

Energy Source Uranium – Resources, Production and Adequacy

Germany is one of the first developed industrialized countries that is leaving the peaceful use of nuclear energy. It is important to note that other industrialized countries, such as Austria and Australia, did not start and Italy confirmed its exit after Fukushima (Figure 1). In addition to the risk technology “nuclear power”, two other factors have been and are still being argued against the use of nuclear energy; the lack of long-term disposal facilities, in particular for the spent nuclear fuels and the waste from the reprocessing process, as well as the lack of resource security for the nuclear fuel uranium (thorium). In this article the second question is to be considered which focuses the resource security

for the energy raw material uranium. For the energy source uranium it is clarified as to what extent natural resources are known, what results coming from further exploration are to be expected, and under which boundary conditions the resulting adequacy can be quantified and assessed. In addition the extent will be discussed to which the amount of known resources has so far developed and the time dependency, from which forecast a discussion of adequacy should be based. The author explicitly refers to the contribution to the same problem, which appeared in Glückauf 144 No. 3 (2008).

Energiequelle Uran – Ressourcen, Gewinnung und Reichweiten

Deutschland ist eins der ersten Industrieländer, das aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie aussteigt. Andere, wie Österreich und Australien, sind erst gar nicht eingestiegen und Italien hat nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima den Ausstieg vollzogen. Neben der Risikotechnologie Kernkraft wurden und werden immer wieder zwei weitere Faktoren gegen die Kernenergie ins Feld geführt, die fehlende langzeitsichere Entsorgungsmöglichkeit (Endlagerung) sowie die fehlende Ressourcensicherheit für den Kernbrennstoff Uran (Thorium). Im vorliegenden Beitrag soll die zweite Frage, die der Ressourcensicherheit für den Energierohstoff Uran, näher betrachtet werden. Für die Energiequelle Uran

wird verdeutlicht, in welchem Umfang natürliche Ressourcen bekannt sind, welche Ergebnisse aus der weiteren Erkundung zu erwarten sind und unter welchen Randbedingungen die daraus resultierende Reichweite zu quantifizieren und zu bewerten ist. Darüber hinaus wird diskutiert, wie sich die Höhe bekannter Ressourcen in ihrer Zeitabhängigkeit bisher entwickelt hat und von welcher Prognose bei einer Reichweitendiskussion ausgegangen werden sollte. Der Autor bezieht dabei ausdrücklich seine Veröffentlichung in Glückauf 144 (2008) Heft 3 zur gleichen Problematik ein.

Germany is one of the first developed industrialized countries that is leaving the peaceful use of nuclear energy. It is important to note that other industrialized countries, such as Austria and Australia, did not start and Italy confirmed its exit after Fukushima (Figure 1). In addition to the risk technology “nuclear power”, two other factors have been and are still being argued against the use of nuclear energy; the lack of long-term disposal facilities, in particular for the spent nuclear fuels and the waste from the reprocessing process, as well as the lack of resource security for the nuclear fuel uranium (thorium). With regard to the lack of long-term disposal opportunities for high-active waste (HAW) and heat-generating active waste (HWG) the first countries with suitable facilities will be Finland – the start of the final storage is planned for 2022 – and Sweden, is planned for 2030. The intended operation of these repositories for HAW/HWG is 100 years.

Deutschland ist eines der ersten entwickelten Industrieländer, das aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie aussteigt, wobei man festhalten muss, dass andere Industrieländer, wie Österreich und Australien, erst gar nicht eingestiegen sind und Italien nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima den Ausstieg vollzogen hat (Bild 1). Neben der Risikotechnologie Kernkraft wurden und werden immer wieder zwei weitere Faktoren gegen die Kernenergie ins Feld geführt, die fehlende langzeitsichere Entsorgungsmöglichkeit (Endlagerung), insbesondere für die abgebrannten Brennelemente und die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sowie die fehlende Ressourcensicherheit für den Kernbrennstoff Uran (Thorium). Was die fehlende langzeitsichere Entsorgungsmöglichkeit für die hochaktiven, wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle (High Active Waste – HAW, Heat Generating Waste – HWG) betrifft, werden Finnland etwa ab dem Jahr 2022 und Schweden etwa ab

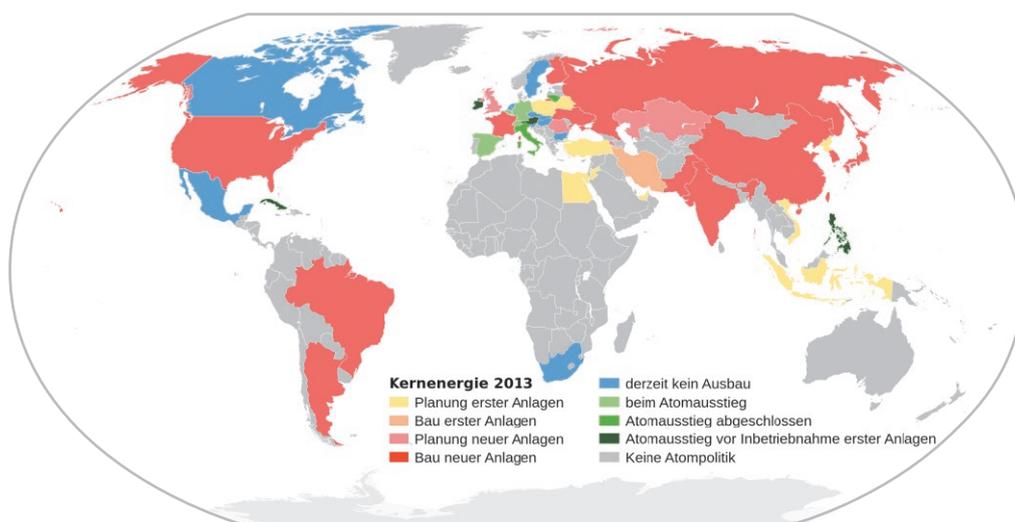


Fig. 1. World Nuclear Power Reactors (2, 3).

Bild 1. Nutzung von Kernenergie weltweit (2, 3).

The second question to be considered is the resource security for the energy raw material uranium. The author explicitly refers to the contribution to the same problem (1), which appeared in Glückauf 144 No. 3 (2008). For the energy source uranium, in the following is to be clarified to what extent natural resources are known, what results coming from further exploration are to be expected, and under which boundary conditions the resulting adequacy – from the resource-related lifetime of nuclear energy production at all – can be quantified and assessed. A (too) simple consideration based on the calculation of the time of adequacy T [a] from the quantity of degradable uranium resources R [t U] and the annual uranium consumption V [t U/a] can be expressed using equation (1):

$$T = R/V \quad (1)$$

In the following, the extent will be discussed to which the amount of known resources has so far developed and the time dependency, from which forecast a discussion of adequacy should be based.

Uranium consumption is an integral quantity and is determined by the total electrical energy production from nuclear energy as well as from the relevant degrees of efficiency in fuel production, reactor operation, including the “breeding” of new thermally fissionable material in reactors with a high flux density of fast neutrons. That means, conversion of the uranium isotope U-238, which actually not used in conventional thermal reactors, into thermally cleavable U-239 and other transuranic elements as well as trans-uranium recycling, i.e. the energetic conversion of trans-uranium elements, which form in the reactor operation and constitute the long-lived part of today’s reactor waste. Considering these factors, i.e.:

- energy yield A [GWh / t U] per uranium quantity (based on the amount of uranium used) and its dependence on the factors:
 - utilization factor F_1 of uranium in nuclear fuel production;
 - reactor efficiency F_2 (burn-up on thermally fissionable uranium); and
 - breeding and recycling factor F_3 .

in relation to the total electric energy production E [GWh/a] from nuclear energy, this results in a furthermore simplified relationship according to equation (2):

2030 die ersten Länder sein, die Endlager im bestimmungsgemäßen Betrieb für HAW-HGW, mit einer Laufzeit von geplant 100 Jahren, betreiben werden.

Es soll hier die zweite Frage, die der Ressourcensicherheit für den Energierohstoff Uran, näher betrachtet werden. Der Autor bezieht ausdrücklich den Beitrag zur gleichen Problematik ein, der in Glückauf 144 (2008) Heft 3 erschienen ist (1).

Für die Energiequelle Uran soll im Folgenden verdeutlicht werden, in welchem Umfang natürliche Ressourcen bekannt sind, welche Ergebnisse aus der weiteren Erkundung zu erwarten sind und unter welchen Randbedingungen die daraus resultierende Reichweite – also ressourcenbedingte Lebensdauer der Kernenergiegewinnung überhaupt – zu quantifizieren und zu bewerten ist. Eine (zu) simple Betrachtung beruht auf der Berechnung der Reichweite T [a] aus der Menge der abbaubaren Uranressourcen R [t U] und dem jährlichen Uranverbrauch V [t U/a] mithilfe der Formel (1):

$$T = R/V \quad (1)$$

Im Folgenden sei diskutiert, wie sich die Höhe bekannter Ressourcen in ihrer Zeitabhängigkeit bisher entwickelt hat und von welcher Prognose bei einer Reichweitendiskussion ausgegangen werden sollte.

Der Verbrauch ist eine integrale Größe und wird von der gesamten Elektroenergieproduktion aus Kernenergie einerseits sowie aus den relevanten Wirkungsgraden bei der Brennstoffgewinnung, dem Reaktorbetrieb, einschließlich des „Brütens“ neuen thermisch spaltbaren Materials in Reaktoren mit einer hohen Flusssdichte an schnellen Neutronen, d. h. Umwandlung des in konventionellen thermischen Reaktoren faktisch nicht genutzten Uranisotops U-238 in thermisch spaltbares U-239 und weitere Transurane sowie der Rezyklierung der Transurane, d. h. der energetischen Umsetzung von Transuranen, die sich im Reaktorbetrieb bilden und den langlebigen Anteil des heutigen Reaktorabfalls ausmachen, bestimmt. Berücksichtigt man diese Faktoren, also:

- Energieausbeute A [GWh/t U] pro Uranmenge – bezogen auf die eingesetzte Uranmenge – und deren Abhängigkeit von den Faktoren:
 - Verwertungsfaktor F_1 des Urans bei der Brennstoffherzeugung,

$$T = (R \cdot A)/E \quad (2)$$

where A is a function of the three factors F₁, F₂ and F₃, that is, A = f(F₁, F₂, F₃).

The burn-up indicates the released heat energy which will be generated per mass unit of nuclear fuel. Since nuclear fuels have no intrinsic burning value, these burn-ups are reactor-specific. The burn-up thus represents a measure for the nuclear fuel efficiency of the reactor. The "Generation IV" initiative is designed to develop new reactors and nuclear fuels, aimed at maximum safety and profitability of NPPs, significant reduction of the demand for uranium, production of less and short-lived radioactive waste, and better protection against the abuse of peaceful nuclear technology for military purposes. This development has a clear influence on demand of uranium (4).

The described connections influence the following discussion the current data and trends. Since the time scale discussed takes into account at least the current century, technological concepts of nuclear energy should also be taken into the consideration, e.g. new possible reactor technologies.

Uranium price development

To assess the economic criteria, a short consideration of the development of the uranium price on the world market is appropriate. The price of uranium determines the development of different ore categories or sites, and has always been related with expenditures for exploration, which have a direct impact on the discovery of new resources. After a rise in uranium demand caused by the construction of numerous nuclear power plants in the 1970s, the price of uranium remained at a relatively high level, followed by a decline in the acceptance and build rate of nuclear technology, reflected in the price, not least due to the reactor accidents of Three Mile Island and Chernobyl (Figure 2).

By the year 2000, the cumulative and annual uranium production was clearly above the consumption in nuclear power plants. The reason for this was the military use and the creation of strategic reserves. This situation changed around the year 2000. From about 1993, only about 60% of the actual uranium consumption was being produced by mining. The uranium price rose significantly from 2004, when the secondary sources of uranium fuel and the global renaissance on the nuclear energy sector were reducing, reaching in 2007 the historic high spot price of US\$ 303/kg U₃O₈. Since this historic high, the spot price of uranium has fallen considerably again. However, annual uranium production from mining operations continued to rise, reaching 90% of world uranium consumption in 2015. At present, the uranium spot price fluctuates around US\$ 50/kg U₃O₈. The reason for the price decline is quickly explained. Kazakhstan rose to become the absolute world market leader, and produced around 39% of the world-wide U₃O₈ volume in 2015, which resulted in an enormous price pressure and thus a drop in prices (Figure 2).

