom LGL sowie dem früheren Geologischen Landesamt und dem Landesamt für Wasserwirtschaft (jetzt LfU) untersucht. Die Proben wurden hierbei unmittelbar nach der Probenahme mit HNO<sub>3</sub> angesäuert (3 ml verdünnte Salpetersäure\* pro Liter Wasser). Aus der so vorbereiteten Probe konnte das Uran-Isotop 238 ohne weitere Aufarbeitungs- oder Anreicherungsverfahren mit Hilfe der Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (sog. ICP-MS), als derzeit empfindlichste Messmethode, bestimmt werden. Dabei wurde Lutetium-175 als interner Standard zugesetzt.

Die Quantifizierung der Messwerte erfolgte mit Hilfe einer externen Kalibrierung. Die Bestimmungsgrenze der angewandten Methode lag bei 0,1 µg/l Uran. Die Wiederfindung des angewandten Untersuchungsverfahrens ist mit 100 % anzusetzen. Zur Absicherung auffälliger Untersuchungsergebnisse wurde stets eine Zweitprobe entnommen und mit untersucht.

Neben Uran wurden bei jeder Probe noch die Elemente Arsen, Blei, Eisen und Mangan mitgemessen. Die Messergebnisse dieser Elemente werden in diesem Bericht jedoch nicht diskutiert, da deren Gehalte keinen unmittelbaren Zusammenhang mit den ermittelten Uranwerten zeigen.

\*1 Volumenteil Salpetersäure, konz., 65%ig, p.A. + 1 Volumenteil demineralisiertes bzw. entionisiertes Wasser (p.A.: Abkürzung für „pro analysi“ = Reinheitsangabe „zur Analyse“)

## 5 Messergebnisse und Auswertung der Daten

### 5.1 Messwerteverteilung in den bayerischen Regierungsbezirken

Insgesamt wurden bayernweit über 3.500 Messungen an rund 3.200 unterschiedlichen Entnahmestellen auf Uran durchgeführt. Aus allen Messergebnissen errechnet sich ein durchschnittlicher Uranwert von 2,2 µg/l. Das Wertespektrum liegt dabei im Bereich zwischen < 0,1 µg/l und 75 µg/l. Knapp 73 % aller Messwerte liegen unterhalb von 2 µg/l.

Bei den festgestellten Urangelhalten sind signifikante regionale Unterschiede festzustellen. Die mittleren Analysewerte in den Regierungsbezirken Schwaben, Oberbayern, Niederbayern und in der Oberpfalz liegen unter dem Landesdurchschnitt, während die mittleren Analysewerte in den Regierungsbezirken Ober-, Mittel- und Unterfranken deutlich höher liegen. So wurden in Ober-, Mittel- und Unterfranken insgesamt 187 Proben mit Urangelhalten über 10 µg/l gemessen. Das entspricht bei einer Gesamtprobenzahl von 1.738 Proben somit fast 11 %. In Ober- und Niederbayern sowie in Schwaben und der Oberpfalz lagen die Urangelhalte bei lediglich 21 Proben oberhalb von 10 µg/l. Bei einer Gesamtprobenzahl von 1.822 sind das knapp über 1% der vorgelegten Proben.

Regierungs- Bezirke	Messbereich [µg/l]						Mittelwert [µg/l]
	< 2	2 < 5	5 < 10	10 < 15	15 < 20	≥ 20	
Oberfranken (OFR)	60,5	16	11	6,5	3	3	3,67
Mittelfranken (MFR)	45,5	27	20,5	3,5	0,5	3	3,88
Unterfranken (UFR)	74,5	15	5,5	1,5	2	1,5	2,70
Schwaben (SCHW)	76	19	3,5	1,5	-	-	1,6
Oberbayern (OBB)	82	15,5	1,5	0,5	0,5	-	1,4
Niederbayern (NDB)	77	17	4,5	0,5	0,5	0,5	1,53
Oberpfalz (OPF)	88,5	5,5	4	1	1	-	0,93

Tabelle 1: Prozentuale Messwertverteilung aller untersuchten Grund- und Trinkwasserproben in den einzelnen Regierungsbezirken

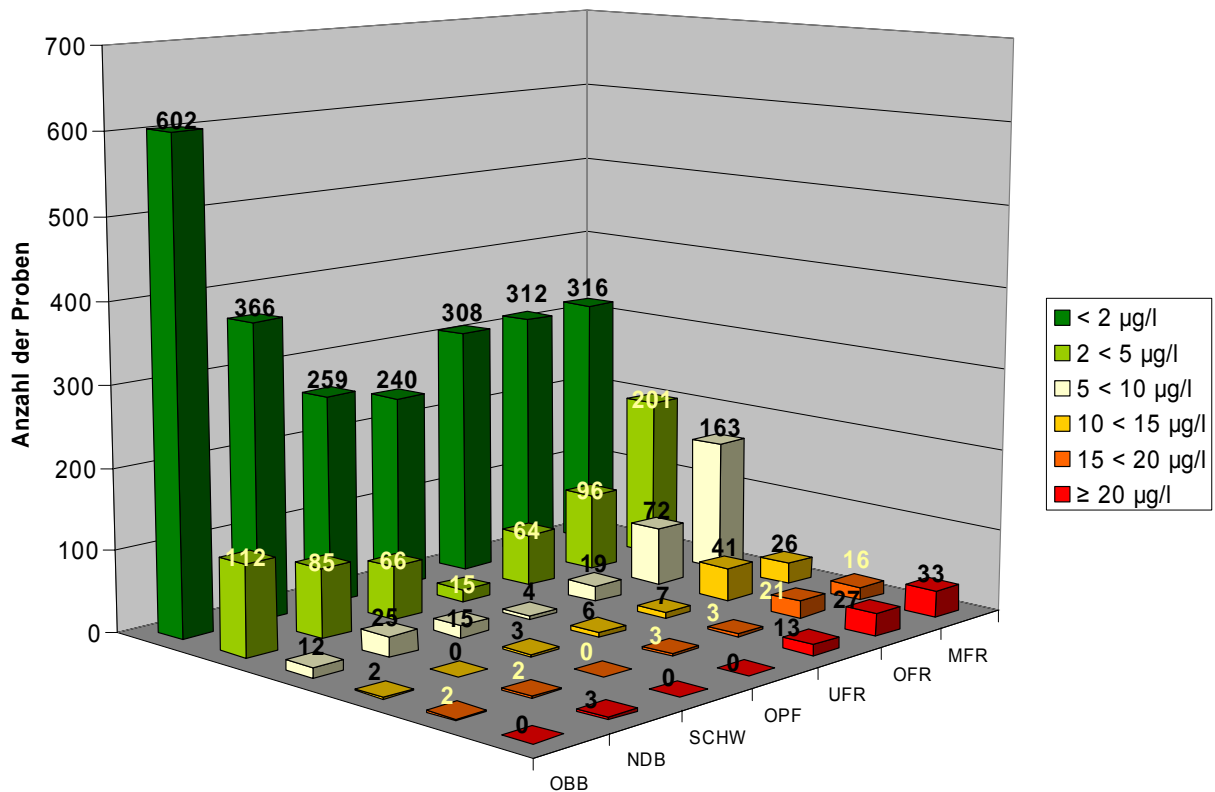


Abb. 4. Gesamtübersicht der Urangelhalte in Grund- und Trinkwasser (Gesamtprobenzahl: 3.560)

Die Auswertung der Analysendaten wurde dabei sowohl vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU; vormals Landesamt für Wasserwirtschaft, LfW) als auch vom Bayerischen Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL; vormals Landesuntersuchungsamt für das Gesundheitswesen, LUA) durchgeführt. Die Ansätze beider Ämter unterschieden sich dabei lediglich in ihrer Zielsetzung: Während sich das LfU bei seiner Datenauswertung auf die hydrogeologischen Verhältnisse der verschiedenen Trinkwasser-Gewinnungsanlagen fokussierte, richtete sich das Interesse des LGL nach der Art der Trinkwasser-Gewinnungsanlage (Flachbrunnen oder Tiefbrunnen; Quelle oder Grundwasser; Mischwasser einer Wasserversorgungsanlage (WVA) oder Einzelwasserversorgung), aus der das Wasser stammte (s.a. Kapitel: 5.3 und 5.4).

Ein Vergleich zwischen den LfU- und LGL-Werten zeigte hierbei übereinstimmende analytische Ergebnisse. So wiesen die Messwerte aus den fränkischen Regierungsbezirken des LfU-Ansatzes ähnlich häufig erhöhte Urangelhalte auf wie es in den vom LGL erhobenen Daten der Fall war. In ähnlichem Maße zeigten die Daten aus dem ober- und niederbayerischen Raum, der Oberpfalz und Schwabens von LfU wie vom LGL vergleichbar wenige Extremwerte an Uran und eine insgesamt geringere Uranbelastung als die Proben aus dem fränkischen Raum.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Untersuchungsergebnisse aus den einzelnen Regierungsbezirken dargestellt.

