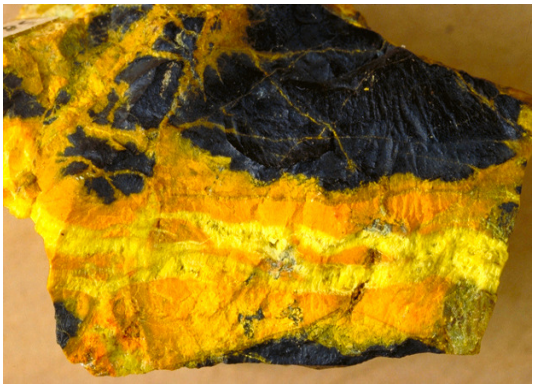
Themenbericht zur Konferenz und Podiumsdiskussion

„Uran als Kernbrennstoff: Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit“



Am Mittwoch, 15.09.2010 im Seminarraum „Alte Kapelle“
am Campus der Universität Wien „Altes AKH“

Wiener Umweltanwaltschaft
Muthgasse 62
A-1190 Wien

post@wua.wien.gv.at
http://wua-wien.at/home/

Universität für Bodenkultur
Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften
Borkowskigasse 4
A-1190 Wien
www.risk.boku.ac.at

Im Auftrag der Wiener Umweltanwaltschaft im Rahmen des Workshops „Uran als Kernbrennstoff: Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit“ im September 2010 erarbeitet.

Autoren:
Arnold Nikolaus[1], v. Brodowski Rolf[1], Gepp Christian[1], Giersch Martin[1],Gufler Klaus[1], Lahodynsky Roman[1], Hellermschmidt-Alber Johann [2];
1 Universität für Bodenkultur, Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften
2 Privat

Herausgeber:
Wiener Umweltanwaltschaft
Muthgasse 62
A-1190 Wien

Redaktion:
Gepp Christian, Arnold Nikolaus
Universität für Bodenkultur
Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften
Borkowskigasse 4
A-1190 Wien

Druck:
Österreichisches Ökologie-Institut
Seidengasse 13
A-1070 Wien

Titelbild:
http://www.kernenergie.ch/upload/cms/user/PeterVollenweider_NaturhistorischesMuseeumBern_Pechblende_Ur.jpg

Vorwort

Die Wiener Umweltanwaltschaft als Atomschutzbeauftragte der Stadt Wien beschäftigt sich im Rahmen ihrer Tätigkeit mit allen Aspekten der Kernenergie und ihren Gefahren. Die sogenannte Renaissance der Kernenergie ist beauftragt sich nicht nur über die Sicherheit von Kernkraftwerken Gedanken zu machen. Kernenergie wird in einer Minderheit der Staaten dieser Welt zur Energieerzeugung genutzt und in noch weniger Fällen trägt sie einen kurzfristig schwer verzichtbaren Anteil an der Energieversorgung. Diese Rahmenbedingungen sind die Aufforderung – neben der akuten Betrachtung der Betriebssicherheit – die Sinnhaftigkeit der Kernenergienutzung prinzipiell zu hinterfragen.

Im Jahr 2009 hat die Wiener Umweltanwaltschaft internationale Experten zum Thema Haftung bei Kernkraftwerken nach Wien eingeladen. Nach dieser – den formalen und rechtlichen Rahmenbedingungen gewidmeten – Veranstaltung, hat die Wiener Umweltanwaltschaft 2010 – im Lichte der allgemeinen Rohstoffdebatte – eine Tagung zum Thema Uran organisiert.

Etwas über zwei Prozent des weltweiten Energiebedarfs wird durch Kernenergie gedeckt und dennoch wird eine Brennstoffdebatte ähnlich der bei fossilen Brennstoffen – diese decken allerdings über 80 Prozent des Energiebedarfs ab – geführt. Daher drängen sich unmittelbar einige Fragen auf. Zum einen ist erkennbar, dass bei einem hypothetischen – noch immer sehr geringem – Anteil der Kernenergie von fünf Prozent, die Reichweite des Kernbrennstoffs auf etwa die Hälfte sinken würde. Durch den geringen Anteil, welche die Kernenergie zur Energieversorgung beiträgt und einem CO_2-Ausstoß über den gesamten Prozess von zumindest etwa 30 g/kWh (auch von Verfechtern der Kernenergie so angesetzt), erscheint das Klimaschutzargument für die Kernenergie in einem sehr fragwürdigen Licht.

Die Veranstaltung und der vorliegende Bericht zeigen, dass die Frage der Uranverfügbarkeit auch für die Nuklearindustrie ein brennendes Problem ist. Nicht zuletzt aus diesem Grund wird trotz geringer Erfolge und praktisch keiner Fortschritte bereits seit den 1960-er Jahren an Alternativen zu den bestehenden Reaktorkonzepten und Brennstoffen geforscht.

Der vorliegende Bericht soll einen Einblick in die Rohstoffvorhersage und -verfügbarkeit bieten. Er wirft auch einen kurzen Blick auf die enormen Probleme, die sich durch den Uranbergbau für die Umwelt und die betroffenen Menschen ergeben. Außerdem wird aufgezeigt, wo die Grenze zwischen den Wunschvorstellungen der verschiedenen Akteure und einer gesicherten Daten- und Erkenntnisbasis verläuft.

Die Wiener Umweltanwaltschaft will mit dieser Publikation einerseits einen Einblick in die Problematik der Rohstoffversorgung für die Kernenergie geben und andererseits das Licht auf einen wesentlichen Punkt in der Debatte über die Sinnhaftigkeit eines zweiten Frühlings für die Kernenergie richten.

Mag.[a] Dr.[in] Andrea Schnattinger
Wiener Umweltanwältin

Inhaltsverzeichnis

1 EIGENSCHAFTEN VON URAN 5

2 PHYSISCHE VERFÜGBARKEIT VON URAN 6

2.1 GEOLOGISCHE VERTEILUNG VON URAN 6
2.2 KLASSIFIKATION VON RESSOURCEN 6
2.3 GLOBALE VERTEILUNG VON KONVENTIONELLEN RESSOURCEN 8

3 URANBEREITSTELLUNG 10

3.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG 10
3.2 GEWINNUNG VON PRIMÄRURAN 11
3.3 ENTWICKLUNGSSZENARIEN INDUSTRIELLER ERZEUGERKAPAZITÄTEN 12
3.4 SEKUNDÄRE QUELLEN VON URAN 13
3.5 UNKONVENTIONELLE URANQUELLEN 14