Uranium deposits and production

Uranium is an ordinary metal and occurs just as frequently as the metals tin or tungsten, much more frequently than silver and is about 500 times more common than gold. The mean concentration in the earth's crust is about 4 ppm; in seawater, there are

- Reaktorwirkungsgrad F₂ (Abbrand an thermisch spaltbarem Uran) und
- Brut- und Rezyklierungsfaktor F₃,

in Relation zur gesamten Elektroenergieproduktion E [GWh/a] aus Kernenergie, so folgt daraus eine nach wie vor vereinfachte Beziehung gemäß Formel (2):

$$T = (R \cdot A)/E \quad (2)$$

wobei A eine Funktion der drei Faktoren F₁, F₂ und F₃ ist.

Der Abbrand bezeichnet die freigesetzte Wärmeenergie, die pro Masseneinheit Kernbrennstoff erzeugt wird. Da Kernbrennstoffe keinen Brennwert besitzen, sind diese Abbrände reaktorspezifisch. Der Abbrand stellt somit ein Maß für die Brennstoffeffizienz des Reaktors dar. Mit der Initiative „Generation IV“ sollen neue Reaktoren und Brennstoffe entwickelt werden, mit denen man auf höchste Sicherheit und Wirtschaftlichkeit bei Kernkraftwerken (KKW) abzielt, einen deutlich reduzierten Uranbedarf, weniger und kurzlebige radioaktive Abfälle und eine Erschwerung des Missbrauchs friedlicher Atomkraft für militärische Zwecke. Dies hat auch Einfluss auf den Uranbedarf (4).

Die dargestellten Zusammenhänge dienen im Folgenden der Diskussion zu gegenwärtigen Daten und Trends. Da es sich um eine Betrachtung handelt, die in der Zeitskala zumindest das laufende Jahrhundert berücksichtigt, sollen technologische Konzepte der Nukleartechnologie, z.B. neuer möglicher Reaktorgenerationen, in die Betrachtung einfließen.

Uranpreisentwicklung

Zur Bewertung wirtschaftlicher Kriterien ist eine kurze Betrachtung der Entwicklung des Uranpreises auf dem Weltmarkt angebracht. Der Uranpreis bestimmt die Abbauwürdigkeit von verschiedenen Erzkatégorien bzw. Standorten und war in der Vergangenheit immer mit den getätigten Aufwendungen für die Erkundung korreliert, was einen direkten Einfluss auf die Entdeckung neuer Ressourcen hat. Nach dem Anstieg des Uranbedarfs durch den Bau zahlreicher KKW hielt sich der Uranpreis in den 1970er Jahren auf einem relativ hohen Niveau, gefolgt von einem Rückgang durch die Rezession in der Nukleartechnologie, nicht zuletzt verursacht durch die Reaktorunfälle von Three Mile Island und Tschernobyl (Bild 2).

Bis zum Jahr 2000 lag die Uranproduktion immer deutlich über dem Verbrauch in Kernkraftwerken. Ursache hierfür war die militärische Nutzung und das Anlegen strategischer Reserven. Dies änderte sich um das Jahr 2000. Zudem wurden seit etwa dem Jahr 1993 nur noch ungefähr 60% des eigentlichen Uranverbrauchs produziert. Erst durch das Versiegen der sekundären Quellen für Uranbrennstoff und die weltweite Renaissance auf dem Kernenergiesektor stieg der Uranpreis seit dem Jahr 2004 erheblich an und erreichte im Jahr 2007 das historische Hoch von 303 US-\$/kg U₃O₈.

Seit diesem historischen Hoch ist der Uranpreis wieder erheblich gesunken. Die jährliche Uranproduktion aus bergmännischer Gewinnung stieg aber weiter an und erreichte im Jahr 2015 90% der weltweiten Uranproduktion. Gegenwärtig schwankt der Uranpreis um 50 US-\$/kg U₃O₈. Der Grund für den Preisrückgang liegt darin, dass Kasachstan zum Weltmarktführer aufgestiegen ist und im Jahr 2015 ca. 39% der weltweiten Menge U₃O₈ produzierte, was zu einem enormen Preisdruck und damit Preisrückgang führte (Bild 2).

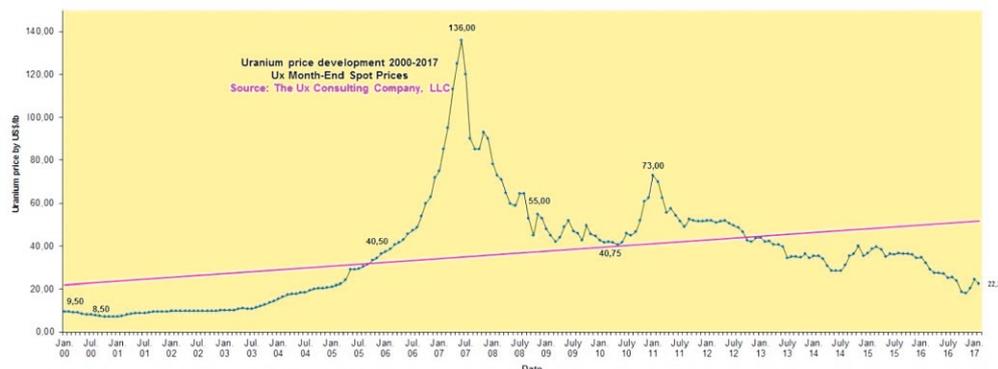


Fig. 2. Uranium price development since 1970 up to present, according to data from Ux Consulting LLC (5).
Bild 2. Uranpreisentwicklung seit 1970 bis zur Gegenwart nach Angaben von Ux Consulting LLC (5).

about 3,3 mg of uranium per cubic meter of seawater (3,3 ppb). The total uranium content of the Earth's crust is estimated to be almost $41 \cdot 10^{12}$ t. Of this, about three quarters is on the continents and the rest is dissolved in seawater. Plutonic rocks, such as granite, contain about 4 ppm of uranium; in sedimentary rocks, the average content is only half as high. A uranium ore content of 0,03 % (300 ppm U) is considered low grade. In Kazakhstan, uranium is exploited by the use of in-situ leaching (ISL), but with a grade generally only from 0,1% (1000 ppm U). High grade uranium ore (rich ore) has a uranium content of the order of 2 % (20,000 ppm U) and beyond. Most of the high grade deposits are located in the Canadian Athabasca Basin in North Saskatchewan.

The mining of uranium takes place depending on the deposit type. In brief, one differentiates between volcanogenic and sedimentary deposits. In the literature, 14 different deposit types are described (6). Conventional ore mining (underground or open-cast mining) with further ore processing is supplemented by the method of in-situ leaching, which is used in permeable sedimentary formations (Figure 3).

The mining of uranium has shifted significantly from conventional ore mining to the ISL extraction. Currently opencast mining is carried out only in a few sites. This means that miners today

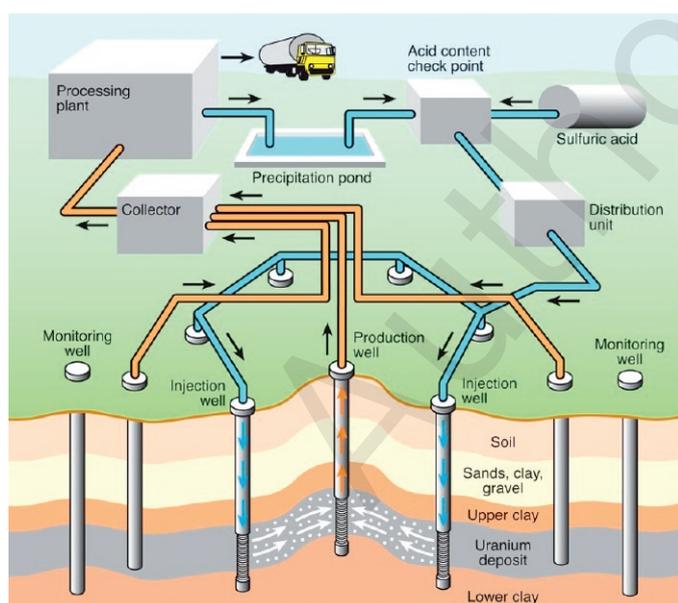


Fig. 3. Principle of In-Situ-Leaching (ISL) of Uranium with leaching circuit and milling facility (7).

Bild 3. Prinzip der In-Situ-Laugung (ISL) von Uran mit Lösungskreislauf und Aufbereitungsanlage (7).

Uranvorkommen und –gewinnung

Uran ist ein gewöhnliches Metall und kommt ebenso häufig vor wie die Metalle Zinn oder Wolfram, aber viel häufiger als Silber und rd. 500 Mal häufiger als Gold. Die mittlere Konzentration in der Erdkruste liegt bei etwa 4 ppm, im Meerwasser finden sich etwa 3,3 mg Uran pro Kubikmeter Meerwasser (3,3 ppb). Der gesamte Urangehalt der Erdkruste wird auf knapp $41 \cdot 10^{12}$ t geschätzt. Davon liegen etwa drei Viertel auf den Kontinenten, der Rest ist im Meerwasser gelöst. Tiefengesteine wie Granit beinhalten rd. 4 ppm Uran, in Sedimentgesteinen ist der Gehalt im Mittel nur halb so hoch. Von Uranerz (Armerz) spricht man ab Gehalten von 0,03 % (300 ppm U). In Kasachstan wird Uranerz mit diesen Gehalten durch Anwendung der In-Situ-Laugung (ISL) ausgebeutet, in der Regel aber erst ab 0,1% (1.000 ppm U). Hochgradiges Uranerz (Reicherz) hat Urangehalte von 2 % (20.000 ppm U) und darüber hinaus. Die meisten Reicherz-Lagerstätten befinden sich in Kanada, im Athabasca-Becken im Norden der Provinz Saskatchewan.

Die Gewinnung von Uran erfolgt in Abhängigkeit vom Lagerstättentyp. Prinzipiell unterscheidet man vulkanogene und Sedimentlagerstätten. In der Literatur werden 14 verschiedene Lagerstättentypen beschrieben (6). Konventioneller Erzabbau (unter Tage oder im Tagebau) mit weiterer Erzaufbereitung wird ergänzt durch die Methode der In-Situ-Laugung, die in permeablen Sedimentformationen ihre Anwendung findet (Bild 3).

Dabei hat sich der Abbau des Urans vom konventionellen Erzabbau zur ISL-Gewinnung deutlich verschoben. Der Abbau im Tagebau erfolgt nur noch an wenigen Orten. Damit werden die Bergleute heute deutlich weniger mit Staub belastet, der wohl größten Gefahrenquelle. Die verschiedenen Abbaumethoden und deren Gewichtung sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Typische Beispiele der ehemaligen Urangewinnung in Deutschland sind der Erzabbau aus der hydrothermalen Ganglagerstätte Schlemma/Alberoda oder die spezifische ISL-Gewinnung aus der Sedimentlagerstätte Königstein. ISL wird heute hauptsächlich in Kasachstan, Australien und in den USA betrieben. Dabei tritt Uran häufig im Verbund mit anderen Metallen auf, z.B. Gold, Kupfer, Vanadium, und wird als Nebenprodukt gewonnen, insbesondere in Fällen mit geringeren Urangehalten im Erz – wobei aber die Kombination der Produktion verschiedener Rohstoffe eine wirtschaftliche Verwertung des Urans zulässt.

Dies geschieht z.B. in Südafrika und in Australien. Bekanntestes Beispiel ist die ursprünglich als Kupferbergwerk aufgeschlossene Lagerstätte Olympic Dam im Bundesstaat South Australia (Bild 4).

are, on average, significantly less exposed to dust, which is probably the greatest source of danger. The various mining methods of uranium and their weighting are summarized in Table 1.

Typical examples of the former uranium extraction in Germany are the ore mining from the hydrothermal vein deposit Schlemma/Alberoda or the conventional and in situ block leaching mining from the sedimentary deposit Königstein. Today ISL is mainly operated in Kazakhstan, Uzbekistan, Australia and the USA. Uranium is frequently found in combination with other metals, e.g., gold, copper, vanadium, and is mined as a by-product, especially in cases where the uranium grade itself is low. The combination of the production of different raw materials permits an economic utilization of uranium that would otherwise be uneconomic. This happens, e.g., in South Africa and Australia. The best known example is the Olympic Dam deposit in South Australia (Figure 4), which is principally a copper mine.