### Mittelfranken

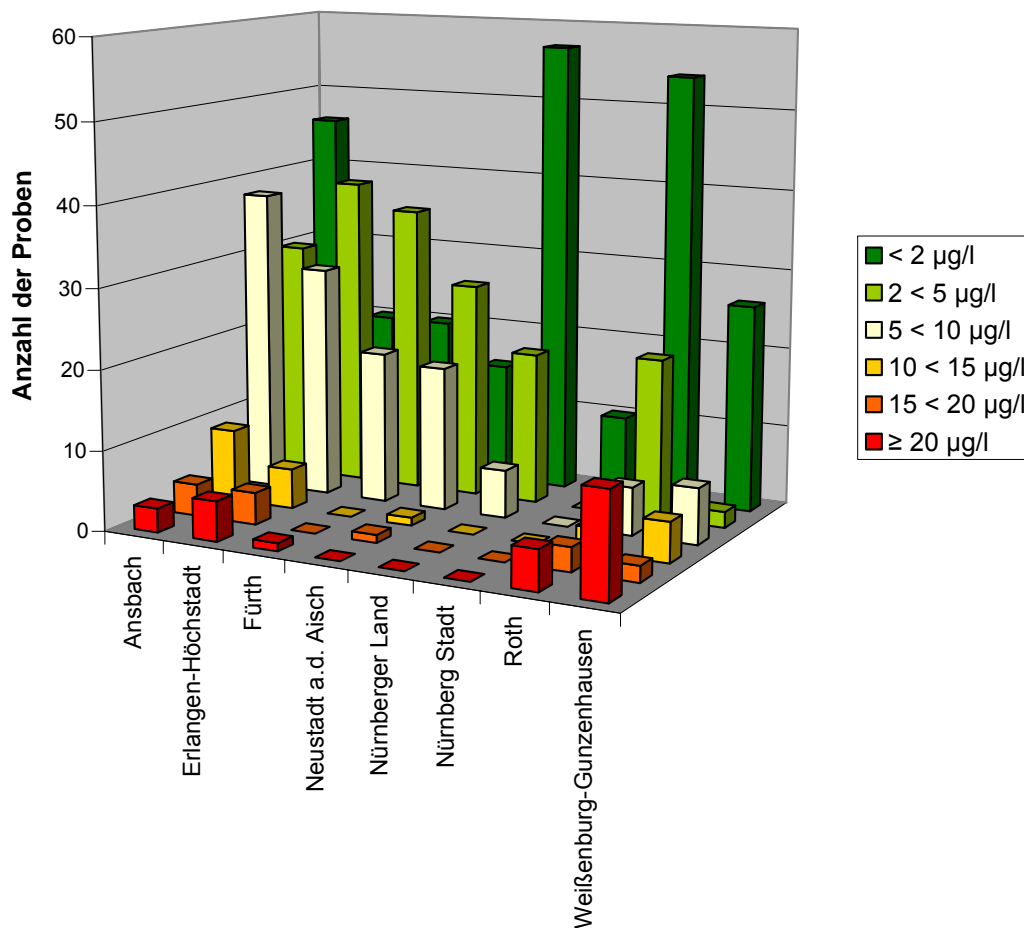


Abb. 5. Messwerte aus Mittelfranken



## Oberfranken

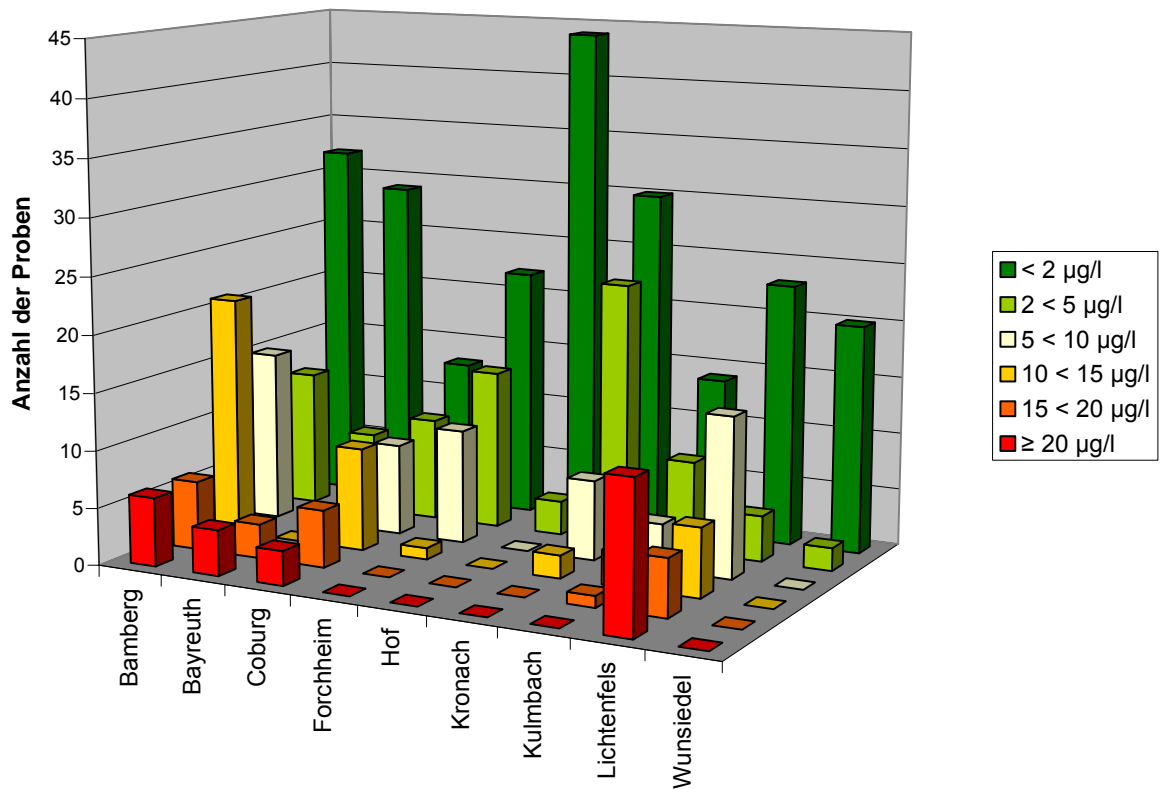


Abb. 6. Messwerte aus Oberfranken

## Unterfranken

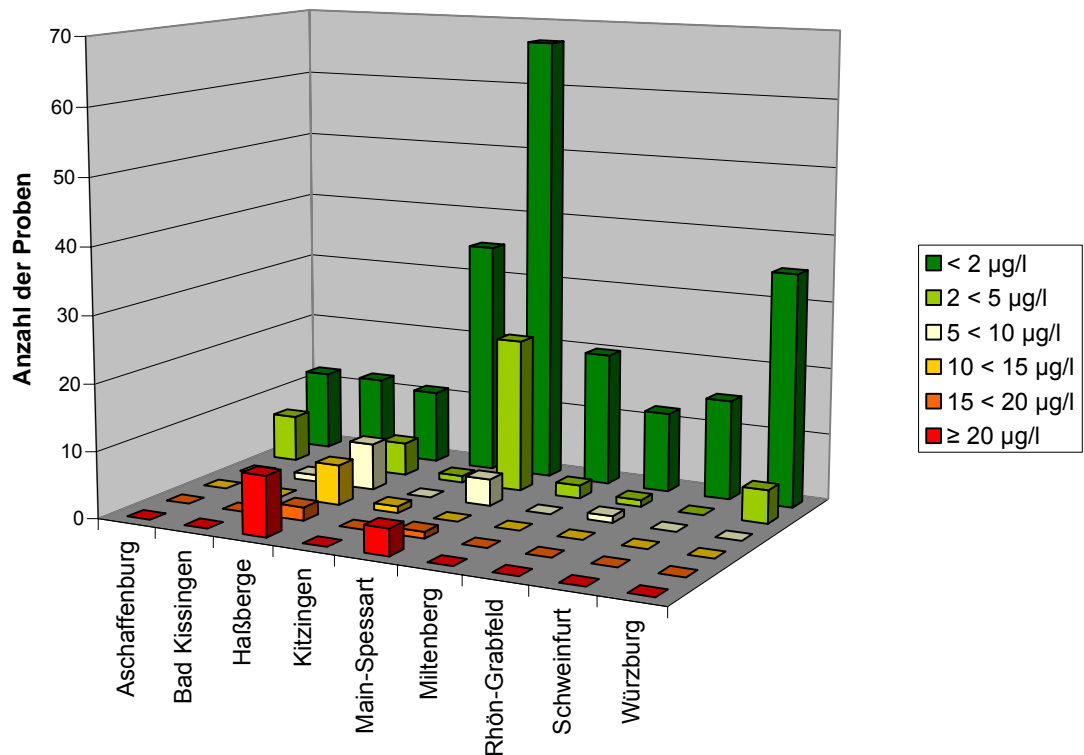


Abb. 7. Messwerte aus Unterfranken

## Oberpfalz

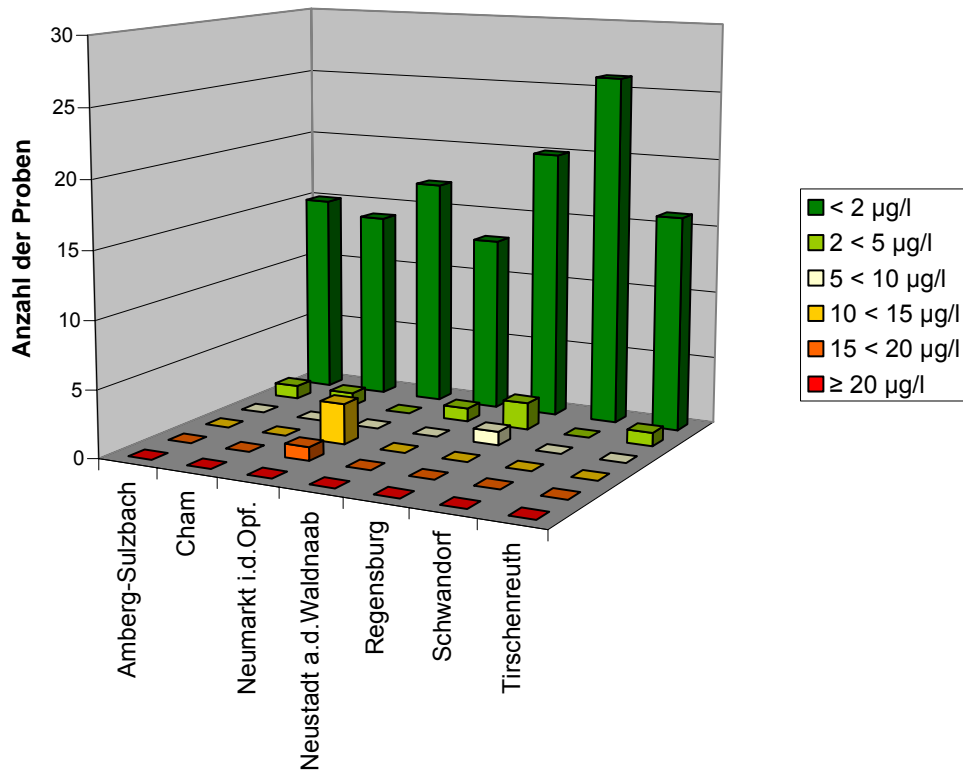


Abb. 8. Messwerte aus Oberpfalz

## Schwaben

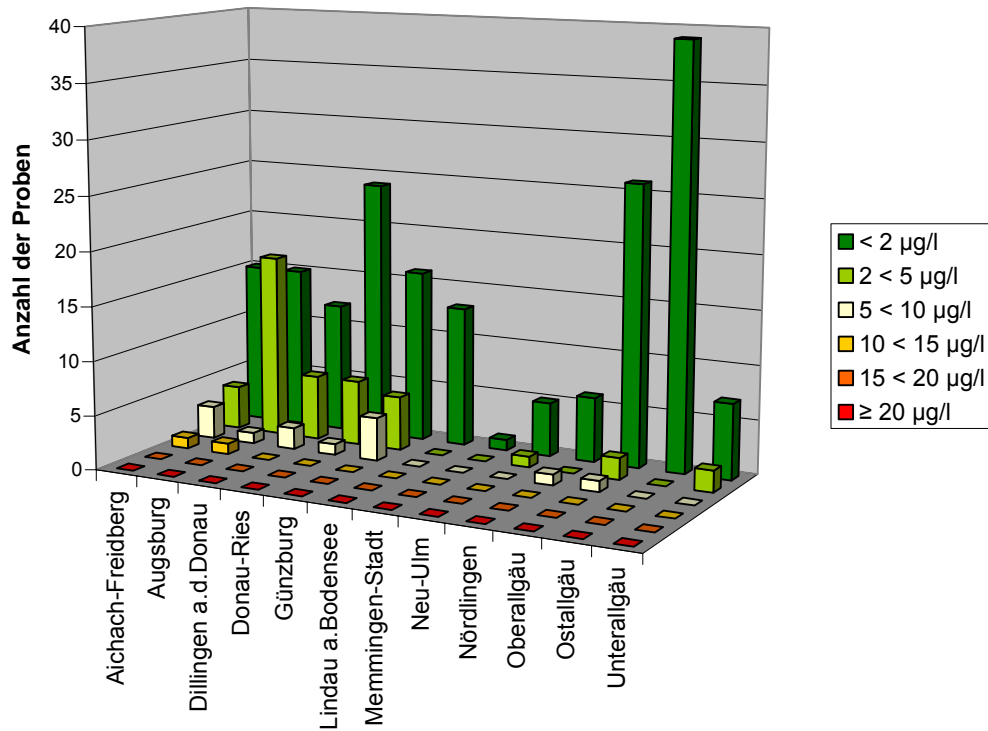


Abb. 9. Messwerte aus Schwaben

## Niederbayern

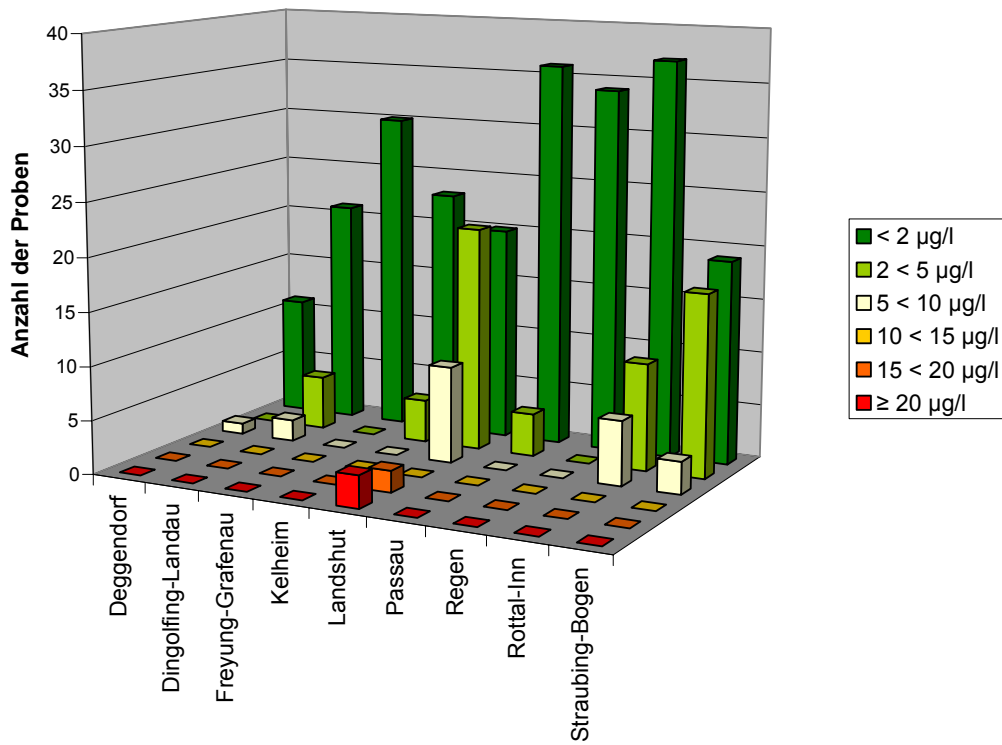


Abb. 10. Messwerte aus Niederbayern

## Oberbayern

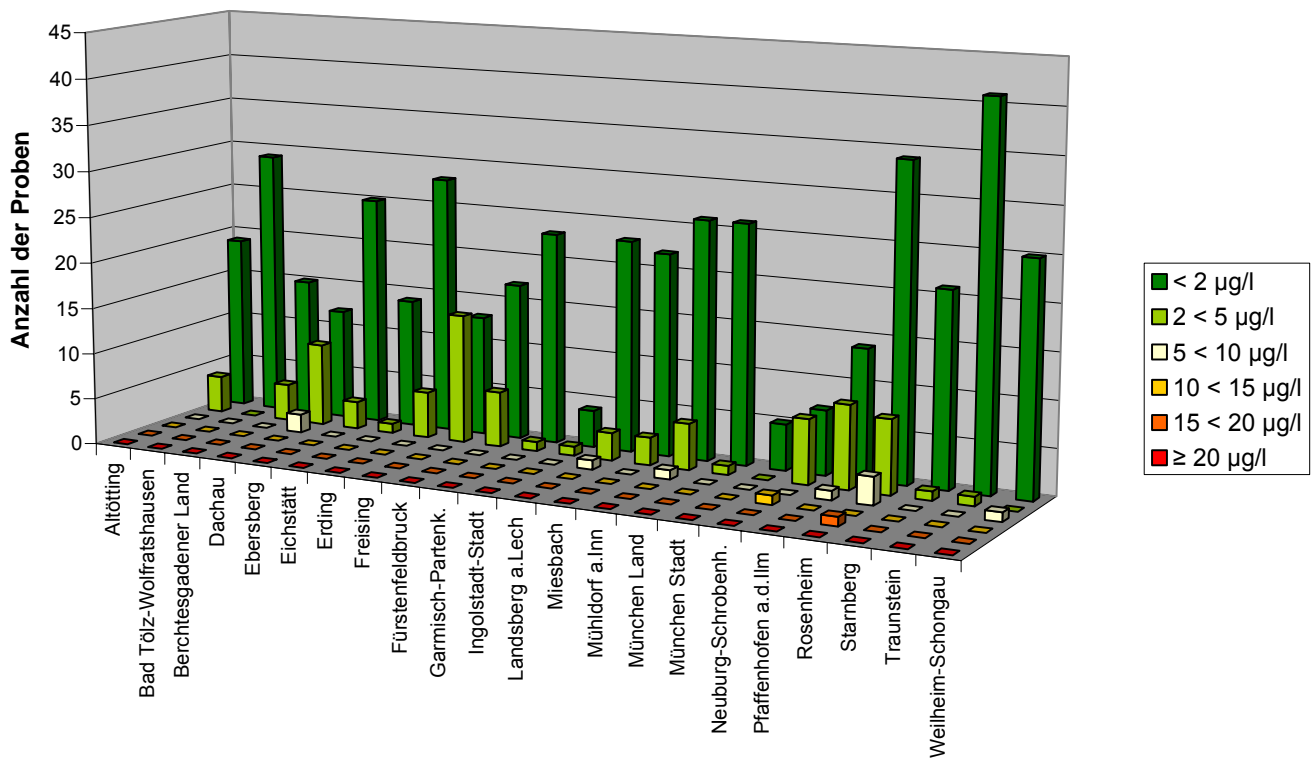


Abb. 11. Messwerte aus Oberbayern

## 5.2 Zum Uran-Untersuchungsprogramm des LGL

Am LGL wurden in zwei zeitlich aufeinander folgenden Untersuchungsreihen die Urangelhalte von Grund- und Trinkwasserproben über den gesamten bayerischen Raum bestimmt. Zwischen 2001 und 2003 sollten in einem Screening-Programm zuerst Daten erhoben werden, die einen Überblick über die generelle Uranbelastung und so genannte „hot spots“, d.h. Bereiche mit erhöhten Uranbelastungen, in Grund- und Trinkwasser zeigen sollten. Im nachfolgenden Untersuchungsprogramm von 2004 und 2006 wurden jene Stellen beprobt, an denen mit erhöhten Urangelhalten zu rechnen war (Kap. 3).