4 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNGEN 16

4.1 GLOBALE ENTWICKLUNG DES URANMARKTES 17

5 EINFLUSS VON GEN 4 TECHNOLOGIE 21

6 NICHT-TECHNISCHE ASPEKTE DER RESSOURCENGEWINNUNG 25

6.1 INDUSTRIELLE KONZENTRATION 25
6.2 NICHT TECHNISCHE UNSICHERHEITSFAKTOREN DER GEWINNUNGSKETTE 26

7 PROGNOSEN DES BEDARFS UND DER VERSORGUNG 28

7.1 PROGNOSEN DES BEDARFS 28
7.2 VERGLEICH VON PRODUKTIONS- UND BEDARFSSZENARIEN 28

8 URANPROSPEKTION IN ÖSTERREICH UND EXPLORATION SOWIE BERGBAU IN FORSTAU (SALZBURG) 31

9 KURZFASSUNG DER VORTRÄGE 39

10 REFERENZEN UND WEITERFÜHRENDE LITERATUR 43

1 Eigenschaften von Uran

Uran ist ein natürlich vorkommendes, radioaktives, silbernes Schwermetall aus der Gruppe der Actinoiden und wird mit dem Symbol U abgekürzt. Uran besitzt eine hohe Dichte von 19,1 g/cm³ und sein Schmelzpunkt liegt bei 1405,45 K. In der Natur findet man es in Form seiner Minerale, die sich in verschiedensten und komplexen Ausbildungen zeigen und zumeist die Uranyleinheit UO_2^{2+} enthalten. Das häufigste und auch für den Abbau wichtigste Mineral ist Pechblende (U_3O_8).

In eben dieser Pechblende wurde Uran 1789 vom deutschen Chemiker Martin Heinrich Klaproth entdeckt und von diesem nach dem einige Jahre zuvor entdeckten Planeten Uranus benannt. Erst gute 100 Jahre später wurde von Henri Becquerel die Radioaktivität des Elementes erkannt. Die erste künstlich induzierte Spaltung eines Urankerns gelang im Jahre 1938 Otto Hahn und Fritz Straßmann.

Natürlich vorkommendes Uran ist eine Mischung aus 3 Isotopen - ^{238}U, ^{235}U und ^{234}U - wobei ^{238}U mit Abstand den größten Anteil ausmacht (Tabelle 1). Alle diese Uranisotope sind radioaktiv und erzeugen in ihrer natürlichen Zusammensetzung eine Zerfallswärme von etwa 0,1 Watt je Tonne. Dadurch stellt Uran eine der Hauptwärmequellen im Erdinneren dar, welche Konvektion und Kontinentaldrift vorantreiben. Die natürlichen Isotope unterliegen vornehmlich dem α-Zerfall, der Anteil an β- und γ-Strahlung ist eher gering. Die Gesamtaktivität von reinem Uran, bestehend aus den drei natürlichen Isotopen, beträgt 25 Bq per mg.

In seiner technischen Anwendung bildet Uran heute die Grundlage der Stromerzeugung in Kernreaktoren. Im Allgemeinen wird dabei nur ^{235}U (0,7 %) zur Energiegewinnung herangezogen. Weltweit stammen heute in etwa 16 % der erzeugten Elektrizität – das entspricht etwa 2 % des weltweiten Primärenergiebedarfs - aus Kernreaktoren.

Tabelle 1: Natürliche Uranisotope

Isotop	Anteil	HWZ
^{238}U	99.2745 %	$4{,}468 * 10^{9}$ a
^{235}U	0.7200 %	$7{,}038 * 10^{8}$ a
^{234}U	0,0055 %	$2{,}455 * 10^{5}$ a

Quelle: Binder, Lexikon der Elemente, 1999

2 Physische Verfügbarkeit von Uran

2.1 Geologische Verteilung von Uran

Im Rahmen der erdgestaltenden Prozesse wurde Uran – ausgehend von einer ursprünglichen Gleichverteilung – langsam vom Erdmantel in die kontinentale Kruste transferiert, sodass sich dort heute ein durchschnittlicher Urangehalt von 1,4 ppm (Gramm/Tonne) findet.

Dieser Transfer erfolgte jedoch im Laufe von mehr als einer Milliarde Jahren nicht überall gleichmäßig. So weist vor allem saures magmatisches Gestein höhere Konzentrationen auf. Man bezeichnet diese selektive Anreicherung in Vulkaniten, Tuffen, Graniten, Alkaligraniten, Pegmatiten, Kabonatiten und hydrothermalen Gängen als primäre Lagerstätten. Durch Erosion gelangt das Uran aus den magmatischen Lagerstätten in den sedimentären Kreislauf. Somit erreicht ein großer Teil des Urans letztlich die Ozeane. Unter geeigneten Bedingungen kann es jedoch in Schiefern und Sandsteinen zu Ausfällung und Anreicherung kommen. Man bezeichnet dies als sekundäre Lagerstätten. Der Urangehalt in den verschiedenen Lagerstätten kann stark variieren. Abbauwürdige Konzentrationen beginnen in etwa bei 0,03% und erreichen 3 – 7% in den hochwertigen Uranerzlagerstätten. Im kanadischen Athabasca-Basin finden sich sogar Konzentrationen von bis zu 23% U_3O_8. Bezüglich der mengenmäßigen Verteilung zeigt es sich, dass die Lagerstätten mit hoher Konzentration einen geringen Anteil ausmachen, während der Großteil der globalen Uranvorkommen in den schwer erschließbaren, so genannten unkonventionellen Ressourcen (unter 100 ppm U) zu finden sind.

2.2 Klassifikation von Ressourcen

Im Falle von Uran haben sich Definitionen und Klassifikationen der Ressourcen in verschiedenen Ländern historisch unterschiedlich entwickelt, wodurch Schwierigkeiten bei der globalen Quantifizierung auftreten. Allen verschiedenen Definitionen ist jedoch gemein, dass die Einteilung der Ressourcen in verschiedene Kategorien entsprechend der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der verfügbaren Daten vorgenommen wird.

Wir betrachten unter dem Begriff „Ressourcen“ die zur Verfügung stehende Menge eines Rohstoffes. Je klarer die äußeren Parameter der Lagerstätten bestimmt sind, desto sicherer kann auch tatsächlich die bestimmte Menge an Uran gefördert werden.
In einer ersten groben Trennung können Uranressourcen in konventionelle und unkonventionelle geteilt werden. Als konventionelle Ressourcen gelten solche, bei welchen Uran alleine mit etablierten Verfahren abgebaut wird, sowie jene, bei denen man Uran als Zweit- oder Nebenprodukt in entsprechend großer Menge gewinnt, wie dies beispielsweise bei Olympic Dam (Australien) der Fall ist. Vorkommen, die einen sehr geringen Urangehalt aufweisen, wie er zum Beispiel im Meerwasser oder in Phosphatlagerstätten zu finden ist, werden als unkonventionell bezeichnet.