Uranium resources

As a rule, a reserve is understood to be the known quantity of a raw material which can be mined economically using the existing mining methods. There are numerous differentiations, which are defined differently in different parts of the world. In the known quantities of a raw material, a distinction is made between the reserves (explored and therefore credible) as well as the prognosticated and speculative resources. The resources identified are also differentiated according to being sufficiently secured (RAR – Reasonably Assured Resources) and derived (Inferred Resources) inventories. Resources are also differentiated according to probable specific mining costs. Ultimately, the economics of the uranium production depend on a great extent on the world market price. The term “reserve” in common understanding is the one quantity of raw material, which in the present or the future is actually economically minable with existing and approvable facilities, in contrast to less well known “resources”, which may or may not be exploitable.

The most reliable and complete source to data about uranium resources is the “Uranium: Resources, Production and Demand” report or “Red Book” (9), published every two years since 1965, jointly funded by the Nuclear Energy Agency of the OECD (OECD/



Fig. 4. Polymetallic deposit Olympic Dam in South Australia, Mining of copper, gold, silver and uranium.

Bild 4. Polymetallische Lagerstätte Olympic Dam/South Australia, Gewinnung von Kupfer, Gold, Silber und Uran.

Source/Quelle: World Nuclear Association, Dec. 2016.

Method	t U 2014	% 2014	t U 2015	% 2015
Conventional underground	23 679	42%	27 791	46%
Conventional open pit				
In situ leaching (ISL)	28 467	51%	29 197	48%
By-product	4 107	7%	3 507	6%

Table 1. Various mining methods of uranium (9).

Tabelle 1. Durch verschiedene Abbaumethoden produziertes Uran (9).

Uranressourcen

Unter einer Ressource versteht man in der Regel die bekannte Menge eines Rohstoffs, die mit den bekannten Abbaumethoden nach dem Stand der Technik wirtschaftlich gewonnen werden kann. Hierbei gibt es zahlreiche Differenzierungen, die in verschiedenen Teilen der Welt unterschiedlich definiert sind. Bei den bekannten Mengen eines Rohstoffs unterscheidet man zwischen den nachgewiesenen (erkundeten und damit glaubwürdigen) sowie den prognostizierten sowie spekulativen. Bei den nachgewiesenen Ressourcen differenziert man zusätzlich nach hinreichend gesicherten (RAR – Reasonably Assured Resources) und abgeleiteten (Inferred Resources) Vorräten. Ressourcen werden ebenfalls nach wahrscheinlichen spezifischen Abbaukosten differenziert. Die Wirtschaftlichkeit der Urangewinnung hängt letztlich in starkem Maß vom Weltmarktpreis ab. Im Unterschied zum Begriff Ressource ist im gängigen Verständnis eine Reserve diejenige Rohstoffmenge, die künftig tatsächlich mit vorhandenen und genehmigten Anlagen abbaubar ist. Die zuverlässigste und vollständigste Quelle zu Daten über Uranressourcen ist der seit dem Jahr 1965 alle zwei Jahre erscheinende Bericht „Uranium: Resources, Production and Demand“, der gemeinsam von der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD und der International Atomic Energy Agency (IAEA) herausgegeben wird (9), das sogenannte „Red Book“. Die Ausgabe aus dem Jahr 2014 enthält die in Tabelle 2 zusammengefassten Daten.

Resource category	2011	2013	Change (1 000 t U)	% change
Identified (Total)				
< 260 US-\$/kg U	7 096,0	7 635,2	538,6	7,6
< 130 US-\$/kg U	5 327,2	5 902,9	575,7	10,8
< 80 US-\$/kg U	3 078,5	1 956,7	-1 121,8	-36,4
< 40 US-\$/kg U	680,9	682,9	2,0	0,3
RAR				
< 260 US-\$/kg U	4 378,7	4 587,2	208,5	4,8
< 130 US-\$/kg U	3 455,5	3 698,9	243,4	7,0
< 80 US-\$/kg U	2 014,8	1 211,6	-803,2	-39,9
< 40 US-\$/kg U	493,9	507,4	13,5	2,7
Inferred resources				
< 260 US-\$/kg U	2 717,9	3 048,0	330,1	12,1
< 130 US-\$/kg U	1 871,7	2 204,0	332,3	17,8
< 80 US-\$/kg U	1 063,7	745,1	-318,6	-30,0
< 40 US-\$/kg U	187,0	175,5	-11,5	-6,1

Table 2. Changes in identified resources 2011 – 2013 (9).

Tabelle 2. Veränderung von 2011 – 2013 bei nachgewiesenen Ressourcen (9).



Fig. 5. Uranium deposits and mines in Australia (9).

Bild 5. Uranlagerstätten und Abbaustandorte in Australien (9).

NEA) and the International Atomic Energy Agency (IAEA). The output from the 2014 Red Book contains the data summarized in Table 2. Table 2 also sets out the definitions of the different categories of resources presented. The resources identified in 2013 amounted to 16.2 mt U, while the probable inventories in 2005 were only of the order of 14.8 mt U. In 1965 – the year of first publishing of the “Red Book” – the well-known probable inventories amounted to only 3.2 mt U. This development is based on continual exploration, noting that the exploration costs spent worldwide are clearly correlated with the market price of uranium. As a result of the rise in uranium prices since 2004, up until the time of data included in the 2014 Red Book exploration expenditures in the world had risen enormously but had not been significantly influenced by the meanwhile decline in prices. The current amount of described uranium resources has doubled since the 1980s of the last century. Australia reported an increase in land resources of about 36 % in 2007 as a result of updating the data for Olympic Dam and the discovery of the Four Mile deposit at Beverley (20), the first new discovery in Australia since Kintyre (Figure 5).

In addition to the above mentioned uranium resources, the metal is found in phosphate deposits (with 50 to 200 ppm). The earlier uranium mining from phosphate deposits was abandoned due to the price collapse at the beginning of the 1980s. The total uranium resources in such deposits are of the order of 9 mt, with the main share of almost 7 mt in Morocco (10).

In addition, the global thorium resources are reported in (9), being 6.3 mt Th in 2013. Thorium, Th-232, is principally found in the heavy mineral coastal sands of Australia, Brazil, India, Mozambique, South Africa and the East of the USA. It is first used experimentally in liquid-fluoride-thorium reactors and in high-temperature reactors. The use of thorium, so one can also argue, if commercialized, will spare the uranium reserves.

Table 3 shows the distribution of the detected uranium resources to the countries of the earth. Table 4 shows various ore categories according to uranium content, the worldwide share of

Darin sind auch die zugeordneten Definitionen der verschiedenen Kategorien der Ressourcen dargelegt. Die im Jahr 2013 bekannten nachgewiesenen Ressourcen beliefen sich auf 16,2 Mio. t Uran, während die wahrscheinlichen Vorräte noch im Jahr 2005 nur in der Größenordnung von 14,8 Mio. t angegeben wurden. Im Jahr 1965 – dem Jahr der Ersterscheinung des „Red Book“ – lagen die bekannten wahrscheinlichen Vorräte noch bei 3,2 Mio. t. Diese Entwicklung beruht auf der fortlaufenden Erkundung, wobei die weltweit aufgewandten Erkundungskosten deutlich mit dem Marktpreis des Urans korrelieren. Durch den Uranpreisanstieg seit dem Jahr 2004 sind die Erkundungsaufwendungen in der Welt enorm gestiegen und wurden auch durch einen zwischenzeitlichen Preisrückgang nicht wesentlich beeinflusst. Die aktuelle Zahl der nachgewiesenen Uranressourcen hat sich seit den 1980er Jahren verdoppelt. Australien berichtete im Jahr 2007 über eine Erhöhung der Landesressourcen um etwa 36 %, bedingt durch die Aktualisierung der Daten für Olympic Dam und die Entdeckung der Lagerstätte Four Mile bei Beverley, die erste Neuentdeckung in Australien seit Kintyre (Bild 5).

Zusätzlich zu den oben genannten Uranvorräten findet sich das Metall in Phosphatlagerstätten (mit 50 bis 200 ppm). Die frühere Urangewinnung aus Phosphatlagerstätten wurde aufgrund des Preiseinbruchs zu Beginn der 1980er Jahre aufgegeben. Die gesamten Uranvorräte in solchen Lagerstätten liegen in der Größenordnung von 9 Mio. t mit dem Hauptanteil von knapp 7 Mio. t in Marokko (10).

Zusätzlich gibt das Red Book die weltweiten Thorium-Ressourcen mit 6,3 Mio. t im Jahr 2013 an. Thorium (Th-232) befindet sich vorrangig in den Schwersanden (deposits of heavy mineral coastal sands) in Australien, Brasilien, Indien, Mosambik, Südafrika und im Osten der USA. Es findet Verwendung vor allen Dingen in Flüssigfluorid-Thorium-Reaktoren und in Hochtemperaturreaktoren. Der Einsatz von Thorium – so kann man auch argumentieren – schont die Uranvorräte.

Tabelle 3 gibt die Aufteilung der nachgewiesenen Uranressourcen auf die Länder der Erde wieder. Tabelle 4 klassifiziert ver-

country	tonnes U	% of world
Australia	1706100	28,93 %
Kazakhstan	679300	11,52 %
Russia Fed	505900	8,58 %
Canada	493900	8,38 %
Niger	404900	6,87 %
Namibia	382800	6,49 %
South Africa	338100	5,73 %
Brazil	276100	4,68 %
USA	207400	3,52 %
China	199100	3,38 %
Mongolia	141500	2,40 %
Ukraine	117700	2,00 %
Uzbekistan	91300	1,55 %
Botswana	68800	1,17 %
Tanzania	58500	0,99 %
Jordan	40000	0,57 %
Other	191500	3,25 %
World total	5902900	100 %

Table 3. RAR: 130 US\$/kg U of the main countries (9).

Tabelle 3. RAR: 130 US\$/kg U zugeordnet den Ländern (9).

Production method	<USD 40/kgU	<USD 80/kgU	<USD 130/kgU	<USD 260/kgU
Open-pit mining	8 160	80 141	918 993	1 142 771
Underground mining	331 450	479 089	944 213	1 400 659
In situ leaching acid	96 690	408 864	493 333	542 333
In situ leaching alkaline	0	36 592	88 530	110 991
Co-product/by-product	71 100	201 924	1 199 336	1 303 453
Unspecified	0	4 990	54 495	86 993
Total	507 400	1 211 600	3 698 900	4 587 200

Table 4. Reasonably assured resources by production method (g).
Tabelle 4. RAR den Abbaumethoden zugeordnet (g).

the known resources and gives typical examples of existing uranium mines.

Uranium production versus demand

The number of reactors of nuclear power plants connected to the grid worldwide was 449 (IAEA/PRIS status 2017) with an installed electrical power of approximately 392 GWe. From the mined uranium ores, 71,343 t of U₃O₈ were produced in 2015, corresponding to 90% of the notified requirements (see Information Library of World Nuclear Association, March 2017). In 2005 the installed NPP output amounted to 368 GWe and 49,199 t U₃O₈ were produced from mined uranium ore, corresponding to 65% of the notified requirements (Table 5).

From this, it can be observed that a 4.73% higher demand for U₃O₈ contrasts to a 6.52% increase in nuclear power plant electrical performance. This indicates an increase in efficiency which relates to both the reactors and the fuel rods. This trend will surely intensify. It seems certain also that the performance of installed power plants will improve worldwide. However, it is also very likely that in the foreseeable future the improvement in power plant performance will be due both to the efficiency increase in the reactors as well as to the improvement the management and construction of fuel rods, e.g. by increased burn-off, such that the annual production of uranium can be held or be reduced for the same electrical output. The development of world uranium production and its share of total consumption are shown in Figure 6.

In 2015 about 90% of the demand was met by mined uranium. The remainder comes from secondary sources, which are



Fig. 6. Yearly World Uranium Production.
Bild 6. Jährliche Uranproduktion weltweit.

year	produced amount U ₃ O ₈ in t	Corresponds to part the annual demand	Corresponds 100% annual demand U ₃ O ₈ in t	Installed electrical powerplant performance
2005	49 199	65%	75 691 (100%)	368 GWe (100%)
2017	71 343	90%	79 270 (104,73%)	392 GWe (106,52%)

Table 5. Development of yearly demand U₃O₈ in relation to power plant output.
Tabelle 5. Entwicklung Jahresbedarf U₃O₈ gemäß Kraftwerksleistung.

schiedene Erzkatgorien nach ihrem Urangehalt sowie den weltweiten Anteil an den bekannten Ressourcen und gibt typische Beispiele existierender Uranbergwerke an.