Der detailliertere Vergleich zwischen den beiden Untersuchungsserien zeigt hierbei ein ähnliches Bild. Den Ergebniswerten zufolge sind die Wasserproben des fränkischen Raums häufiger mit erhöhten Urangelhalten belastet als im Süden Bayerns (siehe Tabelle 2 und 3).

	Anzahl der Proben mit Werten $\geq 10 \mu\text{g/l}$	Gesamt- Probenzahl	Prozentualer Anteil
Mittelfranken (MFR)	33	273	12,1
Oberfranken (OFR)	39	199	20,0
Unterfranken (UFR)	11	156	7,1
<b>MFR+OFR+UFR</b>	<b>83</b>	<b>628</b>	<b>13,2</b>
Oberpfalz (OPF)	4	90	4,4
Schwaben (SCHW)	2	83	2,4
Niederbayern (NDB)	5	128	3,9
Oberbayern (OBB)	1	184	0,5
<b>OPF+SCHW+NDB+OBB</b>	<b>12</b>	<b>485</b>	<b>2,5</b>

Tabelle 2: Uran-Screening-Programm (2001 – 2003)

	Anzahl der Proben mit Werten $\geq 10 \mu\text{g/l}$	Gesamt- Probenzahl	Prozentualer Anteil
Mittelfranken (MFR)	27	331	8,2
Oberfranken (OFR)	37	245	15,1
Unterfranken (UFR)	12	143	8,4
<b>MFR+OFR+UFR</b>	<b>76</b>	<b>719</b>	<b>10,6</b>
Oberpfalz (OPF)	0	42	-
Schwaben (SCHW)	0	154	-
Niederbayern (NDB)	0	190	-
Oberbayern (OBB)	1	356	0,3
<b>OPF+SCHW+NDB+OBB</b>	<b>1</b>	<b>742</b>	<b>0,1</b>

Tabelle 3: Nachfolgendes Uran-Untersuchungsprogramm (2004-2006)

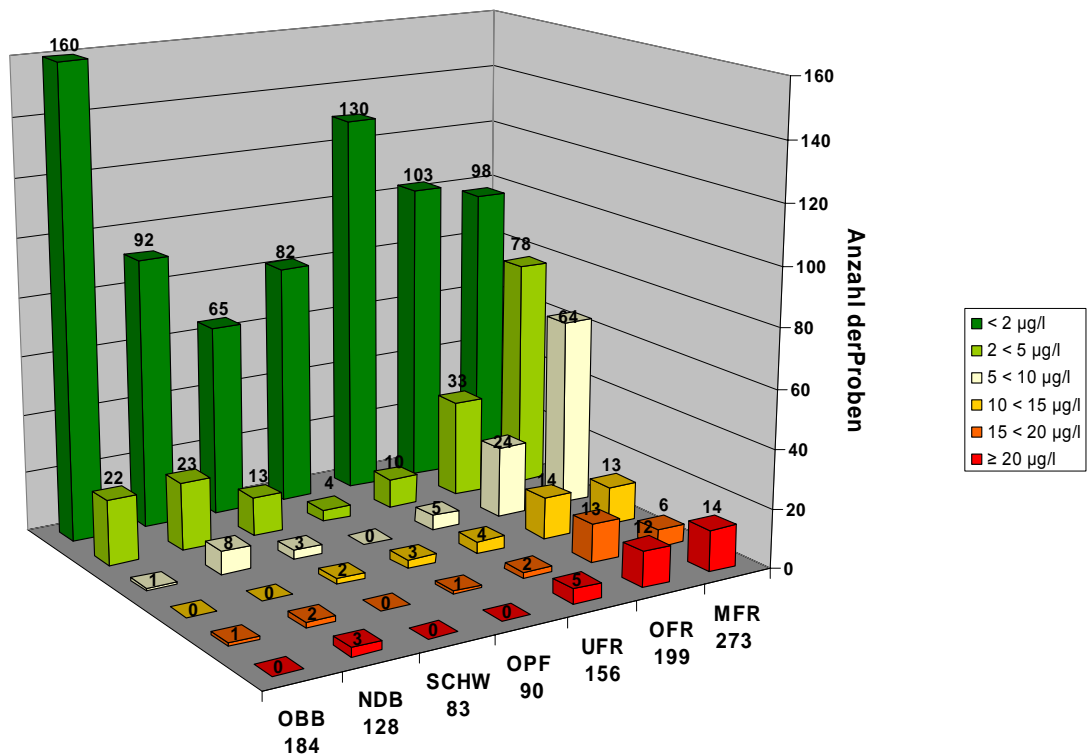


Abb. 12. Uran-Screening-Programm (2001-2003) – Übersicht über die Regierungsbezirke mit Gesamtprobenzahl

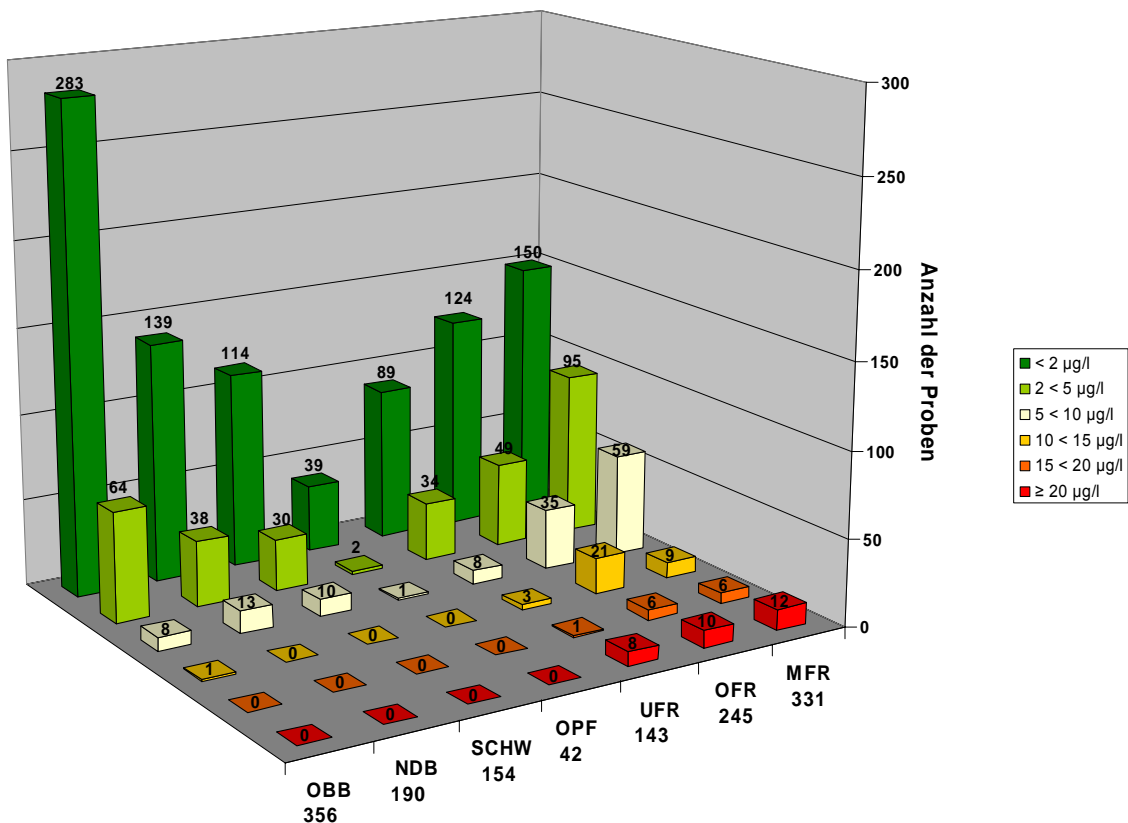


Abb. 13. Nachfolgendes Uran-Untersuchungsprogramm (2004-2006) – Übersicht über die Regierungsbezirke mit Gesamtprobenzahl

### 5.3 Messwertverteilung nach untersuchten Wasserarten

Bei den Probenahmen im Uran-Screening-Programm war die Bandbreite an verschiedenen Wasserarten noch breit gestreut. So wurde hier neben nicht aufbereitetem Grundwasser häufig auch Mischwasser (aufbereitet und nicht aufbereitet) vorgelegt. Im darauf folgenden Uran-Untersuchungsprogramm wurde der Fokus mehr auf Grundwasser (vor allem nicht aufbereitetes Grundwasser) gelegt, das mit fast 60% den Großteil der hier untersuchten Proben ausmachte. Nimmt man aufbereitetes Grundwasser und nicht näher spezifizierte Grundwasserproben hinzu, so sind es fast 70% der insgesamt untersuchten Proben.

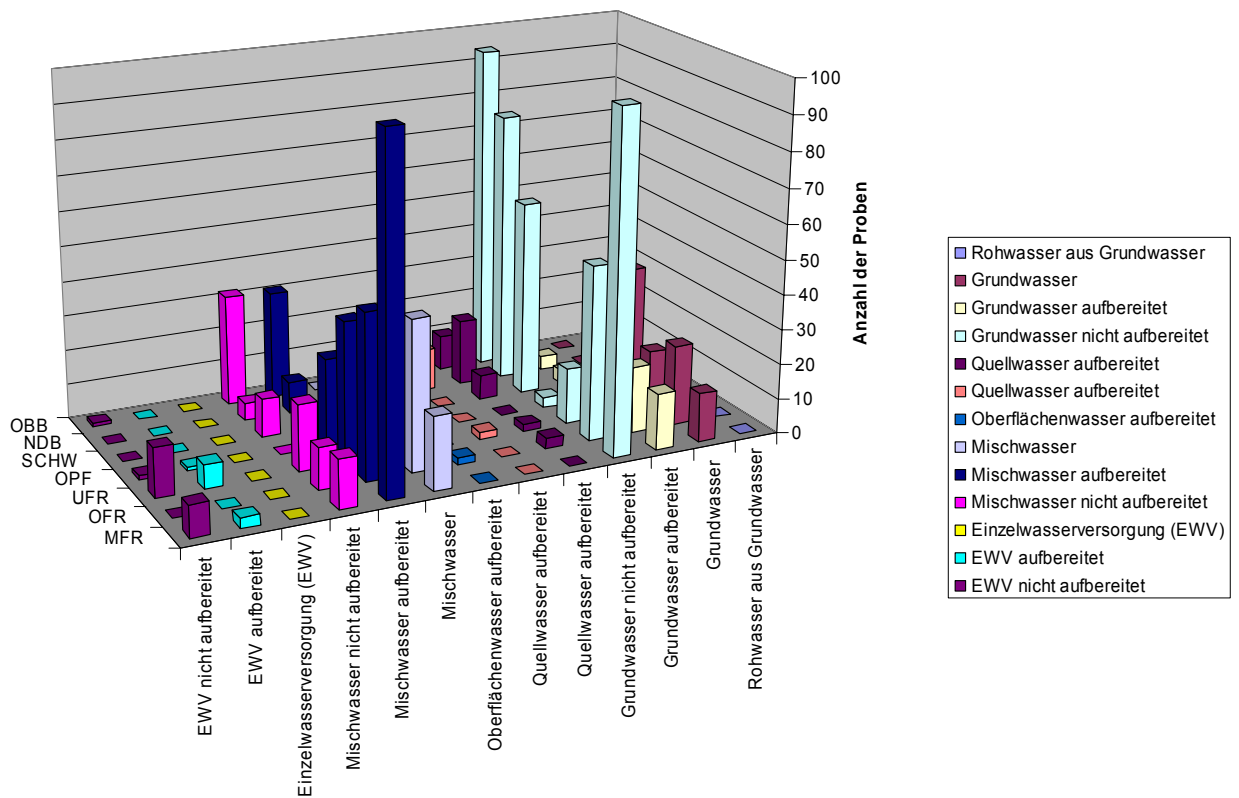


Abb. 14. Untersuchte Wasserarten des Uran-Screening-Programms (2001-2003)