Betrachtet man die konventionellen Ressourcen genauer, so werden sie gemäß einer Einteilung der IAEO (Internationale Atomenergie-Organisation) entsprechend der Sicherheit ihres Vorkommens in 4 Ressourcenkategorien einteilen:

(1) Reasonably Assured Resources (RAR)
(2) Inferred Resources
(3) Prognosticated Resources
(4) Speculative Resources

Reasonably Assured Resources (relativ sichere Ressourcen, **RAR**) definieren jene Mengen an Uran, die in Lagerstätten von bestimmter Größe und mit definiertem Urangehalt enthalten sind. Sie sind in gegebenen Kostenspannen[1] und mit erprobten Abbau- und Verarbeitungsmethoden gewinnbar. Die große Wahrscheinlichkeit ihrer Existenz basiert auf Probenahmen und diversen naturwissenschaftlichen Messungen.
Unter **Inferred Resources** (vermuteten Ressourcen) versteht man solche Ressourcen, deren Vorhandensein aus geologischen Beweisen von limitiertem Umfang hergeleitet wird, wobei die Vermessung der Lagerstätte aber noch nicht so weit fortgeschritten ist, um sie als RAR einzustufen. Die Abschätzung der Menge und Konzentration des Urans ist hier also weniger zuverlässig.
Die Summe aus Reasonably Assured - und Inferred Resources wird als **Identified Resources** (identifizierte Ressourcen, **IR**) bezeichnet. Diese lassen sich einer bestimmten Lagerstätte/Region zuordnen und werden im Allgemeinen als Basis für Ressourcenabschätzungen verstanden.

Prognosticated Resources (vorausgesagte Ressourcen) und Spekulative Resources (spekulative Ressourcen) werden unter dem Begriff **Undiscoverd Resources** (unentdeckte Ressourcen) zusammengefasst. Sie beinhalten Ressourcen, die in „Uran-Gegenden“ noch erwartet werden beziehungsweise solche, die man in Regionen mit ähnlichen geologischen Gegebenheiten wie die der bekannten Lagerstätten vermutet. Sie haben aufgrund ihrer Unbestimmtheit keine wirtschaftliche Bedeutung und sind damit auch für eine zukünftige Verfügbarkeitsprognose kaum brauchbar.

Zusätzlich werden von in der Uranwirtschaft tätigen Firmen oft noch Reserven innerhalb der Gesamtressourcen einer Lagerstätte ausgewiesen. Sie sind die nach aktuellem Stand der Technik ökonomisch förderbare Menge eines Erzes, welche zumindest in einer Machbarkeitsstudie belegt ist. Eine solche Studie betrachtet die Art des Abbaues und der Erzverarbeitung, metallurgische und andere wichtige Aspekte, um die Wirtschaftlichkeit zu belegen.

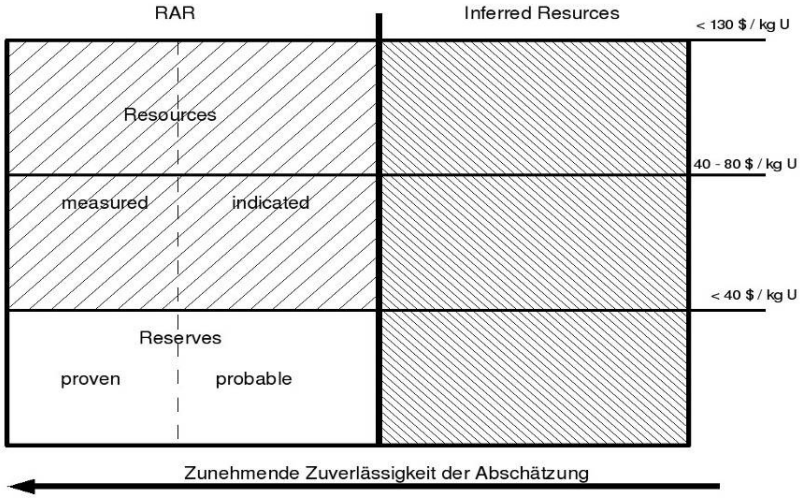


Abbildung 1: Einteilung der Identified Resources
Quelle: ISR BOKU Wien

[1] Diese enthalten direkte Abbau-, Transport- und Verarbeitungskosten, Umwelt- und Abfallmanagement, Kosten für Produktionsexpansion und weitere indirekte Kosten.

Bei der Betrachtung von Zahlen zu Ressourcen ist es wichtig die Art der Darstellung zu berücksichtigen. Oft werden die im Boden vorhandenen Gesamtressourcen ausgewiesen, die man als In-Situ Reserven/Ressourcen bezeichnet. Die Verluste durch Abbau und Erzverarbeitung, somit also die effektiv förderbare Menge, müssen dann durch Multiplikation mit dem durchschnittlichen Gewinnungsfaktor (66-90%) bestimmt werden.

2.3 Globale Verteilung von konventionellen Ressourcen

Die Publikation Uranium: Resources, Production and Demand der OECD/IAEA erhebt alle zwei Jahre den aktuellen Stand an Uran Ressourcen. Für das Jahr 2009 weist sie weltweit 4 400 500 Tonnen förderbares Uran in der Kategorie RAR zu Kosten von weniger als 260 US$/kgU[2] aus. Mehr als 90% davon finden sich in nur 11 Staaten. Diesen Staaten – gelistet in Tabelle 2 - sind gleichzeitig auch jene, die jeweils über mehr als 100000 tU verfügen. Den Großteil dieser Staaten findet man auch unter den derzeit größten Produzenten wieder (siehe Abschnitt 3)

Fast 30% der weltweiten RAR finden sich in Australien und davon wiederum fast drei Viertel in der Lagerstätte Olympic Dam mit annähernd 900 000 tU. Die zweitgrößten Ressourcen dieser Kategorie weisen die USA aus, jedoch liegt die aktuelle Förderung (~1500 tU p.a) aufgrund der hohen Gestehungskosten nur auf einem Niveau von 10% der maximalen Förderraten in den späten 1970-er Jahren. Kasachstan, mit 14 000 tU im Jahre 2009 der derzeit größte Produzent von Uran, verfügt über RAR von etwa 400 000 t.

Tabelle 2: Reasonably Assured Resources

RAR	2009			
	<40 US$/kgU	<80 US$/kgU	<130 US$/kgU	<260 US$/kgU
Australien		1163000	1176000	1179000
Brasilien	139900	157700	157700	157700
China	52000	100900	115900	115900
Kanada	267100	336800	361100	387400
Kasachstan	14600	233900	336200	414200
Namibia		2000	157000	157000
Niger	17000	42500	242000	244600
Russland		100400	181400	181400
Südafrika	76800	142000	195200	195200
Ukraine	2500	38700	76000	142400
USA		39000	207400	472400
World Total	**569900**	**2516100**	**3524900**	**4004500**
Andere		159200	319000	357300

Quelle: Uranium 2009, OECD/IAEA

[2] Diese Kategorie wurde 2009 als Reaktion auf höhere Marktpreise und Abbaukosten in das Redbook aufgenommen.