Urangewinnung versus Bedarf

Die Anzahl der im Netz eingebundenen Reaktoren in KKW betrug weltweit 449 (IAEA/PRIS Stand 2017) mit einer installierten elektrischen Leistung von ungefähr 392 GWe. Aus den geförderten Uranerzen wurde im Jahr 2015 71.343 t U₃O₈ produziert, was 90% des angemeldeten Bedarfs entspricht (Informationsspeicher der World Nuclear Association (WNA) – Stand März 2017). Im Jahr 2005 betrug die installierte KKW-Leistung 368 GWe und es wurden 49.199 t U₃O₈ aus den geförderten Uranerzen hergestellt, was 65% des angemeldeten Bedarfs entsprach. Rechnet man die vorliegenden Zahlen hoch, ergibt sich das in Tabelle 5 dargestellte Ergebnis.

Daraus ist zu schließen, dass einem um 4,73% gestiegenen Bedarf an U₃O₈ eine um 6,52% höhere elektrische Kraftwerksleistung gegenübersteht. Dies weist auf eine Effizienzsteigerung hin, die sich sowohl auf die Reaktoren als auch auf die Brennstäbe bezieht. Dieser Trend wird sich vermutlich verstärken. Sicher scheint, dass sich weltweit die installierte Kraftwerksleistung erhöhen wird. Allerdings scheint auch sehr wahrscheinlich, dass in absehbarer Zeit die Steigerung der Kraftwerksleistung sowohl durch die Effizienzsteigerung bei den Reaktoren als auch durch die Brennstabsverbesserung, z.B. durch erhöhten Abbrand, so kompensiert wird, dass die jährliche Uranproduktion auf einem Niveau gehalten werden kann oder zurückgeht. Die Entwicklung der Welturanproduktion und deren Anteil am Gesamtverbrauch sind in Bild 6 dargestellt.

Im Jahr 2015 wurden etwa 90% des Bedarfs durch bergmännisch gewonnenes Uran gedeckt. Der Rest kommt aus sekundären Quellen, Tendenz weiter fallend, wie z. B. von Uranvorräten (Stockpiles an Natururan und angereichertem Uran), aus der Weiteranreicherung von Urananreicherungsrückständen, der (begrenzten) Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoff (inklusive recycliertem Pu für Mischoxidbrennstoff) sowie dem Blending mit hochangereichertem Uran aus strategischen Vorräten.

Im Jahr 2006 wurden weltweit 41% unter Tage, 24% im Tagebau, 26% mittels ISL und die restlichen 9% als Nebenprodukt gewonnen. Dies hat sich vollständig verändert. Im Jahr 2015 wurden 46% konventionell (unter Tage und im Tagebau), 48% mit ISL und 6% als Nebenprodukt gewonnen (Tabelle 1). Dass sich dieser Trend wieder umkehren kann, ergibt sich aus Tabelle 4, in der die Ressourcen den Abbaumethoden zugeordnet sind. Insbesondere

further decreasing, such as uranium stocks (stockpiles of natural uranium and enriched uranium), the enrichment of uranium enrichment residues, the (limited) reprocessing of nuclear fuel (including recycled Pu for mixed oxide fuel), and blending with highly enriched uranium from strategic inventories.

In 2006, 41% of worldwide uranium production was by underground mining, 24% by opencast mining, 26% by ISL and the remaining 9% as a by-product. This has changed now completely. In 2015, 46% was from conventional (underground and open pit mining), 48% by ISL and 6% as a by-product (Table 1). Table 1 shows that this trend could be reversed again, according to Table 4, where the resources are allocated to the mining methods. In particular, the dust development in the opencast mines has to be regarded as harmful to health, which is why the decline in the exploitation of opencast mining is to be welcomed from that perspective. However, in the long term almost completely automated mining in the opencast mines should be strived for, since the mining from opencast mining will again increase.

In 2014, the World Energy Outlook took an assessment of scenarios for the development of nuclear energy worldwide and an extension of the observation period until the year 2040. The scenarios were there classified as follows:

- a) Nearly unchanged tendency to decline nuclear energy production – Low-nuclear-case: Output of 366 GWe in 2040.
- b) Moderate increase in nuclear energy production – New policy scenario: 624 GWe output in 2040.
- c) High increase in nuclear power production – Highly-nuclear-case: Output of 767 GWe in 2040.

In the meantime, the period to 2040 can be fairly accurately predicted. Considering the requested and approved new constructions and expansions of nuclear power plants, overall the evidence speaks for scenario b). The increase in 2040 compared to 2015 is 60%. The increase is concentrated on China (46%) and India, Korea and Russia (30% together) and the US (16%), while the capacity of nuclear power in the EU decreases by 10%. The share of nuclear energy in the global energy mix will by then be reduced to 12%.

Furthermore, it can be seen in Table 2 that uranium deposits of interest are those whose production costs are < 40 US\$/kg U, regarding uranium-only deposits. However, the share of the high grade deposits continues to decline. It is interesting to take a look at the concentrations of uranium in the deposits, which are currently available. Over 60% of the published resources that are located in deposits with moderate (0.1 to 0.2%) or low (< 0.1%) uranium content. These are increasingly exploited, especially by means of ISL in sediment deposits. The enormous increase in the uranium mining in Kazakhstan, with a current share of approximately 39% (23,800 t) of world uranium production explains this. Another component in the contemplation of the adequacy of uranium supply is the extraction of uranium as a by-product as in the Olympic Dam deposit. From this largest copper-uranium deposit in the world copper, gold and silver are also mined, with a uranium content of about 0.05%. The opencast mine of Rössing in Namibia, with a uranium content of only 0.04%, can also be operated economically. These examples

die Staubentwicklung in den Tagebauen muss als gesundheitsgefährdend eingeschätzt werden, weswegen der Rückgang der Urangewinnung aus Tagebauen zu begrüßen ist. Allerdings sollte langfristig im Tagebau eine fast vollständig automatisierte Gewinnung angestrebt werden, da die Gewinnung aus solchen Minen wieder ansteigen wird.

Im Jahr 2014 nahm der World Energy Outlook der Internationalen Energieagentur (IEA) eine Präzisierung der Szenarien für die Entwicklung der Kernenergie weltweit und eine Erweiterung des Betrachtungszeitraums bis zum Jahr 2040 vor. Danach wurden die Szenarien wie folgt gegliedert:

- a) Nahezu gleichbleibende und tendenziell eher fallende Kernenergieproduktion – Niedrig-nuklearer Fall: Abgegebene Leistung von 366 GWe im Jahre 2040.
- b) Mäßiger Anstieg der Kernenergieproduktion – New-Policy-Szenario – Abgegebene Leistung 624 GWe im Jahr 2040.
- c) Hoher Anstieg der Kernenergieproduktion – Hoch-nuklearer Fall: Abgegebene Leistung von 767 GWe im Jahr 2040.

Inzwischen kann man den Zeitraum bis zum Jahr 2040 ziemlich genau voraussagen. Ausgehend von den beantragten und genehmigten Neu- und Ausbauten von KKW spricht alles für das Szenario b). Der Anstieg im Jahr 2040 gegenüber dem Jahr 2015 beträgt darin insgesamt 60%. Der Anstieg konzentriert sich auf China (46%) sowie Indien, Korea und Russland (zusammen 30%) und die USA (16%), während die Kapazität der Kernkraft in der EU um 10% bis zum Jahr 2040 abnimmt. Der Anteil der Kernenergie am weltweiten Energiemix wird aber auch dann nur 12% betragen.

Weiterhin ist zu erkennen (Tabelle 2), dass Lagerstätten von Interesse sind, deren Produktionskosten < 40 US-\$/kg Uran betragen, wenn es sich um reine Uranlagerstätten handelt. Allerdings nimmt der Anteil der Reicherzlagerstätten an der weltweiten Urangewinnung weiter ab.

Interessant ist ein Blick auf die Urankonzentrationen in den Lagerstätten, die gegenwärtig abgebaut werden. Über 60% der nachgewiesenen Vorräte befinden sich in Lagerstätten mit mäßigen (0,1 bis 0,2%) bzw. niedrigen (< 0,1%) Urangelhalten. Diese werden zunehmend abgebaut, insbesondere mittels ISL in Sedimentlagerstätten. Die enorme Steigerung der Urangewinnung in Kasachstan mit einem Anteil von derzeit ca. 39% (23.800 t) an der Welturanproduktion lässt sich so erklären.

Eine weitere Komponente in der Reichweitenbetrachtung ist die Gewinnung von Uran als Nebenprodukt wie in der Lagerstätte Olympic Dam in South Australia. Aus dieser größten Kupfer/Uran-Lagerstätte der Welt wird neben Kupfer, Gold und Silber auch Uran mit einem Gehalt von etwa 0,05% gewonnen. Auch der Tagebau von Rössing in Namibia mit einem Urangelhalt von nur 0,04% kann wirtschaftlich betrieben werden. Diese Beispiele belegen einen Trend, dass Armerzlagerstätten zunehmend ausgebeutet werden, insbesondere im Sedimentgestein, wo sich die ISL effektiv anwenden lässt.

Im Jahr 2015 wurden die durchschnittlichen standortbezogenen Produktionskosten mit 31 US-\$/lb (1 lb = 0,4536 kg) oder 63,98 €/kg ermittelt. Sie schwanken erheblich zwischen den Standorten mit relativ niedrigen spezifischen Kosten, wie im kanadischen Athabasca-Becken (zumeist Untertagebergbau), dem kasachischen Chu-

Type of deposit	Average Uranium concentration	Deposit
Very high-grade ore (Canada – Athabasca basin) – 20% U	200,000 ppm U	McArthur River, 25 %, (average 14.87%) Saskatchewan, Canada, UM
High-grade ore – 2% U,	20,000 ppm U	McClellan Lake, 2,4 %, (average 2.2%) Saskatchewan, Canada, OP and UM
Low-grade ore – 0.1% U,	1,000 ppm U	Schlema/Alberoda up to 0,5% Saxon Germany, UM
Very low-grade ore (Kazakhstan) – 0.01% U	100 ppm U	Chu-Syrdarya ore region (up to 0.07-0.08%) Kazakhstan, ISL
Granite	3 – 5 ppm U	
Sedimentary rock	2 – 3 ppm U	
Earth's continental crust (av)	2.8 ppm U	
Seawater	0.003 ppm U	

Table 6. Types of Uranium-deposits according classification of IAEA (UDEPO).
Tabelle 6. Arten von Uran-Lagerstätten nach Klassifizierung IAEA (UDEPO).

demonstrate a trend, that low grade deposits are increasingly exploited, where the ISL can often be applied effectively, especially in sedimentary rock.

In 2015, the average site-specific production costs were calculated as 31 \$/lb or 63.98 €/kg (1 lb = 0.4536 kg). These vary considerably between sites with relatively low specific costs, such as the Canadian Athabasca basin (mostly underground mining), the Kazakh Sarysu basin (ISL indicated with 12.71 \$/lb U₃O₈) and the Namibian Rössing open pit mine with over 30 \$/lb. The monthly spot market price fell below 20 \$/lb in 2016 (Figure 2). This puts additional pressure on locations with high production costs and led to suspension of some mine sites.

Adequate prices for uranium mining are therefore important because the cost of storage at the end of the life of a uranium mine and processing site must already be taken into account in the project costs (11). Closure planning has now become an integral part of any mining project, and it should be guaranteed that the necessary reserves (Court of Auditors) or irrevocable bank guarantees, which are made to ensure financial resources for safe closure will be available in the future (12). All this will have to be taken into account by the uranium market in its pricing.

However, since the uranium fuel is only about 20% (natural uranium as a raw material only about 5%) of the energy costs for nuclear energy – as opposed to about 80% in conventional fossil fuel power plants – a sustainable energy policy, based on nuclear energy, would tolerate higher production costs for uranium.

Over the last few years, the uranium production technologies have been further developed in connection with the implementation of significantly improved safety standards for humans and the environment. Apart from deposits with a high grade of uranium, the production of uranium from low and moderate grade deposits incur an increase in land consumption per kg of produced uranium. The fact that the closure costs in newly opening mines have remained consistently less than 10 US\$/kg in recent years is due to the fact that on the one hand the mining technologies have improved considerably, on the other hand the mining and processing technologies are coordinated so that the waste rock and the mill tailings remain largely in the excavation areas. In addition, increased the number of ISL sites have been developed, where the closure costs are relatively low. In some

Sarysu -Becken (ISL angegeben mit 12.71 US-\$/lb U₃O₈ und der namibischen Rössing Mine (Tagebau) mit über 30 US-\$/lb. Dabei fiel der monatliche Spotmarktpreis im Jahr 2017 auf unter 20 US-\$/lb (Bild 2), was zusätzlichen Druck auf Standorte mit hohen Produktionskosten ausübte und zur Stundung einiger, insbesondere afrikanischer Standorte – aber nicht nur dort – führte.