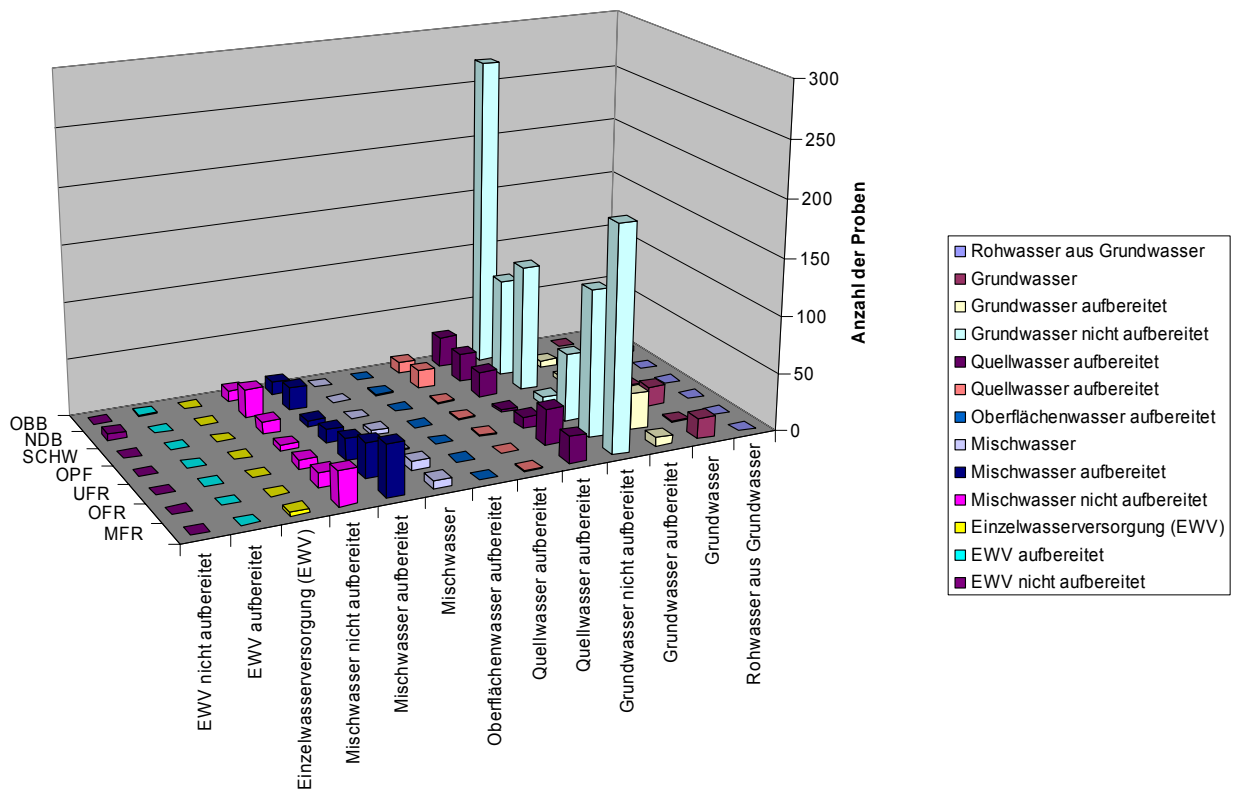


Abb. 15. Untersuchte Wasserarten des nachfolgenden Uran-Untersuchungsprogramms (2004-2006)

Wasserart	%-Anteil im Uran-Screeningprogramm (2001-2003)	%-Anteil im nachfolgenden Uran-Untersuchungsprogramm (2004-2006)
Rohwasser aus Grundwasser	-	0,5
Grundwasser	8,2	2,7
Grundwasser aufbereitet	7,0	7,3
Grundwasser nicht aufbereitet	35,4	58,8
Quellwasser aufbereitet	3,7	9,7
Quellwasser nicht aufbereitet	1,3	2,1
Oberflächenwasser aufbereitet	0,4	0,1
Mischwasser	9,5	1,4
Mischwasser aufbereitet	22,9	9,8
Mischwasser nicht aufbereitet	8,4	7,0
Einzelversorgung (EWW)	-	0,2
EWW aufbereitet	1,0	0,1
EWW nicht aufbereitet	2,2	0,4

Tabelle 4: Prozentuale Anteile der verschiedenen Wasserarten in den beiden Uran- Messprogrammen

Wie aus den folgenden Grafiken hervorgeht, zeigte sich in beiden Messprogrammen ein ähnliches Bild. Die stärkste Belastung mit Uran wiesen hierbei die Grundwasserproben auf. Die verschiedenen Wasserarten stammten aus zentralen Wasserversorgungsanlagen, bei der kleinen Zahl der untersuchten Einzelwasserversorgungen wurden die einzelnen Wasserarten nicht aufgelistet.

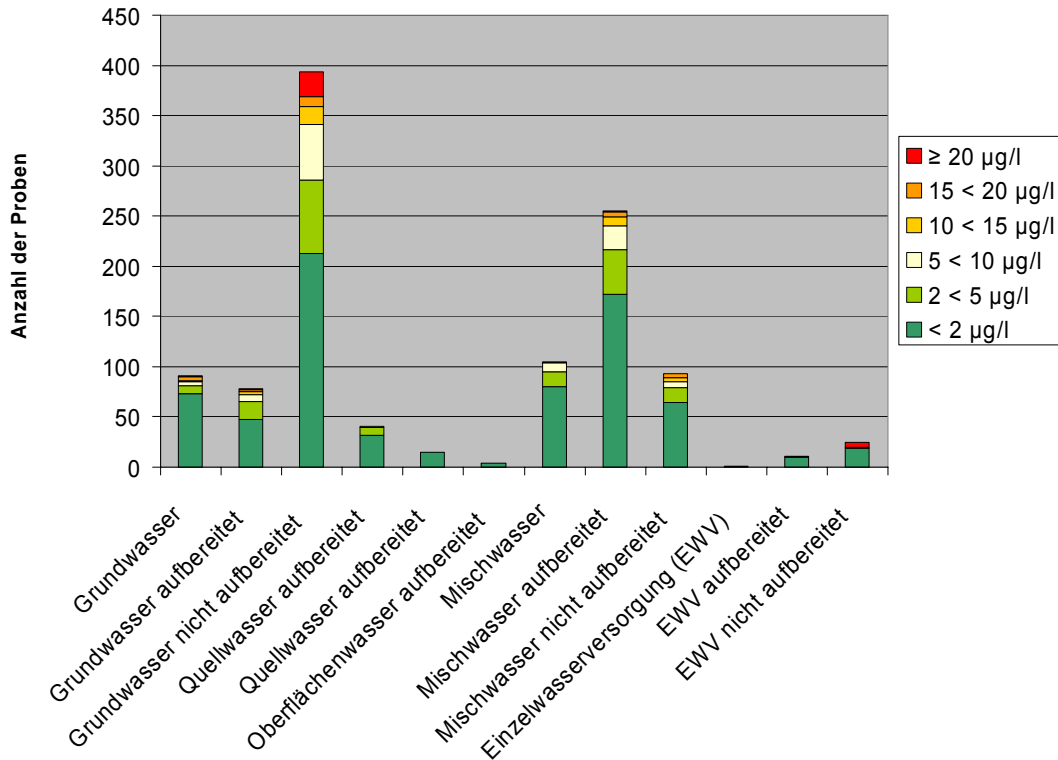


Abb. 16. Uran-Screeningprogramm (2001-2003): Verteilung der Messwerte

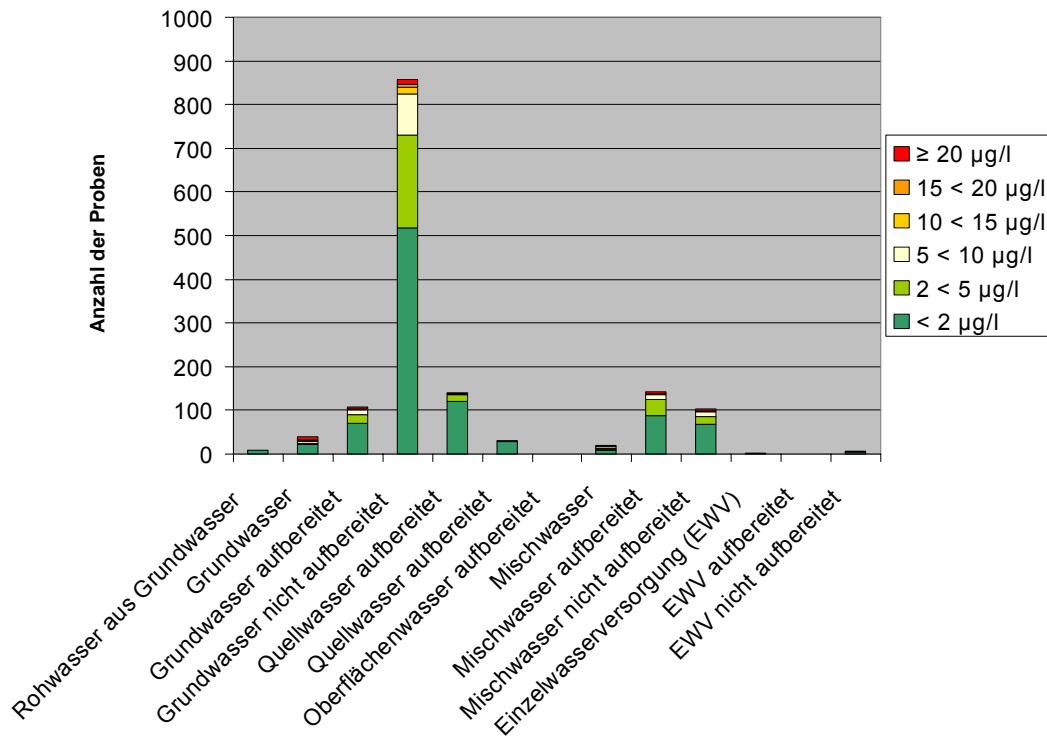


Abb. 17. Nachfolgendes Uran-Untersuchungsprogramm (2004-2006): Verteilung der Messwerte



## 5.4 Gesamtergebnisse bei den einzelnen Wasserarten

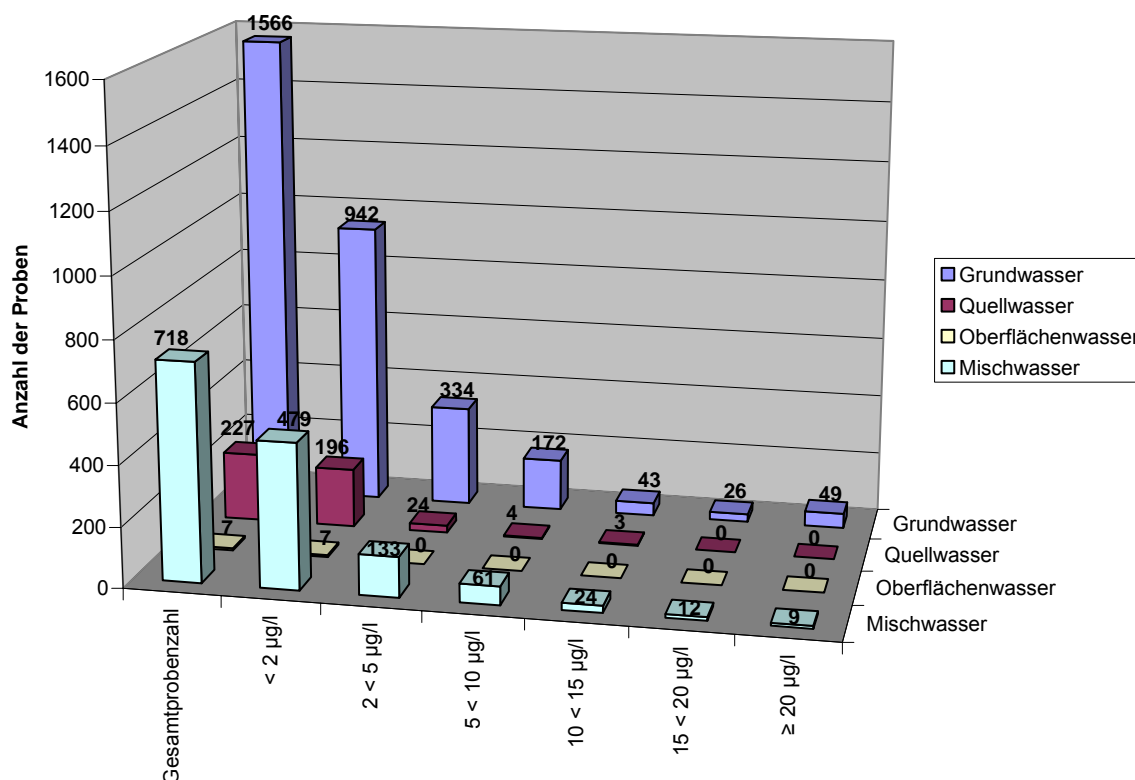


Abb. 18. Mengemäßige Verteilung der Urangehalte bei den einzelnen Wasserarten

### Grundwasser

1.566 Grundwasser-Proben wurden untersucht. 1.276 Proben (81,5%) wiesen dabei Urangehalte unter 5 µg/l auf, bei 241 Proben (15,4 %) waren Gehalte zwischen 5 und 20 µg/l feststellbar und bei 49 Proben (3,2%) lagen die ermittelten Urangehalte oberhalb von 20 µg/l. Der Maximalwert mit 57,0 µg/l wurde in einem Tiefbrunnen im Raum Bamberg festgestellt, gefolgt von einem Brunnen mit einem Urangehalt von 50,0 µg/l im Raum Hassberge.

### Quellwasser

Insgesamt wurden 227 Proben untersucht. 220 davon (96,9%) wiesen Urangehalte unter 5 µg/l auf. 7 Proben (3,1%) waren mit Gehalten zwischen 5 und 20 µg/l zu verzeichnen, wobei bei keiner Probe der Urangehalt über 20 µg/l lag.

Der Grund für die geringe Belastung mit Uran im Vergleich zu anderen Trinkwässern ist darin zu sehen, dass Quellen meist flach gefasst sind und somit uranführende Sedimentschichten nicht oder nur geringen Einfluss darauf haben.

## Oberflächenwasser

Es wurden hier insgesamt nur 7 Proben untersucht. Die Urangelhalte lagen in allen Fällen unterhalb von 2 µg/l.

## Mischwasser

Es wurden insgesamt 718 Proben Mischwasser untersucht. 612 Proben (85,2%) wiesen dabei Urangelhalte unterhalb von 5 µg/l auf, während bei 97 Proben (13,5%) Konzentrationen im Bereich zwischen 5 und 20 µg/l feststellbar waren. Bei 9 Mischwässern (1,3%) lag der Urangelhalt oberhalb von 20 µg/l. Der Aussagegehalt dieser Proben ist jedoch nur begrenzt, da durch das Mischen verschiedener Wasserarten (Grund-, Quell- bzw. Oberflächenwasser) keine genauen Rückschlüsse auf die verursachende geologische Schicht zu ziehen waren. Dennoch konnten auch hier generelle Unterschiede zwischen Wässern aus dem fränkischen Gebiet und jenen aus den restlichen bayerischen Regierungsbezirken gesehen werden.