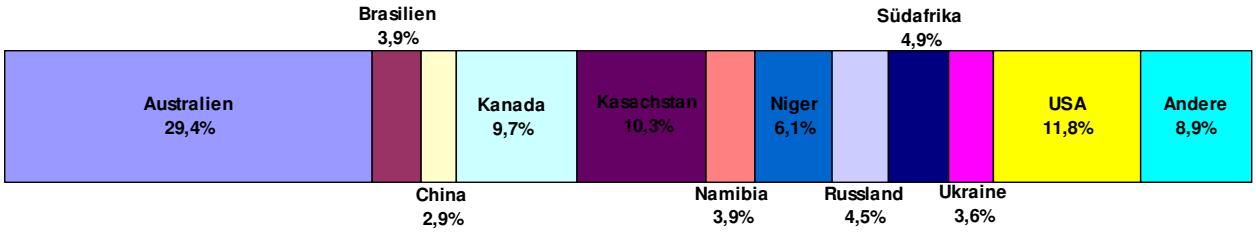


Abbildung 2: Verteilung der Reasonably Assured Resources <260$/kgU(2009)

Quelle: ISR BOKU Wien, Daten: Uranium 2009, OECD/IAEA

Betrachtet man die identifizierten Ressourcen (Reasonably Assured Resources plus Inferred Resources), so erweitert sich die förderbare Menge auf etwa 6,3 Millionen Tonne Uran und die Liste der Länder mit mehr als 100 000 tU verlängert sich auf 13.

Auch hier weist Australien mit Abstand die größten Ressourcen auf. Nachdem die USA über keine zusätzlichen Ressourcen verfügt, liegt hier Russland hinter Kasachstan auf dem dritten Ressourcen-Platz.

Tabelle 3: Identified Resources

Identified Resources	2009			
	<40 US$/kgU	<80 US$/kgU	<130 US$/kgU	<260 US$/kgU
Australien		1612000	1673000	1679000
Brasilien	139900	231300	278700	278700
China	67400	150000	171400	171400
Kanada	366800	447400	485300	544600
Kasachstan	44400	475400	651800	832100
Jordanien		111800	111800	111800
Namibia		2000	284200	284200
Niger	17000	73400	272900	275500
Russland		158100	480300	566300
Südafrika	155300	232900	295600	295600
Ukraine	5700	53600	105000	223600
USA		39000	207400	472400
Usbekistan		86200	114600	114600
World Total	**796500**	**3741900**	**5404000**	**6306300**
Andere	0	68800	272000	456500

Quelle: Uranium 2009, OECD/IAEA

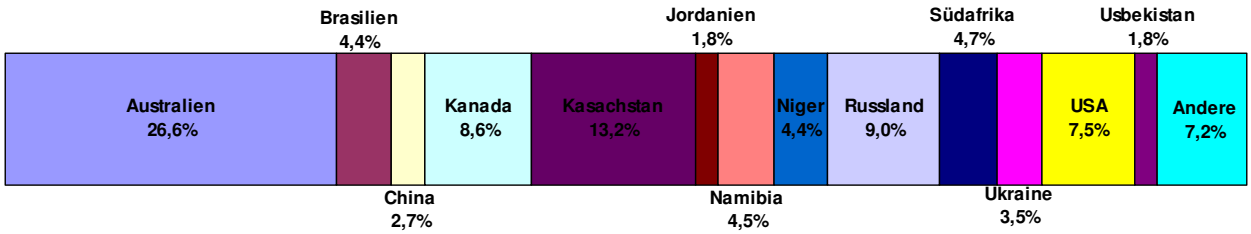


Abbildung 3: Verteilung der Identified Resources <260$/kgU (2009)

Quelle: ISR BOKU Wien, Daten: Uranium 2009, OECD/IAEA

3 Uranbereitstellung

3.1 Historische Entwicklung

Die Uranproduktion durchlebte in ihrer Geschichte verschiedene Trends. Abgesehen von frühen Unternehmungen zu Forschungszwecken wurde der Abbau von Uran zunächst vom Gedanken der Waffenentwicklung und -herstellung geleitet. Mit den auf die militärische Anwendung folgenden zivilen Reaktoren nahm die kommerzielle Produktion einen erneuten Anstieg, eilte, getrieben von übermäßigen Wachstumserwartungen, dem Bedarf voraus und erreichte im Jahre 1979 einen Höhepunkt.
Mit Ende des kalten Krieges änderte sich jedoch die Entwicklung des Uranmarktes. Einerseits wurden nun die in vergangenen Jahren vor allem in der UDSSR angesammelten Reserven dem Weltmarkt zugänglich gemacht, andererseits wurde hoch angereichertes Uran durch die Verringerung des nuklearen Waffenarsenals verfügbar, welches für eine Verwendung als Reaktorbrennstoff umgearbeitet werden kann. Die Folge war eine sinkende Nachfrage nach Natururan, mit der ein Rückgang der Preise, des Abbaus und auch der Explorationstätigkeit einherging.

Am Ende dieser Entwicklung steht eine Situation am Uranmarkt wie wir sie heute kennen, nämlich eine Uranbereitstellung für den weltweiten Reaktorbedarf aus verschiedenen Quellen:

* Uranminen
* Lagerbeständen
* Wiederaufbereitung

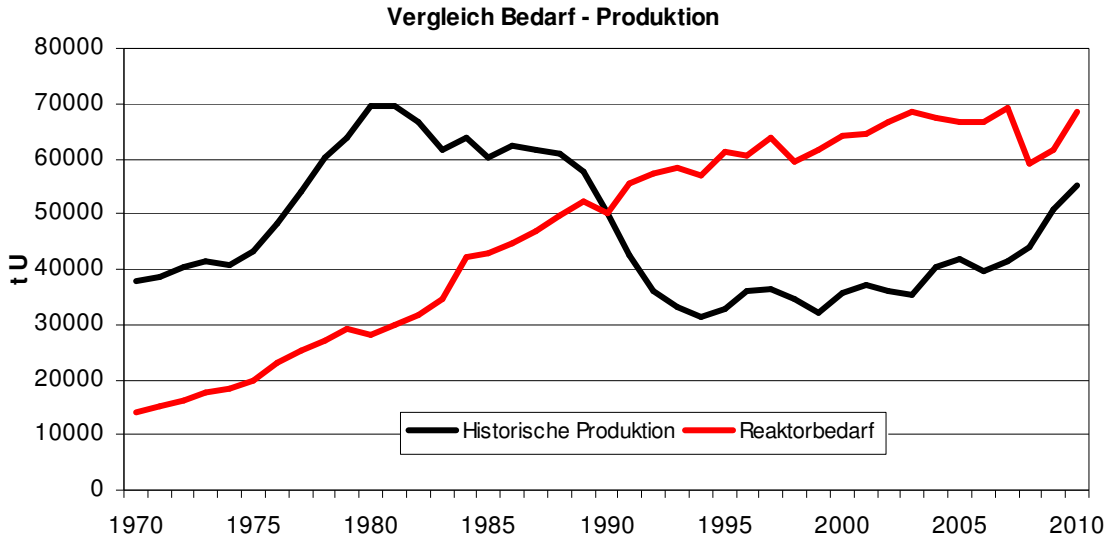


Abbildung 4: Historische Entwicklung von Bedarf und Produktion an Natururan (2010 geschätzt)
Quelle: Uranium 2005 -2009, und Redbook Redtrospective, OECD/IAEA

Weltweit wurden 2009 rund 65 000 tU zur Energiebereitstellung aus Reaktoren benötigt, wovon etwa 80% direkt aus der Minenproduktion gedeckt werden konnten. Der Rest wurde aus den oben erwähnten sekundären Quellen (Lagerbestände und Wiederaufbereitung) zur Verfügung gestellt.