Auskömmliche Preise bei der Uranförderung sind deshalb von Bedeutung, weil die Kosten für die Verwahrung am Ende der Lebensdauer eines Urangewinnungs- und Aufbereitungsstandorts bereits in den Projektkosten zu berücksichtigen sind (11). Die Verwahrungsplanungen sind mittlerweile integraler Bestandteil jedes Bergbauprojekts und es wird garantiert werden müssen, dass über Rückstellungskontrollen (Rechnungshof) oder durch unwiderrufliche Bankgarantien die notwendigen finanziellen Mittel für die Verwahrung zukünftig auch bereit stehen (12). All dies wird der Uranmarkt bei seiner Preisnotierung zu berücksichtigen haben.

Da der Uranbrennstoff aber nur zu etwa 20% (Natururan als Rohstoff nur zu etwa 5%) die Energiekosten bei Kernenergie bestimmt – im Unterschied zu etwa 80% in herkömmlichen Kraftwerken auf Grundlage fossiler Brennstoffe – wäre eine nachhaltige Energiepolitik auf der Grundlage der Kernenergie auch bei Tolerierung höherer Produktionskosten für Uran nicht ausgeschlossen.

Die Technologien der Urangewinnung wurden in den letzten Jahren im Zusammenhang mit der Implementierung erheblich verbesserter Sicherheitsstandards für Mensch und Umwelt weiterentwickelt. Abgesehen von Lagerstätten mit hoher Urankonzentration, geht mit der Gewinnung von Uran aus Lagerstätten mit niedrigen und mäßigen Urankonzentrationen eine Vergrößerung der Landinanspruchnahme pro Kilogramm produzierten Urans einher. Dass die Verwahrungskosten für Neuaufschlüsse dennoch in den letzten Jahren weltweit konstant kleiner als 10 US-\$/kg geblieben sind, liegt daran, dass sich einerseits die Abbautechnologien wesentlich verbessert haben, andererseits die Gewinnungs- und Aufbereitungstechnologien so aufeinander abgestimmt sind, dass die Bergmassen und Aufbereitungsrückstände weitestgehend in den Abbaufeldern verbleiben. Hinzu kommt, dass vermehrt ISL-Gewinnungsstandorte erschlossen wurden, bei denen die Verwahrungskosten äußerst gering sind.

abandoned mine sites closure projects, the specific closure costs are considerably higher and often have to get paid by means of tax money (11).

The contact of mining personnel with mining contamination and thus radiation load have been significantly reduced or avoided in new plants. Modern mining facilities are already today largely to fully automated. Health, Safety, Environment and Community (HSEC) guidelines contain far-reaching restrictions that are subject to close control and regulation (21), in which non-compliances may be subject to penalties.

If uranium becomes scarce, it will also be mined from deposits which are considered unrealistic today. Therefore, it is certain that the resources of 16.2 mt reported in Table 4 will be increased further with the improving technological recovery and processing facilities and further exploration. They ultimately reflect only the current state of science and technology. The types of deposits and their classification are summarized in Table 6, according to the classification of the IAEA (UDEPO).

Technological trends of the nuclear fuel circulation and in utilization of uranium

Fuel for NPPs is obtained from the commercially available uranium product Yellow Cake (dried triuranium octoxide) after conversion to UF_6 , enrichment of thermally fissionable U-235 from 0.7% in natural uranium to about 3.3% to more than 4% and actually fuel pellet production (except: The CANDU type reactors allow the use of natural uranium as a fuel.). In addition to the introduction of more effective conversion technologies, an increasingly lower residual concentration – formerly 0.4%, trending now to 0.2% and less – is reached during enrichment. Thus, the uranium recycling factor F_1 implicitly introduced in Equation (2) increases during fuel production. In conventional nuclear power plants, a higher reactor efficiency F_2 (burn-up rate) is achieved in that numerous operators increase the degree of enrichment in the fuel and burn more intensively to U-235 ratios below 0.5%.

From the current data on uranium demand (71,343 t U_3O_8/a) and the production of electrical energy (392 GWe respectively 3.06×10^6 GWh/a)¹, results an electrical energy yield in high of about 44 GWh/t, of used natural uranium (0.7% U-235). According to the state of the art could today, from 1 t natural uranium an average of about 0.125 t of enriched uranium can be produced for fuel, at an assumed enrichment of 4.5% U-235 (WNA). On the other hand, the specific burn-off (specific released energy) has substantially increased to 45 GWd/tU² (13). From these current key figures are follow an energy yield A of 125 GWh/t natural uranium, which shows a clear trend compared to the above-mentioned traditionally energy yield, which by the present and future new construction of nuclear reactors of the third generation is strengthened.

If one wants to evaluate uranium demands numbers and adequacies in the long term, the developmental trends in reactor technology have to be taken into account. Several industrialized

Bei einigen Altstandortverwahrungsprojekten sind die spezifischen Verwahrungskosten erheblich höher und müssen zudem oftmals vollständig aus Steuermitteln aufgebracht werden (11).

Der Kontakt des bergmännischen Personals mit den Abbaukontaminationen und damit die Strahlenbelastung wurden in Neuanlagen deutlich reduziert bzw. vermieden. Moderne Bergwerksanlagen sind bereits heute weitestgehend automatisiert bis vollautomatisiert. In den Health, Safety, Environment and Community (HSEC)-Guidelines sind weitreichende Restriktionen enthalten, die scharf kontrolliert werden und deren Nichteinhaltung drastische Strafen nach sich ziehen (20).

Sollte sich der Energierohstoff Uran verknappen, wird man Uran auch aus Vorkommen gewinnen, die heute als unrealistisch angesehen werden. Deshalb ist es sicher, dass die in Tabelle 4 ausgewiesenen Ressourcen von 16,2 Mio. t sich mit den wachsenden technologischen Gewinnungs- und Aufbereitungsmöglichkeiten weiter erhöhen werden. Sie spiegeln letztendlich nur den gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik wider. Die Lagerstättenarten und deren Klassifizierung sind in Tabelle 6 zusammengestellt, in Anlehnung an die Klassifizierung der IAEA (UDEPO).

Technologische Trends zum Brennstoffkreislauf und zur Uranverwertung

Brennstoff für KKW wird aus dem handelsüblichen Uranprodukt Yellow Cake (getrocknetes Triuranooctoxid) nach Konversion zu UF_6 , Anreicherung des thermisch spaltbaren U-235 von 0,7% im Natururan auf etwa 3,3 bis zu mehr als 4% und eigentlicher Brennelementherstellung gewonnen (ausgenommen: Reaktoren des CANDU-Typs, diese ermöglichen die Verwendung von Natururan). Neben der Einführung effektiverer Konversionstechnologien wird bei der Anreicherung eine zunehmend geringere Restkonzentration – früher 0,4%, Trend heute zu 0,2% und weniger – erreicht. Damit steigt der in der Formel (2) implizit eingeführte Uranverwertungsfaktor F_1 bei der Brennstoffherstellung. In herkömmlichen KKW wird ein höherer Reaktorwirkungsgrad F_2 (Abbrandrate) dadurch erreicht, dass zahlreiche Betreiber den Anreicherungsgrad im Brennstoff erhöhen und intensiver auf U-235-Anteile unter 0,5% abbrennen.

Aus den gegenwärtigen Daten zum Uranbedarf (71.343 t U/a) und der Elektroenergieproduktion aus KKW – 392 GW bzw. $3,06 \times 10^6$ GWh/a¹ – ergibt sich eine Elektroenergieausbeute in Höhe von etwa 44 GWh/t eingesetztes Natururan (0,7% U-235). Nach dem Stand der Technik können heute aus 1 t Natururan durchschnittlich etwa 0,125 t angereichertes Uran für Brennstoff bei einer angenommenen Anreicherung von 4,5% U-235 erzeugt werden (WNA). Andererseits hat sich der spezifische Abbrand (spezifische freigesetzte Energie) auf 45 GWd/t U² wesentlich erhöht (13). Aus diesen aktuellen Kennzahlen folgt eine Energieausbeute A von 125 GWh/t Natururan, woraus sich im Vergleich zur oben angegebenen herkömmlichen Energieausbeute ein klarer Trend ablesen lässt, der durch den gegenwärtigen und künftigen Neubau von Kernreaktoren der dritten Generation verstärkt wird.

¹ Subordinate 7,800 h of full load hours per year. This corresponds to an annual utilization rate of approximately 89%.

² Corresponds to GW days; t U – corresponds to the burn-up in t U or tonnes of heavy metal.

¹ Unterstellt 7.800 h Volllaststunden pro Jahr. Dies entspricht einem Jahresnutzungsgrad von ca. 89%.

² GWd entspricht Gigawatt Tage; t U – entspricht dem Abbrand in t U oder tSM – Schwermetall.

countries have joined together to the “Generation IV International Forum” (GIF)³. The aim is to develop new reactors and nuclear fuels, which:

- provide maximum safety and economy;
- drastically reduce uranium consumption;
- significantly reduce the amount and life of the radioactive waste; and
- further diminish the risk of the abuse of peaceful nuclear technology for nuclear weapons.

From more than 130 proposals of around the world, the GIF experts have selected six innovative reactor systems having the potential to achieve these goals. The reactor systems were selected, which are physically inherently safe and have a significantly higher burn-off rate expected. Introduction of such reactors is expected after the year 2030⁴. The task is to compare the different systems and to optimize them in terms of safety, resource management and waste reduction. The activities are integrated into EURATOM and IAEA programs.

Time range of the adequacy of the energy source uranium

From greatly simplified estimations of the range of the energy source in accordance with Equation (1), using the currently known uranium resources of approximately 10.3 mt U (Table 2: RAR total) and of the projected annual demand in the next years of 70,000 t/a, gives a time range of around 150 a. If one trusts the correctness of all currently published resources – including the prognosticated and speculative categories, but not including the uncertain ones – totaling 16.2 mt U (Table 2: Identified total) with unchanged projected production of 70 000 t U, uranium resources are adequate for about 235 a of reactor operation.

It has already been pointed out that the quantity of known uranium resources has doubled in the last 20 years (the approximately doubling effect observed in the 1980s relative to the 1960s, see “Red Book” history). The currently intensive exploration can certainly lead to a continuation of this trend. Finally, as regards the volume of production, reference should be made to the economic aspect of the production. With a shortage of fossil fuel reserves over the coming decades, which continue to cover the main share of energy supplies in the world, an increase in energy prices is unavoidable. Since the uranium price is only a very small part of the production costs for nuclear energy, the production of uranium with higher specific production costs can be expected to become increasingly economic, i.e. the proportion of minable uranium inventories is increasing pro rata. It is neither reasonable nor necessary that the uranium price falls below the production costs, all risks associated with the extraction, preparation and storage are to be covered.

At consideration of uranium which is taken from phosphate deposits, the time for which uranium is adequate is increased to

³ Participating countries were: Argentina, Brazil, China, France, Great Britain, Japan, Canada, Russia, Switzerland, South Africa, South Korea, the USA and the European Atomic Energy Community Euratom.

⁴ China is building the first NPP of the „IV generation“ in Shidao Bay in the coastal town of Rongcheng, which is to be connected to the grid at the end of 2017 by 200 MW.

Will man Uranbedarfzahlen und Reichweiten langfristig beurteilen, so hat man Entwicklungstendenzen in der Reaktortechnologie zu berücksichtigen. Mehrere Industrieländer haben sich zum “Generation IV International Forum” (GIF) zusammengeschlossen³. Ziel ist, neue Reaktoren und Kernbrennstoffe zu entwickeln, die

- höchste Sicherheit und Wirtschaftlichkeit bieten,
- den Uranverbrauch drastisch reduzieren,
- die Menge und Lebensdauer des radioaktiven Abfalls erheblich vermindern und
- den Missbrauch der friedlichen Kerntechnik für Kernwaffen noch weiter erschweren.

Aus über 130 Vorschlägen aus der ganzen Welt haben die Fachleute des GIF sechs innovative Reaktorsysteme ausgewählt, die das Potential haben, diese Ziele zu erreichen. Ausgewählt wurden die Reaktorsysteme, die physikalisch inhärent sicher sind und eine deutlich höhere Abbrandrate erwarten lassen. Mit der Einführung derartiger Reaktoren wird nach dem Jahr 2030 gerechnet⁴.