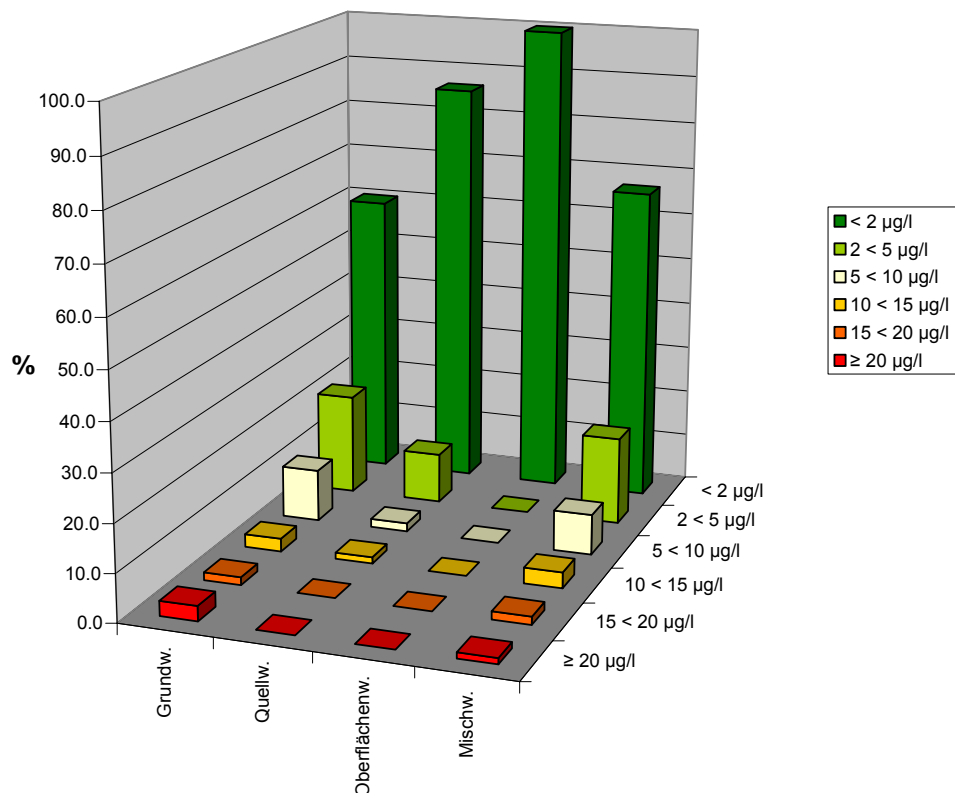


Abb. 19. Prozentuale Verteilung der Urangelhalte bei den einzelnen Wasserarten

## 5.5 Uran im Trinkwasser

### Zentrale Wasserversorgungen

Die meisten Messergebnisse im Forschungsbericht liegen von Brunnen oder Quellen vor (sog. Rohwasserdaten). Dieses Rohwasser wird ggf. aufbereitet oder mit Wasser anderer Erschließungen gemischt, so dass die ursprünglichen Messergebnisse in diesen Fällen nicht repräsentativ für das tatsächlich über das Ortsnetz an die Verbraucher abgegebene Trinkwasser sind.

Um eindeutige Aussagen über das an den Verbraucher abgegebene Trinkwasser treffen zu können, ist eine Probenahme aus Hochbehältern oder aus dem Ortsnetz erforderlich. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Messergebnisse an den einzelnen Entnahmestellen schwanken und dass jeder Messwert eine Momentaufnahme darstellt. Aus einem einzelnen erhöhten Wert kann zwangsläufig nicht auf eine dauerhafte Erhöhung geschlossen werden.

Es liegen insgesamt 704 Trinkwasserproben vor. Bei 638 Proben lag die Urankonzentrationen unter 10 µg/l, bei 51 Proben zwischen 10 und 20 µg/l. 15 Proben wiesen Werte über 20 µg/l auf. Der höchste Messwert lag bei 40 µg/l.

Bei Konzentrationen ab 20 µg/l Uran (Maßnahmewert des Umweltbundesamtes) werden die Wasserversorgungsunternehmen von den Behörden über Abhilfemaßnahmen beraten.

Die Verteilung der Proben auf die einzelnen Regierungsbezirke ist in Abb. 20 dargestellt.

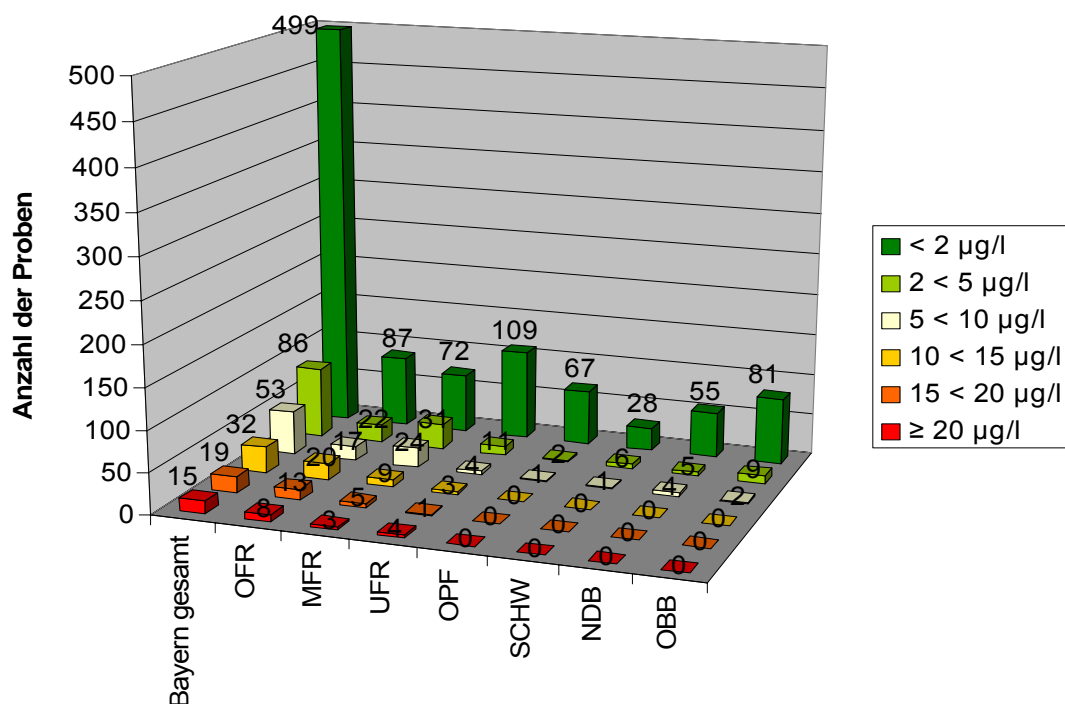


Abb. 20. Anzahl der Trinkwasserproben aus den verschiedenen Regierungsbezirken

## Einzelwasserversorgungen

Im Gegensatz zu ihrem zahlenmäßigen Übergewicht in Bayern (es gibt über 35.000 Einzelwasserversorgungen im Vergleich zu ca. 3.400 zentralen Wassergewinnungsanlagen) wurden lediglich Wasserproben aus 47 Einzelwasserversorgungen überprüft. 39 Proben lagen dabei unterhalb von 5 µg/l Uran. 2 Proben aus diesem Bereich lagen zwischen 5 und 20 µg/l Uran und 6 Proben aus dem nordbayerischen Raum wiesen Werte über 20 µg/l Uran auf. Aufgrund der geringen Gesamtzahl der hier untersuchten Proben lassen sich in dieser Gruppe allerdings keine repräsentativen Aussagen für Bayern ableiten.

## 6 Toxikologische Bewertung

Prinzipiell unterscheidet man zwischen der Schwermetalltoxizität und der Radiotoxizität.

Bei der Ingestion von Uran-haltigem Trinkwasser ist die mögliche Schädigung durch ionisierende Strahlung (Alpha-Zerfall) als deutlich nachrangig gegenüber der rein chemischen Toxizität des Schwermetalls Uran einzustufen. Die Bedeutung einer externen Strahlenexposition durch Uran in der Luft oder im Staub ist relativ gering, weil die Alpha-Strahlung in Luft sowie in der Haut nur eine geringe Reichweite hat.

Bei einer Abschätzung der internen zusätzlichen jährlichen Strahlenexposition für einen Erwachsenen, der täglich 2 Liter Trinkwasser zu sich nimmt, ergeben sich für die angegebenen Urankonzentrationen nachfolgende Werte:

Konzentration von U-238 [µg/l]	Aktivität von U-238 [Bq/l]	Zusätzliche jährliche effektive Dosis[mSv/a]
2	0,025	0,001
5	0,062	0,002
20	0,248	0,008
40	0,495	0,016

Tabelle 5: Jährliche Strahlenexposition eines Erwachsenen durch uranhaltiges Trinkwasser (Aufnahmemenge: 2 l pro Tag) abhängig von der Konzentration an U-238 (ohne Berücksichtigung von U-234)

Im Vergleich zur mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung in der BRD von 2,4 mSv pro Jahr (effektive Dosis) aus allen natürlichen Strahlenquellen ist die Strahlenexposition aus Uran im Trinkwasser sehr gering.

Bislang liegen keine Hinweise aus Tierversuchen oder epidemiologische Studien auf kanzerogene Wirkungen von wasserlöslichen oder unlöslichen Uranverbindungen bei oraler Aufnahme vor (vgl. WHO 2005). Bei der oralen Aufnahme löslicher Uranverbindungen kommt es zur Einlagerung von Uran v. a. in die Nieren und Knochen. Den wesentlichen toxischen Effekt stellt hierbei die Nierenschädigung dar. Uran ähnelt in dieser Hinsicht weitgehend anderen Schwermetallen wie Blei, Cadmium und Quecksilber.

Uran entfaltet seine toxischen Eigenschaften v. a. am proximalen Tubulus. Dort interferiert es mit der Reabsorption von Proteinen. Seine Toxizität ist allerdings geringer ausgeprägt als bei typischen nephrotoxischen Schwermetallen, wie z. B. bei Cadmium oder Blei.

Eine Uran-induzierte renale tubuläre Dysfunktion beim Menschen ist geprägt durch eine milde Proteinurie (durch die bereits o. g. verminderte Reabsorption von Proteinen). Tierversuche weisen darauf hin, dass diese Proteinurie bei Unterbrechung der Uranzufuhr reversibel ist.

In epidemiologischen Studien wurden bei lange andauernder Aufnahme von uranhaltigem Trinkwasser wechselnde Funktionsstörungen der renalen Ausscheidung beobachtet. Die klinische Relevanz ist allerdings schwierig einzuordnen.

Zwischen Februar und September 2001 wurden in South Carolina 948 öffentliche und private Brunnen auf ihren Urangehalt hin untersucht: 92 der 616 privaten und 7 der 327 öffentlichen Brunnen überstiegen den von der Regierung gesetzten Grenzwert von 30 µg/l Uran. Die Urin-Analysen von 105 Personen, welche kontaminiertes Wasser getrunken hatten, zeigten bei 94 der 105 Personen einen Urangehalt von über 30 µg/l Urin. Obwohl die Nierentoxizität von Uran bekannt war, wurden keine Personen mit Nierenschädigungen identifiziert. Die betroffenen Personengruppen wurden angewiesen, uranhaltiges Wasser zu meiden bzw. das Uran mittels Aktivkohlefiltration zu eliminieren (R. Chepesiuk 2002).

Die gegenwärtig verfügbaren toxikologischen Daten aus Tierversuchen, die zur Ableitung eines Trinkwassergrenzwertes für lösliche Uranverbindungen herangezogen werden können, beschränken sich auf subchronische Studien an Ratten und Kaninchen (Gilman AP et al., 1998): Die niedrigste Schädigungsdosis, auch „Lowest Observed Adverse Effect Level“ (LOAEL) genannt, wurde dort mit 50 - 60 µg Uran/kg Körpergewicht bestimmt. In diesen Studien war es nicht möglich, eine Schwellendosis, den sogenannten "No observed adverse effect level" (NOAEL) zu bestimmen.

Eine kanadische epidemiologische Studie (Zamora et al. 1998) an Personen, die über einen längeren Zeitraum (3 – 59 Jahre) uranhaltiges Trinkwasser (2 -781 µg/l) aus privaten Hausbrunnen konsumiert hatten, lieferte Hinweise darauf, dass Konzentrationen über 2 µg Uran/l zu geringfügigen nephrotoxischen Effekten (Funktionsstörungen im Bereich des proximalen Tubulus: erhöhte Ausscheidung von β-Mikroglobulin und Lactatdehydrogenase in Korrelation zu Uranaufnahmemenge, Zunahme der Glucoseausscheidung ab ca. 20 µg/Tag, alkalische Phosphatase im Urin erhöht ab 200 µg/Tag) beim Menschen führen können, deren klinische Relevanz allerdings unklar bleibt. Die Autoren dieser Studie zogen den Schluss, dass die beobachteten Wirkungen als Zeichen subklinischer Toxizi-

tät gewertet werden können, die nicht zwangsläufig zum Nierenversagen oder einer manifesten Erkrankung führen. Sie könnten jedoch der erste Schritt in einem Geschehen sein, der zu einer fortschreitenden oder irreversiblen Nierenschädigung führt.

In einer vergleichbaren Studie aus Finnland (Kurttila et al. 2002) mit Urankonzentrationen bis 1920 µg/l (Median 28 µg/l) wurde eine statistisch signifikante Korrelation der Calciumausscheidung (nicht aber der Phosphat- und Glucoseausscheidung) mit der Urankonzentration im Trinkwasser und der täglichen Uranaufnahmemenge gefunden, wobei allerdings kein Schwellenwert für diesen Effekt feststellbar war. Die Autoren folgerten, dass zwar die klinische und umwelthygienische Relevanz ihrer Ergebnisse schwierig einzuordnen sei, diese aber einen Trinkwasserleitwert zwischen 2 und 20 µg/l stützen.