3.2 Gewinnung von Primäruran

Unter Primäruran wird jenes Uran verstanden, das klassisch in einer Uranmine abgebaut wird. Im Normalfall wird in einem solchen Industriekomplex die Gewinnung von Uran aus dem Gestein sowie die Weiterverarbeitung zu einem Produkt aus Uranverbindungen namens „Yellow Cake“[3] vollzogen. Der Abbau des Gesteins findet in der eigentlichen Mine statt, die Verarbeitung des Erzes in der zugehörigen Mühle. Oft werden auch mehrere Lagerstätten, so sie nahe genug beieinander liegen, zu einer „Mine“ zusammengefasst und der Reihe nach über eine Mühle abgearbeitet. Sind die Entfernungen nicht zu groß, kann es auch wirtschaftlich sein, Erz aus einer neuen Mine am Standort einer erschöpften Mine zu verarbeiten, anstatt eine neue Mühle zu errichten, wie dies im kanadischen Athabasca Basin gehandhabt wird.
Wurde eine Lagerstätte für den Uranabbau ins Auge gefasst, gilt es als erstes, ein behördliches Genehmigungsverfahren einzuleiten, das sich über mehrere Jahre erstrecken kann. Es werden hier vor allem umweltpolitische Überlegungen angestellt, sowie gesundheitliche, soziale und wirtschaftliche Einflüsse eines solchen Unternehmens betrachtet. Der Betreiber hat außerdem die Verpflichtung, die Wiederherstellung des Geländes nach den Abbautätigkeiten sicherzustellen. Vielfach hat die Geschichte aber gezeigt, dass die Auflagen zur Wiederherstellung nicht erfüllbar sind, beziehungsweise nicht erfüllt werden.
Nachdem die Wirtschaftlichkeit des Abbaus einer Lagerstätte erwiesen scheint und eine erste behördliche Genehmigung erlangt wurde, gilt es zu bestimmen, wie das Erz zu Tage gebracht werden kann. Hierzu gibt es drei gängige Methoden – Tagbau, Untertagbau und Lösungsbergbau. Um die Entscheidung für eine der Abbaumethoden tätigen zu können, müssen die Eigenschaften des Erzkörpers bereits weitgehend bestimmt sein. Lage, Tiefe, Ausdehnung, Gesteinsart, Geometrie, Hydrologie und andere Faktoren der Lagerstätte fließen in die Überlegungen ein. Nicht zu letzt spielen wirtschaftliche Überlegungen eine gewichtige Rolle. Sind verschiedene Varianten technisch möglich, so wird die ökonomischste gewählt.

[3] Als Yellow Cake wird das Endprodukt der Uranmühlen genannt, das zur Verarbeitung zu Brennelementen weiter geliefert wird. Es besteht vornehmlich aus U_3O_8 und hat den Namen von seiner Farbe.

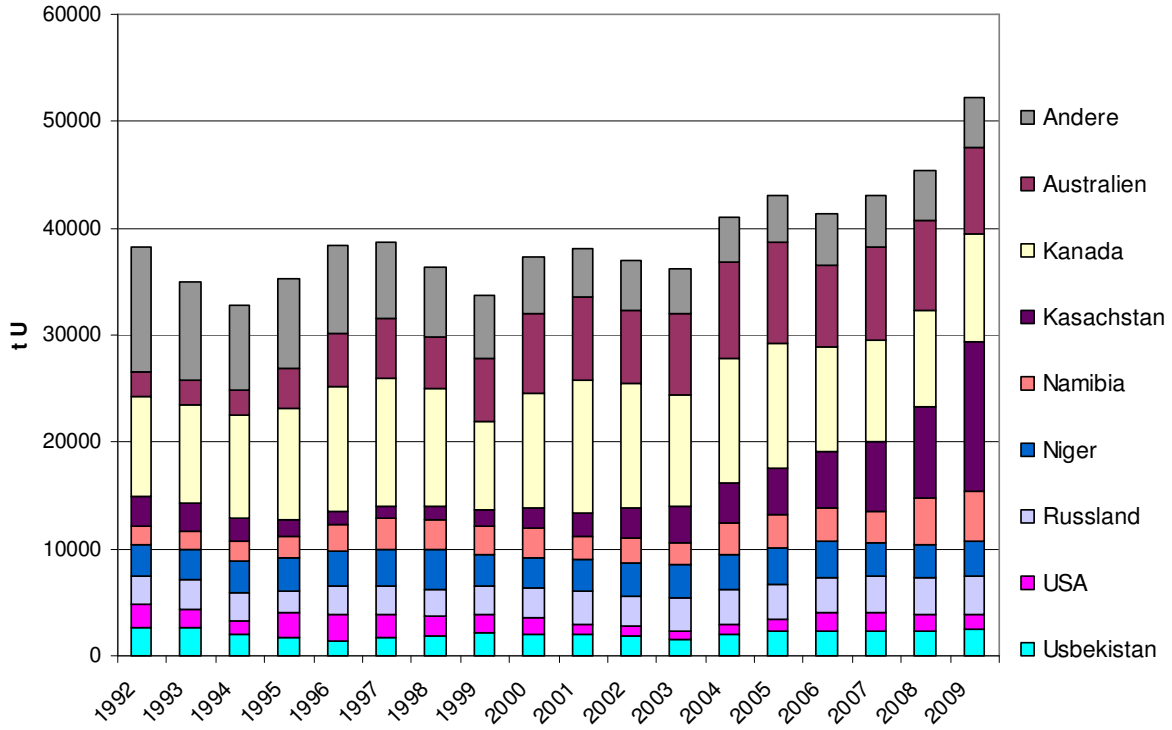


Abbildung 5: Produktion nach Ländern
Quelle: Uranium 2005 -2009, und Redbook Redtrospective, OECD/IAEA

Weltweit wird Uran in 20 Ländern gefördert. Die Produktion erfolgt in unzähligen Minen, deren Kapazitäten von einigen wenigen bis zu mehreren Tausend Tonnen Uran streuen. Heute werden in 7 Ländern über 90% des Urans abgebaut, die sich alle auch unter den Länder mit den größten Ressourcen wiederfinden. Dies sind Australien, Kanada, Kasachstan, Namibia, Niger, Russland, USA und Usbekistan. Abbildung 5 zeigt, dass diese Länder auch schon in der Vergangenheit wichtige Stützen des Uranmarktes waren. Besonders auffällig zeigt sich aber das starke Wachstum der Produktion in Kasachstan. Dort wurden im letzten Jahrzehnt große Anstrengungen zur Unterstützung der Uranwirtschaft unternommen, sodass das Land 2009 erstmals zum weltgrößten Uranproduzenten wurde (Tabelle 4). Insgesamt wurden 2009 weltweit 50 722 tU gefördert.