Die Aufgabe besteht darin, die verschiedenen Systeme zu vergleichen und unter den Gesichtspunkten Sicherheit, Ressourcenmanagement und Abfallreduzierung zu optimieren. Die Aktivitäten sind in Programme von EURATOM und IAEA integriert.

Reichweitenbewertung zur Energiequelle Uran

Schätzt man die Reichweite der Energiequelle stark vereinfacht gemäß der Formel (1) ab, so ergeben sich für die heute nachgewiesenen Uranressourcen in Höhe von etwa 10,3 Mio. t (Tabelle 2: RAR total) und dem hochgerechneten Jahresbedarf in den nächsten Jahren in Höhe von 70.000 t/a eine Reichweite von rd. 150 a. Vertraut man der Richtigkeit der gesamten gegenwärtig bekannten Ressourcen – einschließlich der prognostizierten und spekulativen, aber ausschließlich der unsicheren – in Höhe von insgesamt 16,2 Mio. t (Tabelle 2: Identified total) bei unveränderter hochgerechneter Gewinnung in Höhe von 70.000 t/a, erhält man eine Reichweite von etwa 235 a.

Es wurde bereits darauf verwiesen, dass sich die Höhe der bekannten Uranressourcen in den letzten 20 Jahren etwa verdoppelt hat. Der etwa gleiche Verdopplungseffekt wurde in den 1980er Jahren relativ zu den 1960er Jahren beobachtet (siehe „Red-Book“-Geschichte). Durch die jüngst intensivste Erkundung kann durchaus mit einer Fortsetzung dieses Trends gerechnet werden. Letztlich sei hinsichtlich des Produktionsaufkommens auf die ökonomische Seite der Urangeinnung hingewiesen. Mit einer Verknappung der Vorräte an fossilen Brennstoffen in den nächsten Jahrzehnten, die nach wie vor den Hauptanteil der Energieversorgung in der Welt decken, ist eine Erhöhung der Energiepreise unausweichlich. Da der Uranpreis an den Erzeugungskosten für Kernenergie nur einen sehr geringen Anteil ausmacht, wird der Abbau von Uran mit höheren spezifischen Produktionskosten zu-

³ Beteiligt waren: Argentinien, Brasilien, China, Frankreich, Grossbritannien, Japan, Kanada, Russland, die Schweiz, Südafrika, Südkorea, die USA und die Europäische Atomgemeinschaft Euratom

⁴ China baut in der Shidao-Bucht in der Küstenstadt von Rongcheng das 1. KKW der IV-Generation, das Ende 2017 mit 200 MW ans Netz gehen soll.

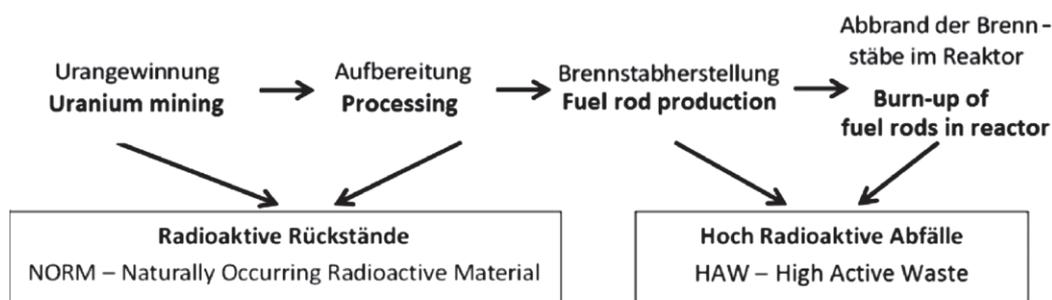


Fig. 7. Development phases of radioactive waste and residues.
Bild 7. Entstehungsphasen radioaktiver Abfälle und Rückstände.

more than 350 a. If the production of uranium from seawater is considered – an alternative that could be represented by the scarcity of energy resources worldwide – the time is theoretically increased by more than twenty thousand times. Thorium deposits are disregarded here.

As already shown, the energy yield per t U is significantly increased by higher uranium utilization during fuel production (F₁) and higher reactor efficiencies (F₂). In the case of a constant nuclear power generation, this could lead to a reduction in the uranium requirement in the range of some percent. This would be largely compensated by an increase in energy generation from nuclear power. However, the specific uranium consumption in the future would be considerably smaller with the new technological possibilities offered by nuclear technology (fourth generation reactors and the utilization of fuel breeding and energetic waste recycling – factor F₃). Their introduction is, however, very undefined, but could be implemented over the next 50 years meaning that the specific uranium consumption would be considerably smaller in the future. This would – depending on the actual extent of the future nuclear power generation – lead to a further increase of the time range for which the raw material uranium will last. The adequacy of the uranium resources cannot be used objectively as a reason to exit from the peaceful application of the nuclear energy.

Radioactive wastes and residues from uranium mining and the burn-up of fuel rods

Radioactive waste and residues arise in all phases from uranium mining and processing to the burn-up of the fuel rods (Figure 7) which must be encapsulated for long-term storage, so that no radioactive material can enter the biosphere from the repository, or only in a socially acceptable timescale.

Uranium in the ore is first processed up by physical and/or chemical processes from the rest of the rock.

- Physical processing processes: underground mining, opencast mining – the ore crushed (crushed, finely ground).
- Physical and chemical methods: heap leaching – the ore is piled 5 to 30 m high on an impermeable mat (pad) and soaked with acidic (or alkaline) solution. The uranium-loaded solution is collected and transported to the processing plant, as in the case of ISL.
- Chemical methods: in situ leaching (ISL) – uranium is separated from the rock formation (sedimentary rock) and the uranium-loaded solution is transported to the processing plant.

nehmend wirtschaftlich, d. h., der Anteil an abbauwürdigen Uranvorräten steigt anteilig. Es ist weder vernünftig noch notwendig, dass der Uranpreis unter die Produktionskosten fällt, sollen alle mit der Gewinnung, Aufbereitung und der Verwahrung verbundenen Risiken abgedeckt werden.

Bei Berücksichtigung des Urans in Phosphatlagerstätten erhöht sich die Reichweite bereits auf mehr als 350 a. Zieht man die Produktion von Uran aus Meerwasser in Betracht – eine Alternative, die bei Verknappung der Energieressourcen weltweit darstellbar wäre – so erhöht sich die Reichweite theoretisch um mehr als zwei Größenordnungen. Die Thorium-Vorkommen bleiben hier unberücksichtigt. Wie bereits dargestellt, erhöht sich die Energieausbeute pro Tonne Uran durch eine höhere Uranverwertung bei der Brennstoffherstellung (F₁) sowie höhere Reaktorwirkungsgrade (F₂) signifikant.

Im Fall einer gleichbleibenden Kernenergieerzeugung könnte dies zu einem Rückgang des Uranbedarfs um einige Prozent führen, die bei steigender Energieerzeugung aus Kernenergie den Zuwachs weitgehend kompensieren würden. Mit den angeführten neuen technologischen Möglichkeiten der Nukleartechnologie – Reaktoren der vierten Generation sowie der Ausnutzung von Brennstoffbrüten und energetischer Abfallverwertung – Faktor F₃ – deren Einführung allerdings sehr unbestimmt ist, aber im Verlauf der nächsten 50 Jahre erfolgen könnte, wäre der spezifische Uranverbrauch künftig deutlich kleiner und dies würde – natürlich in Abhängigkeit vom tatsächlichen Umfang der künftigen Kernenergiegewinnung – zu einer weiteren Erhöhung der Reichweite für den Rohstoff Uran führen. Die Reichweiten der Uranressourcen können daher sachlich für den Ausstieg aus der friedlichen Anwendung der Kernenergie nicht herangezogen werden.

Radioaktive Abfälle und Rückstände aus der Urangewinnung und aus dem Abbrand von Brennstäben

In allen Phasen von der Urangewinnung bis zum Abbrand der Brennstäbe fallen radioaktive Abfälle und Rückstände an (Bild 7), die langzeitsicher und -stabil verwahrt und abgekapselt werden müssen, sodass aus dem Endlager kein radioaktives Material oder nur im gesellschaftlich akzeptierten Umfang in die Biosphäre gelangen kann.

Zunächst wird das im Erz vorhandene Uran durch physikalische und/oder chemische Verfahren vom übrigen Gestein aufgeschlossen.

- Physikalische Aufschlussverfahren: Untertagebergbau, Tagebau – das Erz zerkleinert (gebrochen, fein gemahlen).
- Physikalische und chemische Verfahren: Haufenlaugung – gebrochenes Erz wird 5 bis 30 m hoch auf einer undurchlässigen



Fig. 8. Tailings storage (Tailings pond) of Olympic Dam (BHP Billiton).
Bild 8. Rückstandsspeicher (Tailings pond) von Olympic Dam (BHP Billiton). Photo/Foto: Lersow

Processing

- In the first processing step (heap leaching, ISL or in the processing facility) the uranium is dissolved (leached). This is done with acid or lye, adding an oxidizing agent to convert the uranium from the very poorly soluble chemically quadrivalent state to the readily soluble hexavalent form, which allows more than 90 % of the ore in uranium to be recovered.
- In the second step (in the processing plant) unwanted accompanying substances are removed in several cleaning steps by decanting, filtering, extracting, etc.
- In the third step uranium is precipitated from the liquid, e.g. by the addition of ammonia. The precipitated product (chemical: ammonium diuranate) is called "yellow cake" because of its yellow color.
- In the fourth step the ammonium diuranate is dried (containing 70 to 80 % by weight of uranium) and in many cases converted into uranium oxide (triuranium octoxide – U_3O_8) by calcination.

The uranium mill tailings are filled in into prepared hollow basins (dams) where the solid components sediment while the liquid covers the sediment and forms a pond. These basins are also referred to as settling basins or tailings storages, or sometimes tailings dams or ponds. They contain most of the activity of the original uranium ore (in the form of decay products of uranium, such as radium) and heavy metals. Figure 8 shows a tailings pond of copper and uranium processing at Olympic Dam (BHP Billiton). The inventory of the tailing pond "Helmsdorf" of the SDAG Wismut is listed in Table 7. After completion of the operation, the tailings storage from the uranium ore processing must be closed ensuring long-term safety and long-term stability (15).

Highly radioactive waste comes from burned-up nuclear fuel from NPPs. These are deposited, according to current philosophy, in repositories in deep geological formations. The first repository of this kind "Olkiluoto" in Finland will go into operation around 2022.

Table 8 summarizes the data of burned-up fuel elements used in criticality⁵ calculations.

⁵ Criticality: Critical state of a nuclear reactor or a nuclear material arrangement.

Matte (Pad) aufgehäuft und mit saurem (oder alkalischem) Lösungsmittel getränkt. Die mit Uran beladene Lösung wird gesammelt und zur Aufbereitungsanlage transportiert, weiter wie bei ISL.

- Chemische Verfahren: In Situ Leaching (ISL) – Uran wird aus dem Gesteinsverband (Sedimentgestein) gelöst, und die mit Uran beladene Lösung wird zur Aufbereitungsanlage transportiert.

Aufbereitung:

- Im ersten Schritt der Aufbereitung (Haufenlaugung, ISL oder in der Aufbereitungsanlage) wird das Uran herausgelöst (ausgelaugt). Dies geschieht mit Säure oder Lauge unter Hinzufügung eines Oxidationsmittels, um das Uran vom sehr schlecht löslichen chemisch vierwertigen Zustand in die gut lösliche sechswertige Form zu überführen. Auf diese Weise lassen sich über 90 % des im Erz befindlichen Urans gewinnen.
- Im zweiten Schritt (in der Aufbereitungsanlage) werden unerwünschte Begleitstoffe in mehreren Reinigungsschritten durch Dekantieren, Filtern, Extrahieren usw. entfernt.
- Im dritten Schritt wird aus der Flüssigkeit Uran ausgefällt, beispielsweise durch Zugabe von Ammoniak. Das ausgefällte Produkt – Ammoniumdiuranat – wird wegen seiner gelben Farbe als Yellowcake bezeichnet.
- Im vierten Schritt wird das Ammoniumdiuranat getrocknet – es enthält 70 bis 80 Gewichts-% U – und durch Kalzinierung in Uranoxid (Triuranooctoxid – U_3O_8) umgewandelt.