In einer neuerlichen Untersuchung von Kurttila et al. (2006) wurden bei 193 Personen, die im Mittel über 16 Jahre uranhaltiges Wasser bis in hohe Konzentrationsbereiche (maximale Konzentration 1500 µg/l; Median 25 µg/l) aus Privatbrunnen zu sich genommen hatten, keine Veränderung klinisch-chemischer Parameter gefunden, die auf eine zellschädigende Wirkung am Nierengewebe oder eine verminderte Nierenfunktion schließen ließe. Die nachgewiesenen Veränderungen bei hohen kumulativen Urandosens bezogen sich auf eine erhöhte Glucoseausscheidung im Urin und eine geringgradige Erhöhung des Blutdrucks, die nicht die Schwelle klinischer Relevanz erreichte.

## 7 Beurteilung von Urankonzentrationen im Trinkwasser

Für Uran im Trinkwasser gibt es national und international keinen gesetzlich festgelegten Grenzwert. Eine Übersicht über die derzeit gültigen nationalen und internationalen Empfehlungen bei Vorkommen von Uran im Trinkwasser zeigt die unterschiedlichen Beurteilungen:

- Die Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) enthält keinen Grenzwert für Uran. Da im Trinkwasser gemäß Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) jedoch keine Stoffe vorhanden sein dürfen, die eine Schädigung der menschlichen Gesundheit besorgen lassen (TrinkwV 2001, § 6 Abs. 1), hat das Umweltbundesamt für Uran im Trinkwasser einen „gesundheitlichen Leitwert“ empfohlen. Dieser leitet sich aus einem Versuch mit Kaninchen ab, in dem die niedrigste Dosis mit Beobachtung einer gesundheitsschädigenden Wirkung auf die Niere ermittelt wurde. Um einen sicheren Abstand von dieser geringsten schädigenden Dosis zu erhalten, wurde ein Sicherheitsfaktor von 50 - 100 eingerechnet. So ergibt sich eine für Menschen aller Altersstufen, auch Säuglinge, lebenslang gesundheitlich duldbare Höchstkonzentration für Uran im Trinkwasser von 10 µg/l. Dieser Vorsorgewert kann ohne Gesundheitsgefährdung zeitlich befristet überschritten werden. Dafür hat das Umweltbundesamt einen „Maßnahmewert“ im Sinne der TrinkwV 2001 von höchstens 20 µg/l für eine Belastungsdauer von bis zu 10 Jahren genannt.
- Auch die Mineral- und Tafelwasserverordnung (Min/TafelWV) enthält keinen Grenzwert für Uran. Allerdings regelt die Min/TafelWV in Anlage 6 (zu § 9 Abs. 3), welche Anforderungen einzuhalten sind, wenn auf die Angabe „Ge-

eignet für die Zubereitung von Säuglingsnahrung“ hingewiesen wird. Nur in Mineralwässern mit dieser Angabe darf der Gehalt an Uran 2 µg/l nicht überschreiten.

- Der vorläufige Trinkwasserleitwert der Weltgesundheitsorganisation (WHO Guidelines for Drinking-Water Quality, 2004) liegt bei 15 µg/l und soll eine lebenslange, gesundheitlich duldbare Aufnahme gewährleisten. Bis zum Vorliegen weitergehender Erkenntnisse zu den gesundheitlichen Auswirkungen könne möglicherweise ein höherer Leitwert von bis zu 30 µg/l als ausreichend angesehen werden. Diese Auffassung wird gestützt durch die unklare klinische Relevanz der Effekte, die mit der Uranzufuhr im vorliegenden niedrigen Dosisbereich einhergehen.
- Die oberste Umweltbehörde der USA hat einen maximalen Kontaminationswert von 30 µg/l festgelegt (Environmental Protection Agency, 2000).

Die Kreisverwaltungsbehörden in Bayern wurden im Oktober 2002 in einem ministeriellen Schreiben dazu aufgefordert, dass die Wasserversorgungsunternehmen bei Konzentrationen ab 20 µg/l Uran (Maßnahmewert des Umweltbundesamtes) von den Wasserwirtschaftsämtern über Abhilfemaßnahmen beraten werden.

## **8 Entfernung von Uran im Rahmen der Trinkwasseraufbereitung**

Gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz hat das Bayer. Landesamt für Umwelt in den Jahren 2003 bis 2005 ein Forschungsvorhaben zur Entfernung von Uran im Rahmen der Trinkwasseraufbereitung durchgeführt. Ziel war, ein kostengünstiges Verfahren unter Berücksichtigung der technischen Ausstattung der bayerischen Wasserwerke zu finden, um Uran effektiv und sicher bis unter 5 µg/l aus dem Trinkwasser entfernen zu können.

Im Forschungsvorhaben wurden unter der Federführung des ehemaligen Bayer. Landesamtes für Wasserwirtschaft verschiedene Verfahren anhand einer Literaturstudie mit anschließenden kleintechnischen Untersuchungen sowie einem Pilotvorhaben im halbtechnischen Maßstab untersucht (siehe auch „Untersuchungen zur Entfernung von Uran aus Trinkwasser“ unter [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)). In ersten Analysen konnte nachgewiesen werden, dass die in verschiedenen Veröffentlichungen als wirksam aufgezeigten Möglichkeiten (wie z.B. Adsorption an Aktivkohle, Mitfällung bei der Enteisenung oder Entarsenierung) keine zuverlässige und dauerhafte Urankonzentration bewirkten oder auf Grund der Kosten für die Aufbereitung von Trinkwasser keinen vertretbaren Weg darstellten.

Als vielversprechend wurde die Urankonzentration nach dem Ionenaustauschverfahren angesehen. Dieses Verfahren wird in der Trinkwasseraufbereitung vielfach zur Enthärtung oder Nitratentfernung eingesetzt. Für die Entfernung von Uran war es jedoch notwendig, nach speziellen Austauschharzen zu suchen. Der stark basische Anionenaustauscher „Lewatit S 6368“ der Fa. Bayer AG auf Basis vernetzten Polystyrols mit quartären Aminen als funktionelle Gruppen (Styren-Divinylbenzen-Copolymer mit Trialkylammonium-Gruppen) zeigte in kleintechnischen Versuchen eine deutliche Uran-Adsorption. Die Urankonzentrationen im

Zulauf von etwa  $17 \mu\text{g/l}$  wurden auf deutlich unter  $1 \mu\text{g/l}$  vermindert. Dieser Befund war ein Hinweis dafür, dass Uran in einem negativ geladenen Uranyl-Komplex gebunden ist. Signifikante Änderungen bei den anionischen Hauptinhaltsstoffen der untersuchten Trinkwässer waren darüber hinaus nicht erkennbar. Kinetikaufnahmen zeigten, dass die Uranadsorption schnell und quantitativ verläuft. Untersuchungen zur maximalen Beladung des Ionenaustauschers erbrachten, dass auch nach über 450.000 Bettvolumen (BV) noch kein Urandurchbruch gemessen werden konnte. Wurde jedoch das Austauschermaterial durchmischt, litt die Reinigungsleistung deutlich. Die Untersuchungen wurden auf einen 6-monatigen Versuchszeitraum im halbtechnischen Maßstab ausgedehnt (Abbildung 21).



Abb. 21. Halbtechnische Versuchsanlage (Edelstahlbehälter Bildmitte)

Hier zeigte der Anionenaustauscher große Wirksamkeit im Hinblick auf die Entfernung von Uran. Auch nach einem halben Jahr Laufzeit und einem Durchsatz von über 250.000 BV lagen die Uranablaufwerte deutlich unter  $0,1 \mu\text{g/l}$  (Abbildung 22). Die Ergebnisse der Untersuchungen der Trinkwasserproben auf mikrobiologische Parameter gemäß Trinkwasserverordnung entsprachen den gesetzlichen Bestimmungen.



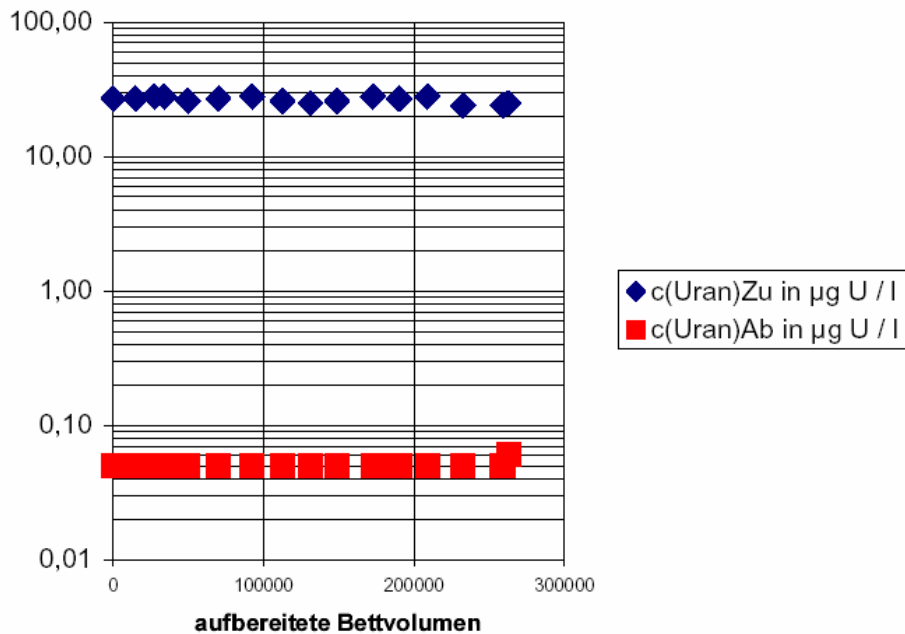


Abb. 22. Uran-Adsorption durch stark basischen Anionenaustauscher (Zu: Zulauf, Ab: Ablauf der halbtechnischen Versuchsanlage)

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens haben gezeigt, dass mit dem stark basischen Anionenaustauscher Lewatit S 6368 der Firma Bayer AG ein effizientes und hochspezifisches Adsorbens zur Entfernung von Uran aus Grund- und Trinkwässern zur Verfügung steht. Das Material wurde in die Liste der Aufbereitungsstoffe und Desinfektionsverfahren gemäß § 11 TrinkwV 2001 als „Aufbereitungsstoff mit befristeter Aufnahme zur allgemeinen Anwendung“ (Tabelle IIIa) aufgenommen.

Im Folgenden sind wichtige Hinweise zusammengestellt, die bei Realisierung und Betrieb einer derartigen Anlage unter Verwendung des stark basischen Anionenaustauschers „Lewatit S 6368“ beachtet werden sollten.

- Derzeit kann noch nicht zweifelsfrei davon ausgegangen werden, dass bayernweit eine einheitliche Uranspezies im Grundwasser vorliegt. Deshalb werden vor der Planung einer großtechnischen Anlage kleintechnische Versuche zur Bestimmung der Adsorptionskinetik derzeit noch für notwendig erachtet.
- Bei Wässern mit vergleichsweise hohen Gehalten an organischem Kohlenstoff (TOC; „total organic carbon“) sollte im Versuch auch die Adsorptionsleistung des Austauschers im Hinblick auf eine evtl. Adsorptionskonkurrenz mit Huminstoffkomplexen getestet werden.
- Als Kontaktzeit hat sich bei den Versuchen 1 Minute als optimal herausgestellt. Die daraus resultierenden hohen Filtergeschwindigkeiten haben sich als günstig erwiesen.
- Mit dem o.g. Anionenaustauscher ist die Entfernung von Uran bis unter die analytische Nachweisgrenze von 0,05 µg/l möglich. Auch bei Laufzeiten von über 200.000 BV können Urankonzentrationen von unter 1 µg/l erreicht werden.
- Vor Inbetriebnahme sollte der Austauscher mit einer Waschwassermenge von rd. 200 BV beaufschlagt werden. Das Abwasser aus den ersten 10 BV weist niedrige pH-Werte und erhöhte Chlorid- und Sulfatkonzentrationen auf.

- Filterstillstandszeiten führen nach den bislang vorliegenden Untersuchungen zu keiner Desorption von Uran.
- Der Austauscher kann aufgrund des geringen spezifischen Gewichts des Adsorbentmaterials nicht rückgespült werden. Zudem hat sich gezeigt, dass eine Durchmischung des Filterbetts die Reinigungsleistung des Austauschers beeinträchtigt.
- Gasabscheidungen, wie sie üblicherweise nach geschlossenen Filteranlagen auftreten, führen zu einem deutlichen Rückgang der Adsorptionskapazität bzw. behindern die Uranadsorption. Aus diesem Grund sollte die Adsorption nur mit entspanntem Wasser (z.B. nach Saugbehälter) bzw. ausreichenden Vordruck (z.B. nach Druckerhöhung) durchgeführt werden.
- Trübungen führen ähnlich wie Gasabscheidungen zu stark nachlassender Adsorptionsleistung des Ionenaustauschers. Deshalb sollte der Adsorber nur mit Reinwasser beaufschlagt werden.
- Eine Strahlenexposition des Wasserwerkspersonals kann im laufenden Betrieb ausgeschlossen werden. Gamma-Ortsdosisleistungsmessungen auch direkt an der Behälteroberfläche zeigten nur Werte im Bereich des natürlichen Hintergrundes.
- Der Anionenaustauscher zeigt keine Wirksamkeit hinsichtlich der Entfernung von Arsen und Radium. In diesen Fällen sollten weitere Verfahren, z.B. Verfahren auf Basis von Titanoxid-Verbindungen, untersucht werden.
- Aus hygienischen Gründen bietet sich Edelstahl als Behältermaterial an.
- Die hohe Adsorptionskapazität und die langen Laufzeiten des Adsorbers führen zu einem hoch angereicherten Rückstand, der schadlos entsorgt werden muss. Eine konventionelle Regenerierung des Austauschers ist neben verfahrenstechnischen Gründen auch aus wirtschaftlichen Aspekten nicht sinnvoll. Jedoch könnten Verfahren zur Rückgewinnung von Uran als sinnvoll erachtet werden.
- Die Behälter sind so zu gestalten, dass das Adsorbentmaterial ohne Inkorporationsgefahr ausgetauscht werden kann. Dies kann bei Kleinanlagen z.B. durch Filterkartuschen und bei größeren Anlagen durch Saugwagen und Kuppelungsanschlüsse erfolgen.
- Beim Umgang mit beladenem Material (z.B. Materialaustausch) sind Schutzkleidung und Schutzhandschuhe zu tragen.
- Der Entsorgungsweg muss mit dem Landesamt für Umwelt abgestimmt werden. Vor jeder Entsorgung ist dem LfU der Nachweis vorzulegen, dass die strahlenschutzrechtlichen Regelungen des § 102 Strahlenschutzverordnung eingehalten sind.
- Aus der kompakten Bauweise und den langen Laufzeiten resultieren vergleichsweise geringe Investitions- und Betriebskosten. Die spezifischen Kosten für die Materialbeschaffung und Materialentsorgung können je nach Aufbereitungsleistung derzeit mit 0,02 bis 0,04 €/m<sup>3</sup> angegeben werden.
- Das Bayerische Landesamt für Umwelt steht als Ansprechpartner für die Trinkwasseraufbereitung zur Verfügung.