Tabelle 4: Uranproduzenten 2009 - Top 10

Land	Tonnen U
Kasachstan	**14020**
Kanada	**10173**
Australien	**7982**
Namibia	**4626**
Russland	**3564**
Niger	**3243**
Usbekistan	**2429**
USA	**1453**
China	**750**
World	**50772**

Quelle: WNA 2009

3.3 Entwicklungsszenarien industrieller Erzeugerkapazitäten

Wie in jeder Industrie liegen auch in der Uranwirtschaft die tatsächlich erzeugten Mengen im Regelfall unter der maximalen Kapazität. Im Durchschnitt der letzten 40 Jahre liegt diese Rate bei etwa 76 Prozent. Die Produktion aus dem Jahre 2009 entspricht bei einer globalen Kapazität von rund 65 000 Tonnen einer Auslastung von 78 Prozent.

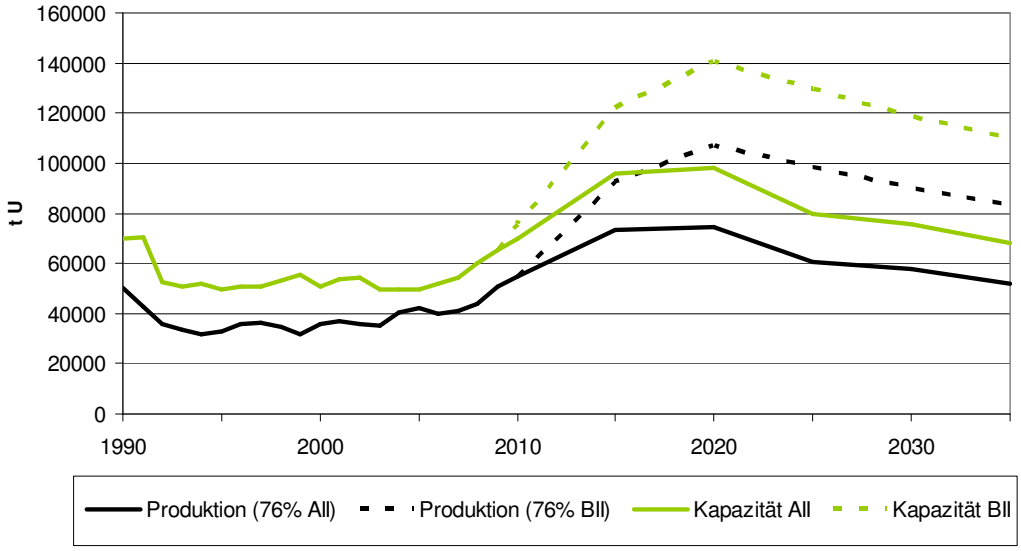


Abbildung 6: Vergleich von Prognosen für Kapazität und Produktion (Werte bis 2009 historisch, 2010 – 2035 Prognosen IAEA)
Quelle: Uranium 2005 -2009, und Redbook Redtrospective, OECD/IAEA

Abbildung 6 zeigt Entwicklungsprognosen der IAEO für Reaktorbedarf und Minenkapazitäten. Die Bezeichnungen AII beschreibt hierbei die Entwicklung existierender und zugelassener Produktionszentren auf Basis von identifizierten Ressourcen < 130$/kgU. Die Kategorie BII fügt denen noch geplante und mögliche Produktionszentren dazu. Die Bedarfskurven entsprechen den prognostizierten Vergrößerungen des Reaktorparks. Für die Produktion wurde ab dem Jahre 2010 der langjährige Durchschnitt von 76% der Kapazität angesetzt.

3.4 Sekundäre Quellen von Uran

Unter Sekundäruran ist jenes Uran zu verstehen, das nicht direkt der Produktion zuzuordnen ist, sondern entweder aus Lagerbestand stammt, oder aus abgebrannten Brennelementen wiedergewonnen wird.

Die Lagerbestände von Uran liegen in zweierlei Form vor: Natururan und hoch angereichertes Uran aus Nuklearwaffen.
Natururanlager haben sich in den Jahren der Überproduktion des 20. Jahrhunderts (siehe Abbildung 4) aufgebaut. Diese Reserven wurden mit Ende des kalten Krieges stückweise dem globalen Markt zugänglich gemacht. Die Differenz aus der gesamten weltweiten Uranproduktion und dem in Reaktoren verbrauchten Uran liegt bei etwa 575 000 tU. Ein Großteil dessen wurde aber für den Militärsektor verwendet oder reserviert und vieles davon wird voraussichtlich in diesem Bereich gebunden bleiben. Eine Möglichkeit das Spaltmaterial aus Nuklearwaffen zur Energieproduktion zu verwenden, ergab sich aus den Abrüstungsverträgen zwischen den USA und der UdSSR. Hierzu wird das hoch angereicherte Uran aus den Sprengköpfen mit

abgereichertem Uran oder Natururan gemischt und kann durch diesen Vorgang abgereichert und zu Brennelementen weiterverarbeitet werden. Das Abreichern von 30 t Waffenuran pro Jahr entspricht einer Minenproduktion von 10 600 tU und kann so etwa 15% des derzeitigen Weltbedarfes decken. Mit Auslaufen der Abrüstungsverträge 2013 werden diese zusätzlichen Uranreserven jedoch in wesentlich geringerem Ausmaß zur Verfügung stehen.

Signifikante kommerzielle Lagerbestände finden sich, soweit aus offiziellen Daten bestimmbar, nur in den Vereinigten Staaten (40 000 tU), der Republik Korea (2000 tU), der Schweiz (1500 tU) und der Ukraine(1200 tU). Die Mengen entsprechen dem länderspezifischen Reaktorbedarf von etwa 5, 2.5, 0.75, beziehungsweise 0.5 Jahren

Bei der Wiederaufbereitung wird aus verbrauchten Brennstäben ungenutztes Uran sowie Plutonium extrahiert. Derzeit wird dieses Verfahren jedoch nur begrenzt durchgeführt, da es sich um ein aufwendiges und kostenintensives Unterfangen handelt. Fast alle der neun weltweit in Betrieb befindlichen bestehenden Anlagen kämpften in der Vergangenheit mit technischen Problemen die zu zeitweisen Stilllegungen führten und mit relevanten Freisetzungen in die Umwelt einher gingen. Die Nutzung von wieder aufbereitetem Uran – so genanntem „reprocessed uranium“ (RepU) – ist weltweit mit weniger als einem Prozent des Uranbedarfes verschwindend gering. Das gewonnene Plutonium wird in Mischoxid-Brennelemente (MOX) eingearbeitet und kann in dafür geeigneten Reaktoren verwendet werden. Dies war 2009 in 27 Reaktoren möglich. Der durch MOX gedeckte Bedarf lag in den vergangenen Jahren zwischen 1000 und 1500 tU (Natururanäquivalente), der von der IAEO *nicht* im weltweiten Gesamtbedarf inkludiert wird.