Die Rückstände aus der Uranaufbereitung (Uranium Mill Tailings) werden in vorbereitete Hohlformen (Becken) eingespült, in denen die festen Bestandteile sedimentieren, während die Flüssigkeit das Sediment bedeckt und einen Teich bildet (Tailings pond). Diese Becken werden auch Absetzbecken oder Rückstandsspeicher (Tailings storage) genannt. Sie enthalten den größten Teil des Aktivitätsinventars des ursprünglichen Uranerzes (in Form der Zerfallsprodukte des Urans wie beispielsweise Radium) sowie Schwermetalle. Bild 8 zeigt einen Tailings pond der Kupfer- und Uranerzaufbereitung des Gewinnungsstandorts Olympic Dam. Das Inventar des Tailings pond „Helmsdorf“ der SDAG Wismut ist in der Tabelle 7 aufgeführt. Nach Beendigung des Betriebs müssen die Rückstandsspeicher aus der Uranerzaufbereitung langzeitsicher und -stabil verwahrt werden (15).

Hochradioaktive Abfälle bilden die abgebrannten Brennelemente aus KKW. Diese werden nach derzeitiger Philosophie in Endlager in tiefen geologischen Formationen verbracht. Das erste Endlager dieser Art „Olkiluoto“ in Finnland wird etwa im Jahr 2022 in Betrieb gehen.

In der Tabelle 8 sind Daten abgebrannter Brennelemente zusammengestellt, wie sie in Kritikalitätsrechnungen⁵ verwendet werden.

Die Aktivität des Inventars eines Endlagers ist wesentlich größer als die von Rückstandsspeichern aus der Uranerzaufbereitung, etwa um den Faktor 10^3 bis 10^5 . Der wesentliche Unterschied besteht aber in der erheblich größeren Aktivitätsdichte (Aktivität/

⁵ Kritikalität: kritischer Zustand eines Kernreaktors oder einer Spaltstoffanordnung

Tailings Pond	Ai [Bq]	FGi [Bq]	Helmsdorf
			Ai/FGi
U-238+	1,27E+14	1,00E+04	1,27E+10
U-234	1,27E+14	1,00E+04	1,27E+10
Th-230	5,50E+14	1,00E+04	5,50E+10
Ra-226++	5,50E+14	1,00E+04	5,50E+10
U-235+	5,79E+12	1,00E+04	5,79E+08
Pa-231	2,51E+13	1,00E+03	2,51E+10
Ac-227+	2,51E+13	1,00E+03	2,51E+10
Ra-223+	2,51E+13	1,00E+05	2,51E+08
Total	1,44E+15		1,86E+11

Table 7. Radionuclide inventory in Tailings pond of SDAG Wismut-Helmsdorf – normalized to the exemption levels (FGi) according German Radiation Protection Ordinance, Annex III, Table 1, Inventory without pore water (15).

Tabelle 7. Radionuklidinventar Tailings pond der SDAG Wismut-Helmsdorf – normiert auf die Freigrenzen (FGi) der deutschen Strahlenschutzverordnung, Anlage III, Tabelle 1, Inventar ohne Porenwasser (15).

The activity of the inventory of a repository is significantly greater than that of the uranium ore deposits, approximately by a factor of 10^3 to 10^5 . The main difference, however, is the significantly greater activity density (activity/volume unit), which differ by a factor of 10^7 to 10^{10} . After removal, the fuel elements must first be brought into the cooling pond in order to cool them to a temperature so that they can be transported to the intermediate storage facility.

With the completion of the repositories in Scandinavia in southern Finland, the “nowhere to put the waste” argument against the operation of a NPP for energy production falls away, since the claim of the absence of a repository for the highly radioactive waste no longer exists. Nevertheless, even if all arguments raised against nuclear power were to be objectively disproved, but a majority of a society still decides against nuclear power, then it is accepted that nuclear power should be excluded or abolished in that society. People in their own country are sovereign to decide about the kind of nuclear power generation to employ, or to decide on its exclusion or abolition.

Summary and Outlook

A holistic view on the availability of the energy source uranium should include – in addition to the resources which are far from fully known – the different factors of the energy yield in nuclear

Volumeneinheit) die sich um den Faktor 10^7 bis 10^{10} unterscheidet. Brennelemente müssen nach der Entnahme erst ins Abkühlbecken verbracht werden, um sie auf eine Temperatur abzukühlen, damit sie ins Zwischenlager transportiert werden können.

Mit der Fertigstellung der Endlager in Skandinavien entfällt auch das Argument des Nichtvorhandensein eines Endlagers für die hochradioaktiven Abfälle gegen den Betrieb eines KKW zur Energiegewinnung.

Selbst wenn lediglich das Hauptargument verbleibt, dass eine Gesellschaft den Einsatz der Kernenergie für die Energiegewinnung mehrheitlich ablehnt, wiegt dieses so schwer, um davon Abstand zu nehmen, selbst wenn alle Einwendungen sachlich als geklärt angesehen werden können.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag verdeutlicht, dass eine ganzheitliche Betrachtung zur Verfügbarkeit der Energiequelle Uran neben den bei weitem nicht vollständig bekannten Ressourcen die verschiedenen Faktoren der Energieausbeute in Kernreaktoren unter der Berücksichtigung künftiger technologischer Möglichkeiten berücksichtigen sollte. Eine statische Sichtweise auf der Grundlage heute gesicherter Ressourcendaten und des heutigen Uranverbrauchs in KKW mit Reaktoren der zweiten Generation führt zu einer ggf. erheblichen Unterbewertung der Reichweite. Die weitere Erkundung von Ressourcen, der Fortschritt in der Nukleartechnologie sowie die Berücksichtigung ökonomischer Kriterien, die auch den Uranabbau aus Lagerstätten mit geringer Konzentration und/oder schwierigen Abbaubedingungen rechtfertigen könnten – bis hin zur Gewinnung aus Meerwasser – korrigiert eine vereinfachte Reichweitenabschätzung, z. B. durch Diehl (17), deutlich nach oben.

Die folgenden Kommentare fassen aktuelle Tendenzen und Problemstellungen zusammen:

- Schätzt man die Reichweite der Energiequelle stark vereinfacht gemäß der Formel (1) ab, so ergeben sich für die heute nachgewiesenen Uranressourcen in Höhe von etwa 10,3 Mio. t (Tabelle 2: RAR total) und dem hochgerechneten Jahresbedarf in den nächsten Jahren in Höhe von 70.000 t/a eine Reichweite von rd. 150 a. Vertraut man der Richtigkeit der gesamten gegenwärtig bekannten Ressourcen – einschließlich der prognostizierten und spekulativen, aber ausschließlich der unsicheren – in Höhe von insgesamt 16,2 Mio. t (Tabelle 2: Identified total)

fuel assembly ⁶ Brennelement ⁶	enrichment % U-235 or % Pu _{fiss} Anreicherung % U-235 bzw. % Pu _{fiss}	burn-up GWd/t SM Abbrand GWd/t SM	decay time / years Abklingzeit/ Jahre	% by weight U-235 Gew.-% U-235	% by weight Pu _{fiss} Gew.-% Pu _{fiss}	% by weight Pu _{total} Gew.-% Pu _{total}	% by weight U-238 Gew.-% U-238	% by weight other Gew.-% sonstige
du40a1e2	3,6% U-235	40	100	0,78	0,58	0,95	97,53	0,74
du55a1e2	4,4% U-235	55	100	0,67	0,65	1,14	97,19	1,0

Table 8. Characteristic data of the nuclide inventories used for criticality calculations (16).

Burn-up: with GWd/t heavy metal; Pu_{fiss} – (Pu-239 + Pu-241); Pu_{total} – (Pu-238 + Pu-239 + Pu-240 + Pu-241 + Pu-242 + Am-241)

Tabelle 8. Charakteristische Daten der für Kritikalitätsrechnungen verwendeter Nuklidinventare (16).

Abbrand: in Gigawatt-Tagen pro Tonne Schwermetall (GWd/t SM); Pu_{fiss} – (Pu-239 + Pu-241); Pu_{total} – (Pu-238 + Pu-239 + Pu-240 + Pu-241 + Pu-242 + Am-241)

⁶ Name: du – pressurized-water reactor – fuel (uranium dioxide); 40 – burn-up in GWd/t SM; a1e2 – decay time, here $1 \cdot 10^2$ a

⁶ Bezeichnung: du – DWR – Brennstoff (Urاندioxid); 40 – Abbrand in GWd/t SM; a1e2 – Abklingzeit, hier $1 \cdot 10^2$ a

reactors, taking into account future technological possibilities. A static viewpoint based on currently secured resource data and today's uranium consumption (in nuclear reactors with second generation reactors) possibly leads to an underestimation of the range. The further exploration of resources, the advance in nuclear technology as well as the consideration of economic criteria, which could also justify uranium mining from deposits with low concentration and/or difficult degradation conditions (up to the extraction of seawater), correct a simplified estimate of the extent of reach (12), clearly upwards.

The following comments summarize current trends and issues:

- If one estimates the reach of the energy source in a simplified manner according to the formula (1), the uranium resources identified today are approximately 10.3 mt of uranium and the extrapolated annual demand for the next few years is approximately 70,000 t/a, enough to last for 150 a. If one trusts the correctness of all currently known resources – including the prognosticated and speculative resources, but not the uncertain ones – of 16.2 mt of uranium at unchanged extrapolated production in the amount of 70,000 t/a, it lasts for 235 a. When the uranium in phosphate deposits is included, the reach increases to more than 350 a. The currently known thorium stocks increase the reach up to 450 a. If the production of uranium from seawater is taken into consideration – an alternative that can be represented at the scarcity of energy resources worldwide – the range is theoretically increased by more than two orders of magnitude. Therefore a shortage of resources for nuclear fuel is not apparent for long periods.
- The share of nuclear energy in global electrical energy production is currently about 19.6 % (WNA, 2016). Most likely scenario: Moderate increase in nuclear energy production – New Policy Scenario – by 2040.
- In 2015, 449 NPPs were grid-connected (IAEA/PRIS status 2017) with an installed electrical power of approximately 392 GWe. From the mined uranium ores, 71,343 t of U_3O_8 were produced in 2015, which corresponds to 90 % of the notified requirements. The New-Policy Scenario prognosticates an output of 624 GWe in 2040, which corresponds to an increase of 60 %.
- The increase is concentrated in China (46 %) and India, Korea and Russia (together 30 %) and the USA (16 %), while the capacity of nuclear power in the EU decreases by 10 %. However, the share of nuclear energy in the global energy mix will be 12 % in 2040.
- The dependence of raw materials supply in Europe, in particular for fossil fuels as well as its range on the basis of economically mineable inventories, has led to the fact that in some European countries the extraction of uranium ore for securing the national demand fuel, either continued is (e.g. Czech Republic) or will seriously be taken into consideration.
- The exploration of uranium deposits has been carried on with considerable intensity worldwide in recent years. A further increase in the known uranium resources is expected for the future.
- The advances in nuclear technology have led to a significant increase in the specific energy yield from uranium, that inventory range analyses must take into account. Third-generation reac-

bei unveränderter hochgerechneter Gewinnung in Höhe von 70.000 t/a, erhält man eine Reichweite von etwa 235 a. Bei Berücksichtigung des Urans in Phosphatlagerstätten erhöht sich die Reichweite auf mehr als 350 a. Rechnet man die derzeit bekannten Thorium-Vorräte dazu, erhöht sich die Reichweite auf 450 a. Zieht man die Produktion von Uran aus Meerwasser in Betracht – eine Alternative, die bei Verknappung der Energieressourcen weltweit darstellbar wäre – so erhöht sich die Reichweite theoretisch um mehr als zwei Größenordnungen. Eine Verknappung der Ressourcen für Kernbrennstoff ist auf lange Zeiten nicht erkennbar.