Ein weiteres Anionenaustauschermaterial zur Entfernung von Uran im Rahmen der Trinkwasseraufbereitung wurde nach erfolgreichem Testlauf durch das Umweltbundesamt in die Tabelle IIIa der Liste der Aufbereitungsstoffe und Desinfektionsverfahren aufgenommen und zunächst befristet bis 01.06.2008 zugelassen ([www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)). Dieses Verfahren ist unter der Bezeichnung „URANEX“ im Handel erhältlich.

## 9 Entsorgung und Aspekte des Strahlenschutzes

### 9.1 Rechtliche Vorschriften für die Entsorgung

#### 9.1.1 Strahlenschutzrechtliche Regelungen

In der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) sind in der Anlage XII Teil A Rückstände aufgelistet, bei welchen die natürliche Radioaktivität zu beachten ist. Für diese Materialien sind in Anlage XII Teil B Überwachungsgrenzen festgelegt. Rückstände aus der Trinkwasseraufbereitung sind in dieser Positivliste nicht enthalten. Für eine Beurteilung von angereicherten natürlichen radioaktiven Stoffen in den Wasserwerksrückständen muss daher der § 102 StrlSchV herangezogen werden, der besagt, dass bei Arbeiten mit Materialien, die nicht in der Positivliste stehen, die zuständige Behörde entsprechende Strahlenschutzmaßnahmen anordnen kann, sofern erhöhte Strahlenexpositionen für Einzelpersonen in der Bevölkerung auftreten können. Als Maßstäbe für die Beurteilung der Wasseraufbereitungsrückstände werden hilfsweise auch hier die Vorgaben der Anlage XII Teil B und C verwendet.

Nach Anlage XII Teil B StrlSchV gelten folgende Überwachungsgrenzen für Rückstände der Positivliste. Für die Werte  $C_{U238max}$  und  $C_{Th232max}$  der größten spezifischen Aktivität der Radionuklide der Nuklidketten U-238sec und Th-232sec gilt die nachfolgende Summenformel:  $C_{U238max} + C_{Th232max} \leq C$ , mit  $C = 1$  Bq/g für die allgemeine Verwertung oder Beseitigung

Für bestimmte Entsorgungswege sind auch strengere Überwachungswerte festgelegt. Ein Rückstand kann aus der Überwachung entlassen werden, wenn bei gemeinsamer Deponierung mit anderen Rückständen und Abfällen, die Aktivitätswerte der StrlSchV (§ 98 und Teil C der Anlage XII) eingehalten werden. Für die Mittelwerte  $C^M_{U238max}$  und  $C^M_{Th234max}$  der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der Nuklidketten U-238sec und Th-234sec in Bq/g gilt dann die Summenformel  $C^M_{U238max} + C^M_{Th232max} \leq C^M$ , wobei die Aktivitätswerte je nach Entsorgungsweg zwischen 0,05 Bq/g und 5 Bq/g festgelegt sind. Die Mittelwerte  $C^M$  der spezifischen Aktivitäten dürfen als Gesamtaktivität der innerhalb von 12 Monaten auf der Deponie beseitigten überwachungsbedürftigen Rückstände geteilt durch die Gesamtmasse aller innerhalb dieses Zeitraumes auf der Deponie beseitigten Abfälle und Rückstände bestimmt werden. Kein Radionuklid darf dabei 10 Bq/g bzw. bei Deponierung für besonders überwachungsbedürftige Rückstände 50 Bq/g überschreiten.

#### 9.1.2 Abfallrechtliche Zulässigkeit

Eine Entlassung aus der Überwachung nach § 98 StrlSchV kann nur erfolgen, wenn keine Bedenken gegen die abfallrechtliche Zulässigkeit der vorgesehenen Entsorgung bestehen (§ 98 Abs. 3). Der Antragsteller hat der für die vorgesehene Entsorgungsanlage nach Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz zuständigen Behörde gleichzeitig eine Kopie der Annahmeerklärung zuzuleiten.

Nach den Vorgaben der Abfallablagerungsverordnung gilt seit dem 01.02.2007, dass Materialien mit einem Brennwert von mehr als 6.000 kJ/kg nicht mehr abgelagert werden dürfen. Diese Anforderung muss nur bei Abfällen erfüllt werden, bei denen der Feststoff-TOC 5 Masse-% überschreitet. Anionenaustauscherharze erfüllen dieses Kriterium. Aus radiologischer und abfallrechtlicher Sicht wird derzeit geprüft, ob und unter welchen Bedingungen mit Uran beladenes Anionenaustauscherharz in Abfallverbrennungsanlagen entsorgt werden kann.

## **9.2 Pilotprojekt Uranentfernung mittels Anionenaustauscher**

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungs-Vorhabens „Verfahrenstechnische Untersuchungen zur optimalen großtechnischen Nutzung des starken Anionenaustauscherharzes S 6368 zur Uranentfernung in bayerischen Wasserwerken“ hat das LfU als zuständige Behörde für die Entsorgung von überwachungsbedürftigen Rückständen gemäß StrlSchV folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Radionuklidmessungen der Uran- und Thorium-Zerfallsreihe in Feststoffen, wie z. B. Ionenaustauschermaterialien und Spülschlämmen.

Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurde die effektive Jahresdosis für Einzelpersonen der Bevölkerung gemäß § 98 StrlSchV für die Beseitigung oder Verwertung des verwendeten Anionenaustauscherharzes abgeschätzt.

### **9.2.1 Messergebnisse**

Im Rahmen des o. g. Forschungsprojektes wurden die spezifischen Aktivitäten der Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen in mehreren Anionenaustauscherproben einer in einem Wasserwerk installierten Versuchsanlage zur Uranentfernung untersucht.

Die ermittelten spezifischen Aktivitäten lagen für U-238 zwischen 85 Bq/g und 162 Bq/g und damit über den Überwachungsgrenzwerten der Anlage XII Teil B + C der StrlSchV. Auch die Nuklide Th-234, Pa-234m und U-234 überschritten die maximalen spezifischen Aktivitäten für die gemeinsame Deponierung mit anderen Rückständen und Abfällen nach § 98 und Anlage XII Teil C Abs. 1 Satz 4 StrlSchV. Eine Entlassung aus der Überwachung und eine anschließende Entsorgung ist deshalb nur möglich, wenn der Richtwert für die effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung 1 Millisievert pro Jahr (mSv/a) nicht überschreitet (§ 98 Abs. 1 StrlSchV)

### **9.2.2 Bewertung der Entsorgungswege für das Pilotprojekt**

Zum Zeitpunkt der Projektdurchführung wurde nur der in der StrlSchV explizit beschriebene Entsorgungsweg der Deponierung betrachtet. Da seit 01.02.2007 gemäß Abfallablagerungsverordnung die untersuchten Anionenaustauscher nicht mehr abgelagert werden dürfen, wird derzeit aus radiologischer und abfallrechtlicher

Sicht geprüft, ob und unter welchen Bedingungen mit Uran beladenes Anionenaustauscherharz in einer Abfallverbrennungsanlage entsorgt werden kann.

Die Entsorgung des Anionenaustauscherharzes auf einer Deponie wurde im Rahmen des Projektes untersucht. Die Abschätzung der effektiven Jahresdosis für die Beteiligten (Wasserwart, LKW-Fahrer, Deponiearbeiter) ergab einen Wert von 0,0008 mSv/a, der weit unterhalb des Richtwertes von 1 mSv im Jahr liegt. Dabei wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt: das Anionenaustauscherharz mit der höchsten gemessenen spezifischen Aktivität wird zweimal im Jahr auf eine Deponie verbracht. Die Gamma-Ortsdosisleistung kann vernachlässigt werden, da die an den Proben gemessene Ortsdosisleistung die Untergrundwerte nicht überschreitet. Auch die Inhalation kann unberücksichtigt bleiben, da das Material feucht beseitigt wird und grobkörnig ist. Damit wird eine Aufnahme über die Lunge ausgeschlossen. Somit wurde lediglich eine hypothetische Inkorporation von Anionenaustauschermaterial betrachtet, wobei ein maximaler Kontakt von 8 Stunden pro Entsorgung und eine Inkorporation von 0,006 g/h angenommen wird. Eine Überschreitung der effektiven Dosis wäre theoretisch nur durch Inkorporation von größeren Mengen Anionenaustauschermaterial möglich. Bei der Entsorgung sind daher entsprechende Schutzmaßnahmen zu beachten.

## 10 Empfehlungen für die Beratung von Wasserversorgungsunternehmen

Eine Beratung von Wasserversorgungsunternehmen zur Reduzierung der Uran-gehalte im Trinkwasser hat sich an den aktuellen Leit- und Maßnahmewerten zu orientieren und soll in einem Vorschlag enden, wie die Belastungssituation optimal verbessert werden kann. Das Ziel ist also nicht nur, den Maßnahmewert zu unterbieten, sondern im Sinne des Verbrauchers dauerhaft möglichst niedrige Urangelhalte im Trinkwasser zu erhalten. Die Wasserversorgungsunternehmen werden bei Konzentrationen ab 20 µg/l Uran (Maßnahmewert des Umweltbundesamtes) von den Behörden über Abhilfemaßnahmen beraten.

In einigen Fällen wurden bereits Beratungen durchgeführt. Hierbei wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Teilnehmerkreis: Wasserversorgungsunternehmen, zuständiges Gesundheitsamt, Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, zuständiges Wasserwirtschaftsamt, Landesamt für Umwelt.
- Ist-Analyse:
  - Beurteilung der geologischen und hydrogeologischen Situation hinsichtlich der Uranproblematik aufgrund der regionalen Kenntnisse.
  - Es wird die derzeitige Versorgungssituation hinsichtlich der Uranbelastung bewertet: Genutzte Grundwassererschließungen (Brunnen, Quellen), der Ausbau der Brunnen, die Zustrombereiche (genutzte Aquifers), der technische Betrieb der Wasserfassungen.
- Optimierungsmöglichkeiten: Überlegungen zu technischen Veränderungen an den Wasserfassungen (z.B. Absperren von mit Uran belasteten Zustromberei-

chen, Stilllegung einzelner Wasserfassungen bzw. günstigere Mischverhältnisse durch veränderten Pumpbetrieb).

- Prüfung von Alternativen:
  - Überprüfung der Möglichkeit von Neuerschließungen (geologisch, technisch, qualitativ, quantitativ).
  - Anschlussmöglichkeiten an andere Wasserversorgungsunternehmen / Zweckverbände im Nahbereich, evtl. Bezug von Fernwasser: Machbarkeitsüberlegungen mit Kostenabschätzung.
- Information der WVUs über Möglichkeiten der Trinkwasseraufbereitung: Stand der Technik, zu veranschlagende Kosten, Vorgehensweise.
- Problematik der Entsorgung des mit Uran belasteten Aufbereitungsmaterials.
- Ortseinsicht (Grundwassererschließungen, Wasserwerk): Überprüfung der (kostengünstigsten) Möglichkeit zur Installation einer Anlage zur Uranentfernung.
- Ein abschließendes Gespräch soll aus den diskutierten Vorschlägen die Maßnahmen herausfiltern, die geeignet sind, unter Abwägung aller finanziellen und technischen Faktoren eine rasche und wesentliche Minderung der Uranbelastung des Trinkwassers herbeizuführen.

## 11 Empfehlungen für die Information der Bevölkerung

Prinzipiell ist zunächst der Inhaber einer Wasserversorgungsanlage nach TrinkwV 2001 (§ 21) verpflichtet, die Bevölkerung über die Qualität des gelieferten Wassers zu informieren. Da es sich im Fall von Uran nicht um eine allgemein bekannte Kontaminante handelt, wird die Information umfassender sein müssen. Hierbei empfiehlt sich die enge Zusammenarbeit des WVU mit dem zuständigen Gesundheitsamt, um die Information in geeigneter Weise zur Verfügung stellen zu können. Die Gesundheitsämter müssen darauf hinwirken, dass der Inhaber einer Wasserversorgungsanlage dieser Informationspflicht nachkommt und darüber hinaus dafür Sorge trägt, dass kein Wasser mit einem Urangehalt  $>20 \mu\text{g/l}$  an die Bevölkerung abgegeben wird.

## 12 Zusammenfassung

Uran kommt in den Gesteinen der Erdkruste mit durchschnittlich 2-4 Gramm pro Tonne vor, wobei es sehr diffus verteilt auftritt und in vielen Gesteinen weit verbreitet ist, so dass es auch ohne Berücksichtigung besonderer örtlicher Konzentrationen das 50-häufigste Element in der Erdkruste ist. Starke Anreicherungen im Gestein sind selten, man findet sie jedoch z.B. in granitischen Gesteinen, aber auch in Keuper- oder Buntsandsteinen. Uran ist ein radioaktives Schwermetall, wobei die chemische Toxizität deutlich höher als die Radiotoxizität eingestuft wird.