3.5 Unkonventionelle Uranquellen

3.5.1 Urangewinnung aus Phosphaten

Die Gewinnung von Uran aus Phosphaten wurde in der Vergangenheit schon in verschiedenen Ländern - vornehmlich als Nebenprodukt der Düngerherstellung - durchgeführt, wurde aber gegen Ende der 1990-er Jahre wieder eingestellt. Grundsätzlich finden sich große Mengen an Uran weltweit in den Phosphatlagerstätten (vgl. Abbildung 6), allerdings sind diese von sehr niederer Konzentration (0,06 – 0,0006%). Die Abschätzungen bezüglich der tatsächlich förderbaren Mengen liegen nicht im nötigen Umfang vor. Daher ist eine Einteilung in die üblichen Ressourcenklassen nicht möglich. Frühe Ausgaben des Redbook weisen rund 85% dieser Ressourcen Marokko zu (7,3 -7,6 Mio. t U). Wiederum andere Schätzungen sehen 9 Millionen t U in den Ländern Jordanien, Mexico, Marocco und in den USA. Andere Quellen sprechen von 22 Millionen t U weltweit.
In Anbetracht der Menge an Ressourcen ist es nicht auszuschließen, dass auch die Urangewinnung aus Phosphaten ihren Beitrag zur weltweiten Uranproduktion wird leisten können. Dies ist jedoch einerseits vom Bedarf an Phosphatdünger und andererseits vom Uranpreis abhängig. Erst bei Preisen von etwa 300 $/kg könnte diese Art der Urangewinnung in größerem Maße wettbewerbsfähig werden. Jedoch sieht selbst die IAEA-Publikation „Analysis of Uranium Supply to 2050” in der Urangewinnung aus Phosphaten nicht mehr Potential als 3700 t U / Jahr, gemessen am derzeitigen Weltbedarf von rund 69 000 t U pro Jahr und vor allem bei einem ebenfalls durch die IAEA prognostizierten und gewünschten Ausbau der Kernenergie ein geringer Beitrag.

3.5.2 Urangewinnung aus Meerwasser

Wie bereits erwähnt, gelangen große Mengen an Uran über den Wasserkreislauf in die Ozeane. Ausgehend von einer durchschnittlichen Konzentration von 3 mg U/m^3 Meerwasser sind dies 4,5 Milliarden Tonnen Uran, wodurch das Meer im Vergleich zu konventionellen Ressourcen mit einer um einen Faktor 1000 größeren Menge, als nahezu unerschöpfliche Uranquelle erscheint. Erste Ideen, diese Quelle zu erschließen, indem das Meerwasser durch Filter gepumpt wird, wurden bereits in den Sechziger Jahren publiziert, jedoch aufgrund der dazu zu bewegenden riesigen Wassermengen als undurchführbar eingestuft.

Heute wird die Forschung auf diesem Gebiet nur noch in Japan durchgeführt. Die aktuellen Pläne sehen nicht mehr eine Bewegung des Wassers vor, sondern ein Ausbringen von Absorbermaterial ins Meer, an dem sich das Uran anlagern soll. Ein diesbezügliches Experiment, in welchem in 240 Tagen 1kg Uran gewonnen wurde, hat gezeigt, dass diese Lösung zwar technisch möglich ist, aber aufgrund der langen Dauer und der geringen Ausbeute wirtschaftlich kaum interessant. Es wurden für die Durchführung des Versuchs 350 kg Absorbermaterial, etwa 10 Tonnen Rahmen- und Strukturmaterial, sowie 160 Tonnen Verankerungsmaterial benötigt. Dieser große Materialaufwand sowie die Tatsache, dass die Folien zur Erreichung ihrer absorbierenden Eigenschaft mit 200 kGy bestrahlt werden müssen, lassen vermuten, dass auch die Energiebilanz dieser Urangewinnungsmethode bedenklich ist. Wird eine großtechnische Umsetzung der Urangewinnung aus Meerwasser angestrebt, so gälte es zu berücksichtigen, dass für die Herstellung der Absorberfolien eine entsprechende Infrastruktur zur Bestrahlung vorhanden sein muss. Zudem werden diese Folien aus der begrenzten Ressource Erdöl hergestellt. Ebenso müssten hinsichtlich der ausgedehnten Strukturen u. a. zu erwartende Auswirkungen auf das marine Ökosystem in die Betrachtungen einfließen.

Die oben angeführten Mengen an Kunststofffolie, Strukturmaterialien, sowie die zur Bestrahlung benötigten Reaktoren lassen diese Art der Urangewinnung aufgrund des Einsatzes an Materialien, Energie und Personal nicht wirtschaftlich erscheinen.

4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die Kosten des Abbaus werden an sich in 3 Kosten-Klassen unterteilt:

1. niedrige Kosten-Klasse (bis 40$/kg U)
2. mittlere Kosten-Klasse (bis 80$/kg U)
3. hohe Kosten-Klasse (bis 130$/kg U)
4. sehr hohe Kosten (bis 260$/kg U)

Bei dieser Unterteilung nach Kosten ist zu beachten, dass sie meist nur für die bekannten Vorräte möglich ist - für die bisher noch unentdeckten Ressourcen werden üblicherweise nur kumulierte Zahlen für alle Kostenkategorien zusammen angegeben.
Bisher werden Vorräte, deren Abbaukosten 260$ übersteigen, als unwirtschaftlich im Abbau angesehen und werden nicht in die Berechnung der (konventionellen) Ressourcen eingebracht.

Die Wirtschaftlichkeit des Uranabbaus wird an sich durch die Höhe des Uranpreises beeinflusst. Der Uranpreis ist - wie andere auf dem Markt gehandelte Güter – von Angebot und Nachfrage bestimmt.