- Der Anteil der Kernenergie an der Weltelektroenergieproduktion beträgt derzeit etwa 19,6 % (WNA, 2016). Wahrscheinlichstes Szenario: Mäßiger Anstieg der Kernenergieproduktion – New-Policy-Szenario – bis zum Jahr 2040.
- Im Jahr 2015 waren 449 KKW netzgebunden (IAEA/PRIS Stand 2017) mit einer installierten elektrischen Leistung von ungefähr 392 GWe. Im Jahr 2015 wurden aus den geförderten Uranerzen 71.343 t U_3O_8 produziert, was 90 % des angemeldeten Bedarfs entsprach. Das New-Policy-Szenario prognostiziert eine abgegebene Leistung von 624 GWe im Jahr 2040, was einem Anstieg um 60 % entspricht.
- Der Anstieg konzentriert sich auf China (46 %) sowie Indien, Korea und Russland (zusammen 30 %) und die USA (16 %), während die Kapazität der Kernkraft in der EU um 10 % bis zum Jahr 2040 abnimmt. Der Anteil der Kernenergie am weltweiten Energiemix wird aber im Jahr 2040 nur 12 % betragen.
- Die Abhängigkeit der Rohstoffversorgung Europas, insbesondere von fossilen Energieträgern, sowie deren Reichweite auf der Grundlage wirtschaftlich gewinnbarer Vorräte hat dazu geführt, dass in einigen europäischen Ländern die Uranerzgewinnung zur Sicherung des nationalen Brennstoffbedarfs entweder fortgesetzt (Tschechien) oder ernsthaft in Betracht (z.B. Bulgarien) gezogen wird.
- Die Erkundung von Uranvorkommen ist in den letzten Jahren weltweit mit erheblicher Intensität fortgeführt worden. Es ist künftig mit einem weiteren Anstieg der bekannten Uranressourcen zu rechnen.
- Der Fortschritt in der Nukleartechnologie hat zu einer deutlichen Erhöhung der spezifischen Energieausbeute aus Uran geführt, was bei einer Reichweitenbetrachtung zu berücksichtigen ist. Durch die im Bau befindlichen oder geplanten Reaktoren der dritten Generation wird dieser Trend fortgesetzt und durch die Implementierung von Reaktoren der vierten Generation in Zukunft eine neue Dimension erlangen.
- Mit der Initiative „Generation IV“ sollen neue Reaktoren und Brennstoffe entwickelt werden, mit denen man auf höchste Sicherheit und Wirtschaftlichkeit bei KKW abzielt, einen deutlich reduzierten Uranbedarf, weniger und kurzlebigere radioaktive Abfälle und eine Erschwerung des Missbrauchs friedlicher Atomkraft für militärische Zwecke. Dies hat auch Einfluss auf den Uranbedarf (4).
- China baut in der Shidao-Bucht in der Küstenstadt Rongcheng das erste KKW der IV-Generation, das Ende 2017 mit 200 MW ans Netz gehen soll.
- In öffentlichen Diskussionen und in der Fachwelt wird die Frage nach der Akzeptanz der Kernenergie überhaupt sowie nach

- tors, which are currently under construction or planned, will continue this trend, and by the implementation of fourth-generation reactors in the future a new dimension will be reached.
- The “Generation IV” initiative is designed to develop new reactors and nuclear fuels with which one aims for maximum safety and profitability for NPPs, will also mean significantly reduced uranium requirements, less and more short-lived radioactive waste and better assurance of the use of peaceful nuclear power rather than for military purposes. This also has an influence on uranium requirements (4).
 - In China the first fourth-generation NPP in Shidao Bay in the coastal town of Rongcheng is under construction (200 MW), which will be connected to the grid at the end of 2017.
 - In public discussions and in the professional world, uranium use will be connected with the question of acceptance of nuclear energy at all, as well as to the adequacy of uranium ore supply, which is associated with further issues such as:
 - environmental and radiation risks in uranium mining and processing;
 - closure of the legacies of uranium ore mining and processing in connection with the aspect of approvals and economic safeguards (reserves/irrevocable bank guarantees) (12);
 - safety of Nuclear Power Plants (NPPs); and
 - storage and handling of nuclear waste from NPPs (19).
 - The changes in the uranium price have practically no or only a marginal impact on energy price development. The share of the uranium cost at the total cost of electricity generated from nuclear power is about 5%. An appropriate uranium price is necessary to operate the uranium mining and processing according to the highest international safety standards and to settle the costs for storage after the end of the life of the sites.
 - The climate change caused primarily by fossil fuels has pushed the future of nuclear power as a long-term alternative for sustainable energy production in the context with the economic expansion of renewable energies. National borders do not play a role in energy distribution, so that a sustainable energy policy can only be implemented globally in large economic areas.
 - Even if all arguments raised against nuclear power are objectively disproved, but the majority of a society decides against nuclear power, it is accepted that nuclear power should be excluded or abolished in this society. People are sovereign in their country to decide about the used kind of nuclear power generation, or to decide on its exclusion or abolition.

The societal task of generating energy, taking into account technological, economic, ecological and safety-relevant boundary conditions, will be decided in individual countries with a strong political influence. There are great differences with regard to Europe. While countries such as Finland and France are set up to replace old NPPs by the construction of new third-generation reactors, Germany will have carried out the exit of nuclear energy by 2022. Germany is not the only European country to renounce nuclear power, which has already occurred in Italy and Austria.

Although the borders between countries are gradually disappearing in Europe, unification of the energy supply is not yet apparent. Consequences of national energy policy, in particular

der Reichweite von Uranerzvorkommen verbunden mit weiterführenden Problemstellungen gestellt:

- Umwelt- und Strahlenrisiken in Uranbergbau und -aufbereitung,
- Verwahrung der Hinterlassenschaften der Uranerzgewinnung und -aufbereitung im Zusammenhang mit der genehmigungsseitigen und ökonomischen Absicherung (Rückstellungen/unwiderrufliche Bankbürgschaften) (12),
- weltweite Kontrolle über Uran und Kernbrennstoff (18),
- Sicherheit von Kernkraftwerken und
- Lagerung und Umgang mit Nuklearabfall aus KKW (19).
- Die Veränderungen im Uranpreis haben praktisch keinen oder nur einen marginalen Einfluss auf die Energiepreisentwicklung. Der Anteil der Urankosten an den Gesamtkosten für die Stromerzeugung aus Kernenergie beträgt etwa 5%. Ein angemessener Uranpreis ist notwendig, um die Urangerinnung und -aufbereitung entsprechend höchster internationaler Sicherheitsstandards zu betreiben und die Kosten für die Verwahrung nach Ende der Lebensdauer der Standorte abzudecken.
- Der primär durch fossile Energieträger verursachte Klimawandel hat die Zukunft der Kernenergie als Langzeitalternative für eine nachhaltige Energiegewinnung im Zusammenhang mit dem wirtschaftlichen Ausbau erneuerbarer Energien forciert. Für die Energieverteilung spielen Ländergrenzen keine Rolle, sodass eine nachhaltige Energiepolitik nur in global großen Wirtschaftsräumen durchgesetzt werden kann.
- Selbst wenn lediglich das Hauptargument verbleibt, dass eine Gesellschaft den Einsatz der Kernenergie für die Energiegewinnung mehrheitlich ablehnt, wiegt dies so schwer, um davon Abstand zu nehmen, selbst wenn alle Einwendungen sachlich als geklärt angesehen werden können.

Die gesellschaftliche Aufgabe der Energieerzeugung unter Berücksichtigung technologischer, ökonomischer, ökologischer und sicherheitsrelevanter Randbedingungen wird in den einzelnen Ländern nicht zuletzt politisch entschieden. Hier gibt es allein in Europa große Unterschiede. Während Länder wie Finnland und Frankreich auf den Ersatz auslaufender KKW durch den Bau neuer Reaktoren der dritten Generation setzen, wird Deutschland den Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2022 vollzogen haben. Selbst in Europa ist Deutschland mit dem Verzicht auf Kernenergie nicht allein, siehe Italien und Österreich.

Obwohl in Europa die Grenzen zwischen den Ländern zunehmend verschwinden, ist eine Vereinheitlichung der Energieversorgung derzeit nicht erkennbar. Konsequenzen nationaler Energiepolitik, insbesondere der Einfluss auf den Klimawandel, sind aber in hohem Maß global. Elektroenergie ist ihrer Natur nach quellenneutral. Die einzelnen Länder bestimmen die effiziente, nachhaltige, auf die gesellschaftlichen Bedürfnisse und die Umwelt abgestimmte Energie- und Rohstoffwirtschaft auf ihre Weise. Für strategische Entscheidungen zur Art der Energieversorgung sind ökonomische Kriterien ebenso wichtig wie Umwelt und Sicherheitsfragen, der technologische Fortschritt inklusive Investitionen in relevante Forschung und Entwicklung und nicht zuletzt die Nachhaltigkeit der Rohstoffversorgung für die Energieerzeugung. Prognosen zur Reichweite von Energieträ-

the impact on climate change, are, however, to a large extent global. Electrical energy is by its very nature source-neutral. The individual countries determine the efficient, sustainable energy and raw material management adapted to social needs and the environment in their own way. For strategic decisions on the type of energy supply, economic criteria are just as important as environmental and safety issues, technological progress (including investment in relevant research and development) and, last but not least, the sustainability of raw material supply for energy generation.

Forecasts on the adequacy of energy sources play thereby an important role. However, a society decides about the type of its energy supply. But this decision is a long term one and should not be corrected short term.

Acknowledgement

I might say many thanks Dr. Peter Woods (IAEA – Department of Nuclear Energy – Team Leader, Uranium Resources and Production – Vienna/Austria) for support with the translation into the English language version and suggestions for completing this paper. However, the interpretations and opinions given here are those of the author.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Lersow, M.; Märten, H.: Energiequelle Uran – Ressourcen, Gewinnung und Reichweiten im Blickwinkel der technologischen Entwicklung; Glückauf 144 (2008) Heft 3, S. 116–122.
- (2) World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements. <http://www.world-nuclear.org>; March 2017.
- (3) Nuclear Share of Electricity Generation in 2015. The Power Reactor Information System (PRIS), IAEA. <https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- (4) Generation vier: neue Wege bei der Kernspaltung. <https://www.kernenergie.ch>
- (5) Ux Consulting, LLC. www.uxc.com
- (6) Uranium Markets. <http://www.world-nuclear.org>; Updated December 2016.
- (7) Uranium biogeochemistry and mining. <https://goldsamples.wordpress.com/uranium/>
- (8) Australia's Uranium Mines. <http://www.world-nuclear.org>
- (9) Uranium 2014: Resources, Production and Demand. OECD 2014; NEA No. 7209. A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency.
- (10) Ragheb, M.: Uranium resources in phosphate rocks. <http://mragheb.com>; 11-23-2013.
- (11) Lersow, M.; Schmidt, P.: The Wismut Remediation Project, Mine Closure 2006. Perth, Western Australia, Proceedings, S. 181-190.
- (12) Waggitt, P.: Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus und deren Sanierung – ein Überblick von Afrika, Asien und Australien. Glückauf 144 (2008) Heft 3, S. 108–115.
- (13) Impact of High Burnup Uranium Oxide and Mixed Uranium-Plutonium Oxide Water Reactor Fuel on Spent Fuel Management; International Atomic Energy Agency Vienna, 2011.
- (14) Märten, H.: Uranressourcen und Nuklearabfall im Blickwinkel der Kernenergiegewinnung der Zukunft. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozialität Berlin/Dresden. 28. September 2006, Band 89 (2005), S. 75–89.
- (15) Lersow, M.: Safe closure of uranium mill tailings ponds – on basis of long-term stability-proofs linked with an extensive environmental monitoring. 6th International Congress on Environmental Geotechnics. New Delhi/India. Proceedings, Volume I, Tata Mc Graw Hill, 7 West Nagar, New Delhi 110 008, ISBN (13) 978-0-07-070710-8, ISBN (10) 0-07-070710-3.
- (16) Gmal, B.; Hesse, U.; Hummelsheim, K.; Kilger, R.; Krykacz-Hausmann, B.; Moser, E. F.: Untersuchung zur Kritikalitätssicherheit eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsformationen. Im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) im Vorhaben 1005/8488-2, GRS-A-3240. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln, 2004.
- (17) Diehl, P.: Reichweite der Uran-Vorräte der Welt. Erstellt für Greenpeace Deutschland, Berlin, Januar 2006.
- (18) Nassauer, O.: Siamesische Zwillinge Kernenergie und Kernwaffen. Osteuropa 56 (2006) Nr. 4.
- (19) Lersow, M.; Gellermann, R.: Langzeitstabile, langzeitsichere Verwahrung von Rückständen und radioaktiven Abfällen – Sachstand und Beitrag zur Diskussion um Lagerung (Endlagerung). geotechnik 38 (2015), Heft 3, DOI: 10.1002/gete.201500003; S. 175–192.
- (20) Woods, P.: Sustainability aspects of the Beverley Uranium Mines. The AusIMM Bulletin June 2011 (No.3), pp 30–36. http://www.heathgate.com.au/userfiles/docs/news/Beverley%20Uranium%20Mines_The%20Bulletin_June%202011.pdf
- (21) Managing Environmental and Health Impacts of Uranium Mining. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development; OECD 2014; NEA No. 7062.

Author / Autor

Dr.-Ing. Michael Lersow, Breitenbrunn/Germany.