In der Natur tritt Uran überwiegend in der +4- oder +6-wertigen Form auf. Unter sehr sauren sowie stark reduzierenden Bedingungen ist vierwertiges Uran dominierend. Bei pH-Bedingungen von 4,5 – 8,5 ist vierwertiges Uran nahezu unlöslich. Sechswertiges Uran ist dagegen sehr gut wasserlöslich, wobei es sehr stabile Komplexe wie z.B.  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  bildet. Maßgeblich für die Wasserlöslichkeit von Uran VI-Verbindungen im pH-Bereich von 6,8-8,5 ist das Vorhandensein von gelöstem Sauerstoff. Unter diesen Bedingungen kann Uran bis zu einigen hundert Mikrogramm/Liter ( $\mu\text{g/l}$ ) im Wasser enthalten sein. Ein vermehrtes Vorkommen von Uran kann aber auch durch organische Liganden (z.B. Huminstoffkolloide) unter Bildung stabiler Komplexe beobachtet werden. Aus diesem Grund sind vielfach erhöhte Urangehalte in anmoorigen Gebieten anzutreffen.

Aufgrund der ubiquitären Verbreitung der natürlichen Radionuklide und deren Zerfallsprodukten in der Erdkruste finden sich in allen Grund- und Trinkwässern auch Spuren von Uran. Art und Menge der Urankonzentrationen wird hierbei überwiegend vom durchströmten Untergrund und dem Urangehalt der wasserführenden Gesteinsschichten sowie der chemischen Zusammensetzung des Wassers bestimmt.

Die Höhe der Belastung mit Uran-238 hängt somit von den geologischen Formationen im Einzugsbereich des Grund- bzw. Trinkwassers ab. Dabei ist für die Situation in Bayern eine Zweiteilung erkennbar:

In Nordbayern sind uranhaltige Gesteine v. a. in den vergleichsweise wasserunlöslichen, primären Vererzungen des Kristallinbereichs, wie in den Graniten und Gneisen des Fichtelgebirges und des Bayerischen Waldes, vorhanden.

Leicht lösliche, umgelagerte Uranverbindungen findet man dagegen in Buntsandsteinformationen und Sedimenten des Unteren und Mittleren Keupers vorwiegend in Franken. In Südbayern sind darüber hinaus v. a. die geologischen Formationen des Tertiär und des Quartär, in denen Uran häufig organisch gebunden in anmoorigen Gebieten vorliegt, betroffen. Diese Konstellation besteht z.B. im Erdinger Moos und im Donaumoos. Darüber hinaus wird Uran im Grundwasser in Südbayern auch im Vollschoffer und in der oberen Süßwassermolasse gefunden.

Im Herbst 2000 hat das damalige Landesuntersuchungsamt für das Gesundheitswesen Nordbayern Informationen über einen erhöhten Urangehalt aus einem Brunnen einer Brauerei im Landkreis Roth (Mittelfranken) erhalten. Da davon ausgegangen werden konnte, dass es sich hier um keinen Einzelfall handelt und generell wenig Kenntnisse über die Urangehalte in Grund- und Trinkwässern vorlagen, wurde mit einem Uran-Untersuchungsprogramm begonnen. Zur Untersu-

chung gelangten zunächst Trinkwässer aus großen, zentralen Wasserversorgungen in Nordbayern. Dies waren sowohl Wässer, die ohne Aufbereitung direkt vom Gewinnungsort (Brunnen) in das Trinkwassernetz eingespeist wurden, als auch Mischwässer aus mehreren Gewinnungsgebieten. Bei Überschreitung des damals von der Gesundheitsverwaltung festgelegten Leitwerts zur gesundheitlichen Beurteilung (5 µg/l Uran) wurden zusätzlich, sofern vorhanden, auch die Einzelbrunnen der betroffenen Wasserversorgungsunternehmen untersucht.

Das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) ist vom damaligen Bayerischen Staatsministerium für Gesundheit, Ernährung und Verbraucherschutz im Januar 2002 angewiesen worden, das bestehende Untersuchungsprogramm in Absprache mit dem damaligen Landesamt für Wasserwirtschaft auch auf den südbayerischen Raum auszudehnen. Vornehmliches Ziel dieses „Uran-Sonderuntersuchungsprogramms“ sollte sein, rasch einen landesweiten Überblick über alle Gebiete mit erhöhten Urankonzentrationen in Bayern zu erhalten. Die Probenahmestellen wurden hierbei im Zeitraum 2001-2003 nach hydrogeologischen Gesichtspunkten von der Wasserwirtschaftsverwaltung unter Berücksichtigung der Anzahl des mit Trinkwasser versorgten Personenkreises ausgewählt. Um ein vollständigeres Bild zu erhalten, wurden in einem zweiten Untersuchungsschritt im Zeitraum 2004-2006 in Bereichen, in denen aufgrund der geologischen Beschaffenheit eine erhöhte Uranbelastung des Trinkwassers vorhanden oder zu erwarten war („hot spots“), verstärkt Proben entnommen.

Der Schwerpunkt bei der Festlegung des Untersuchungsprogrammes wurde auf die Eingrenzung möglicher belasteter Einzelbrunnen bzw. die Charakterisierung von Wässern, die aus verschiedenen Brunnen oder Quellen gemischt wurden, unter Berücksichtigung der Hydrogeologie, gelegt. Da es aber auch interessierte, welches Wasser an die Bevölkerung abgegeben wird, wurden zusätzlich insgesamt 704 Proben aus dem Ortsnetz und aus Hochbehältern gezogen. In 70,9% der Proben lagen die Urankonzentrationen unter 2 µg/l, in 19,7% zwischen 2 µg/l und unter 10 µg/l und in insgesamt 9,4% über 10 µg/l. Nur in 2,1% der Proben lag die Urankonzentration über 20 µg/l.

Über das gesamte Uran-Messprogramm hinweg wurden insgesamt 3.560 Grund- und Trinkwasserproben vom früheren LfW (jetzt LfU), LGL und dem früheren Geologischen Landesamt (jetzt LfU) beprobt. In den Proben konnte das Uranisotop 238 mit Hilfe der Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (sog. ICP-MS), als derzeit empfindlichste Messmethode, bestimmt werden.

Aus allen Messergebnissen errechnet sich ein durchschnittlicher Uranwert von 2,2 µg/l. Das Wertespektrum liegt dabei im Bereich zwischen < 0,1 µg/l und 75 µg/l. Knapp 73 % aller Messwerte liegen unterhalb von 2 µg/l.

Bei den festgestellten Urangehalten sind aufgrund der unterschiedlichen Hydrogeologischen Räume signifikante regionale Unterschiede festzustellen. Die mittleren Analysewerte in den Regierungsbezirken Schwaben, Oberbayern, Niederbayern und in der Oberpfalz liegen unter dem Landesdurchschnitt, während die mittleren Analysewerte in den Regierungsbezirken Ober-, Mittel- und Unterfranken deutlich höher liegen. So wurden in Ober-, Mittel- und Unterfranken insgesamt 187 Proben mit Urangehalten über 10 µg/l gemessen. Das entspricht bei



einer Gesamtprobenzahl von 1.738 Proben fast 11 %. In Ober- und Niederbayern sowie in Schwaben und der Oberpfalz lagen die Urangelhalte bei lediglich 21 Proben oberhalb von 10 µg /l. Bei einer Gesamtprobenzahl von 1.822 ist knapp über 1% der vorgelegten Proben betroffen.

Die mögliche Schadwirkung durch ionisierende Strahlung ist bei dem Schwermetall Uran als deutlich nachrangig gegenüber der rein chemischen Toxizität einzuordnen. Den wesentlichen toxischen Effekt stellt hierbei die Nierenschädigung dar. Tierversuche weisen jedoch darauf hin, dass diese Nierenfunktionsstörung bei Unterbrechung der Uranzufuhr reversibel ist.

Derzeit gibt es weder einen nationalen noch einen internationalen Grenzwert für Uran im Trinkwasser. Das Umweltbundesamt hat für Uran im Trinkwasser einen „gesundheitlichen Leitwert“ empfohlen. Aus Studien ergibt sich so eine für Menschen aller Altersstufen, auch Säuglinge, lebenslang gesundheitlich duldbare Höchstkonzentration für Uran im Trinkwasser von 10 µg/l. Dieser Vorsorgewert kann ohne Gesundheitsgefährdung zeitlich befristet überschritten werden. Dafür hat das Umweltbundesamt einen „Maßnahmewert“ im Sinne der TrinkwV 2001 von höchstens 20 µg/l für eine Belastungsdauer von bis zu 10 Jahren genannt.

Zur Entfernung von Uran im Rahmen der Trinkwasseraufbereitung wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt ein Forschungsvorhaben durchgeführt. Ziel war es, ein kostengünstiges Verfahren unter Berücksichtigung der technischen Ausstattung der bayerischen Wasserwerke zu finden, um Uran effektiv und sicher bis unter 5 µg/l aus dem Trinkwasser entfernen zu können. Letztlich hat sich ein Anionenaustauscher mit großer Wirksamkeit im Hinblick auf die Entfernung von Uran als geeignet erwiesen. Auch nach einem halben Jahr Laufzeit und einem Durchsatz von über 250.000 Bettvolumina lagen die Uranablaufwerte unter 0,05 µg/l. Das Material ist durch das Umweltbundesamt in die Tabelle 3a der Liste der Aufbereitungsstoffe und Desinfektionsverfahren aufgenommen und zunächst befristet bis 01.06.2008 zugelassen worden. Ein weiteres Anionenaustauscherharz zur Entfernung von Uran wurde in der Zwischenzeit erfolgreich getestet und ist käuflich erhältlich.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens hat das LfU als zuständige Behörde für die Überwachung sonstiger Materialien gemäß StrlSchV Untersuchungen durchgeführt, die zeigen sollten, ob mit Uran beladene Anionenaustauscherharze problemlos entsorgt werden können. Im Rahmen des Projektes wurde die Deponierung des Anionenaustauscherharzes radiologisch bewertet. Da seit dem 01.02.2007 die Verpflichtung besteht, Material mit hohem Brennwert in erster Linie thermisch zu verwerten, werden derzeit Entsorgungsalternativen zur Deponierung aus radiologischer und abfallrechtlicher Sicht geprüft.

Der Unternehmer und der sonstige Inhaber einer Wasserversorgungsanlage haben den Verbraucher durch geeignetes und aktuelles Informationsmaterial über die Qualität des ihm zur Verfügung gestellten Wassers zu informieren.

Die Wasserversorgungsunternehmen werden bei Konzentrationen ab 20 µg/l Uran (Maßnahmewert des Umweltbundesamtes) von den Wasserwirtschaftsämtern über Abhilfemaßnahmen beraten.

## 13 Literatur

ARSDR (1999) Toxicological Profile for Uranium  
<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp150.html>

Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbau-  
bedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen - Bergbau), Richtlinien-  
vorschlag der Strahlenschutzkommission, verabschiedet auf der 155. Sitzung der  
SSK am 02./03.07.1998.

Chepesiuk R (2002) Metal toxicity. Unwell water in South Carolina. Environ.  
Health Perspect. 110, A182  
[www.ehponline.org/docs/2002/110-4/EHP110pa180PDF.PDF](http://www.ehponline.org/docs/2002/110-4/EHP110pa180PDF.PDF)

Gilman AP, Villeneuve DC, Secours VE, Yagminas AP, Tracy BL, Quinn JM, Valli  
VE, Willes RJ und Moss MA (1998) Uranyl nitrate; 28-day and 91-day toxicity  
studies in the Sprague-Dawley rat. Toxicol Sciences 41, 117-28  
[http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?db=pubmed&cmd=Retrieve&dopt=AbstractPlus&list\\_uids=9520346&query\\_hl=16&itool=pubmed\\_docsum](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?db=pubmed&cmd=Retrieve&dopt=AbstractPlus&list_uids=9520346&query_hl=16&itool=pubmed_docsum)

Kurttio , Auvinen A, Salonen L, Saha H, Pekkanen J, Mäkeläinen I, Väisänen SB,  
Penttilä IM, und Komulainen H (2002) Renal effects of uranium in drinking water.  
Environ. Health Perspect. 110, 337-42  
<http://www.ehponline.org/members/2002/110p337-342kurttio/EHP110p337PDF.PDF>

Kurttio P, Harmoinen A, Saha H, Salonen L, Karpas Z, Komulainen H und  
Auvinen A. (2006) Kidney toxicity of ingested uranium from drinking water. Am J  
Kidney Dis 47, 972-82  
[http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&list\\_uids=16731292&dopt=Abstract](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&list_uids=16731292&dopt=Abstract)

Maucher, A. (1962) Die Lagerstätten des Urans – Friedrich Vieweg & Sohn,  
Braunschweig

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlen-  
schutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001, in: Bundesgesetzblatt, Teil I Nr.  
38, 1713-1848, 2001.

Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Ab-  
fallablagerungsverordnung – AbfAbIV) vom 24. Juli 2002, in: Bundesgesetzblatt I  
S. 2820, 2002.

WHO (2005) Uranium in drinking-water. Background document for development  
of *Guidelines for Drinking-water Quality*  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/chemicals/uranium290605.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/uranium290605.pdf)

WHO (2006) Guidelines for drinking-water quality; 3. Auflage  
[www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3rev/en/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/en/index.html)

Zamora, ML., Tracy BL, Zielinski JM, Meyerhof DP und Moss MA. (1998) Chronic ingestion of uranium in drinking water: a study of kidney bioeffects in humans. Toxicol. Sciences 43, 68-7

[http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?db=pubmed&cmd=Retrieve&dopt=AbstractPlus&list\\_uids=9629621&query\\_hl=7&itool=pubmed\\_docsum](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?db=pubmed&cmd=Retrieve&dopt=AbstractPlus&list_uids=9629621&query_hl=7&itool=pubmed_docsum)

Ziehr, H. (1957). Uranvorkommen in Bayern, Die Atomwirtschaft (193 – 196)