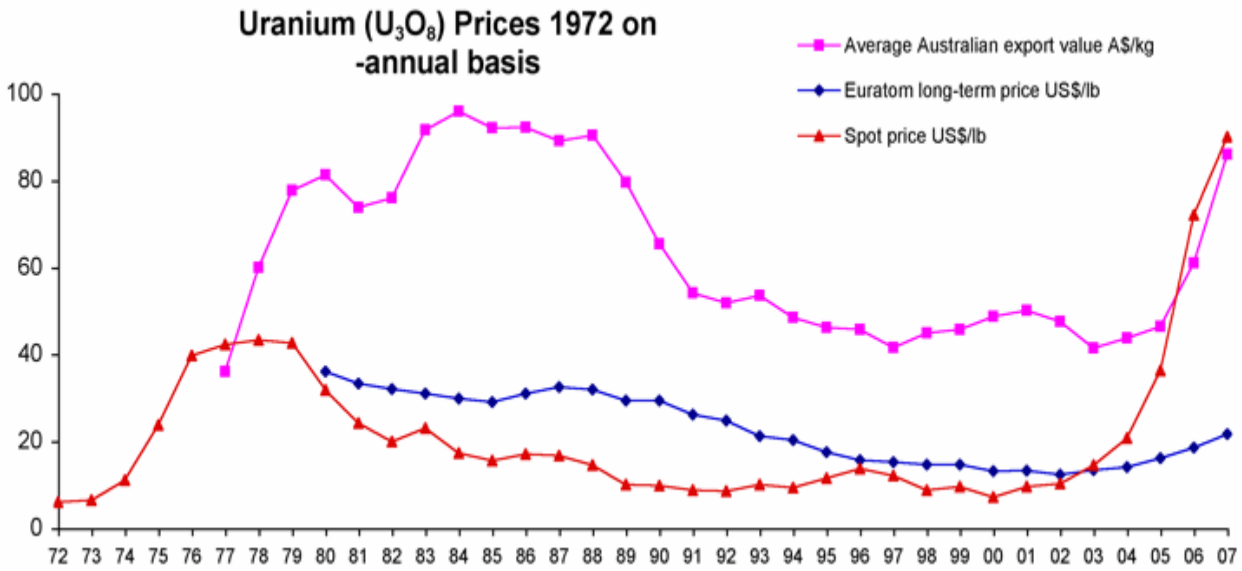


Abbildung 7: Entwicklung des Uranpreis von 1972 bis 2006
Quelle: WNA 2009 *Market Report* (also earlier reports).IEA 2008 *World Energy Outlook.*

Entsprechend der Entwicklung des Uranpreises variiert auch der Mindesturangehalt eines Erzvorkommens, ab dem der Abbau auch ökonomisch sinnvoll ist.
Dieser auf die einzelnen Mineralvorkommen bezogene Mindestgehalt wird als Cut-Off bezeichnet.
Der aktuelle Cut-Off variiert zwischen ungefähr 0,1 bis 0,3% U_3O_8 (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, SCHWARZ; SCHAMPERA, 2007), wobei diese Werte als Richtwerte zu betrachten sind.
Der Cut-Off ist sehr lagerstättenspezifisch und steht in engem Zusammenhang mit verschiedenen Faktoren wie zum Beispiel der Verteilung der Uranmineralisation im Boden, der Entwicklung

des Uranpreises, der Abbau- bzw. der Aufbereitungsmöglichkeiten, der Infrastruktur, der Verfügbarkeit ausgebildeter Arbeitskräfte und den Umweltauflagen ab.
Der Cut-Off ist weiters auch von den unterschiedlichen Abbaukonzepten und den unterschiedlichen Kostenstrukturen der einzelnen Bergbauunternehmen abhängig.

Bei steigendem Uranpreis wird auch der Abbau von Lagerstätten, deren Urangehalt geringer als 0,1% U_3O_8 beträgt, ökonomisch interessant

4.1 Globale Entwicklung des Uranmarktes

Der weltweite Uranbedarf 2010 beträgt 68646 Tonnen, wobei 2008 die geschätzte weltweite Uranproduktion 43853 Tonnen betrug.
Der Bedarf an Uran wird sich abhängig von einer niedrigen oder hohen Nachfrage im Zeitraum bis 2015 in einem Rahmen von etwa 82.500 t U bis etwa 100.800 t U bewegen.

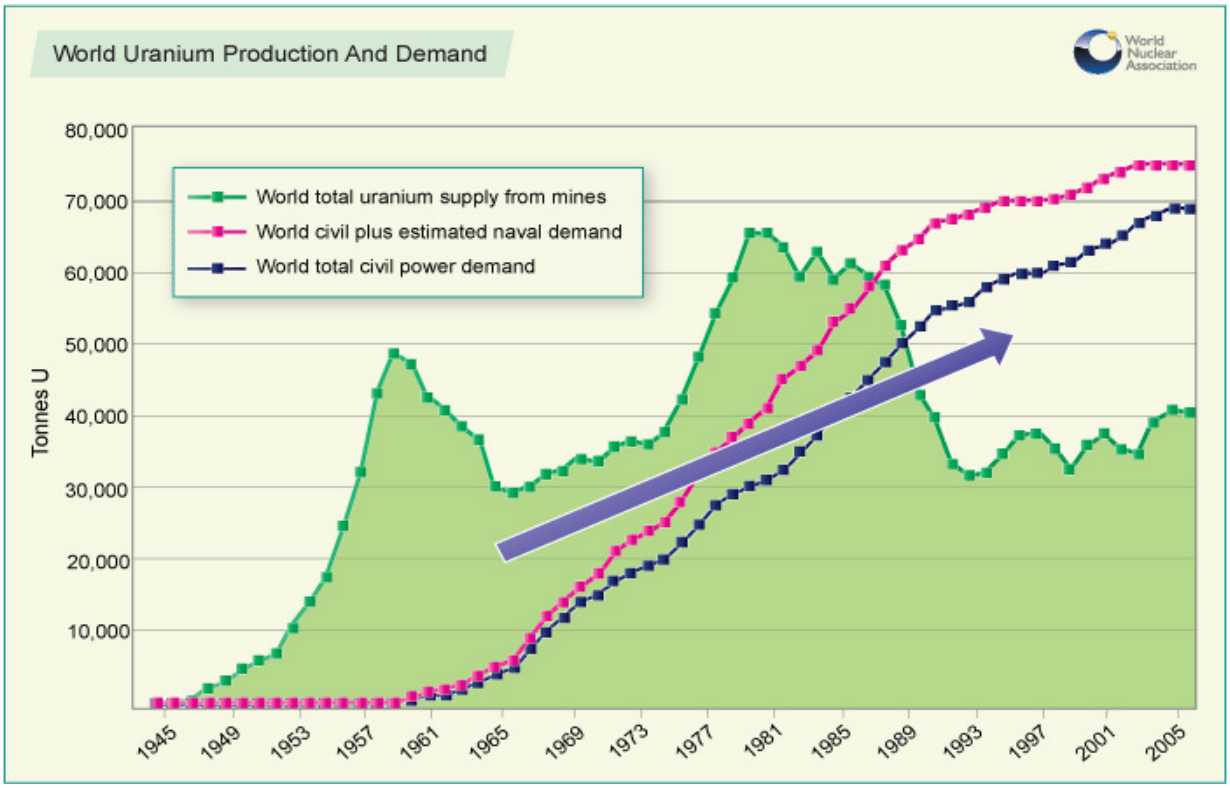
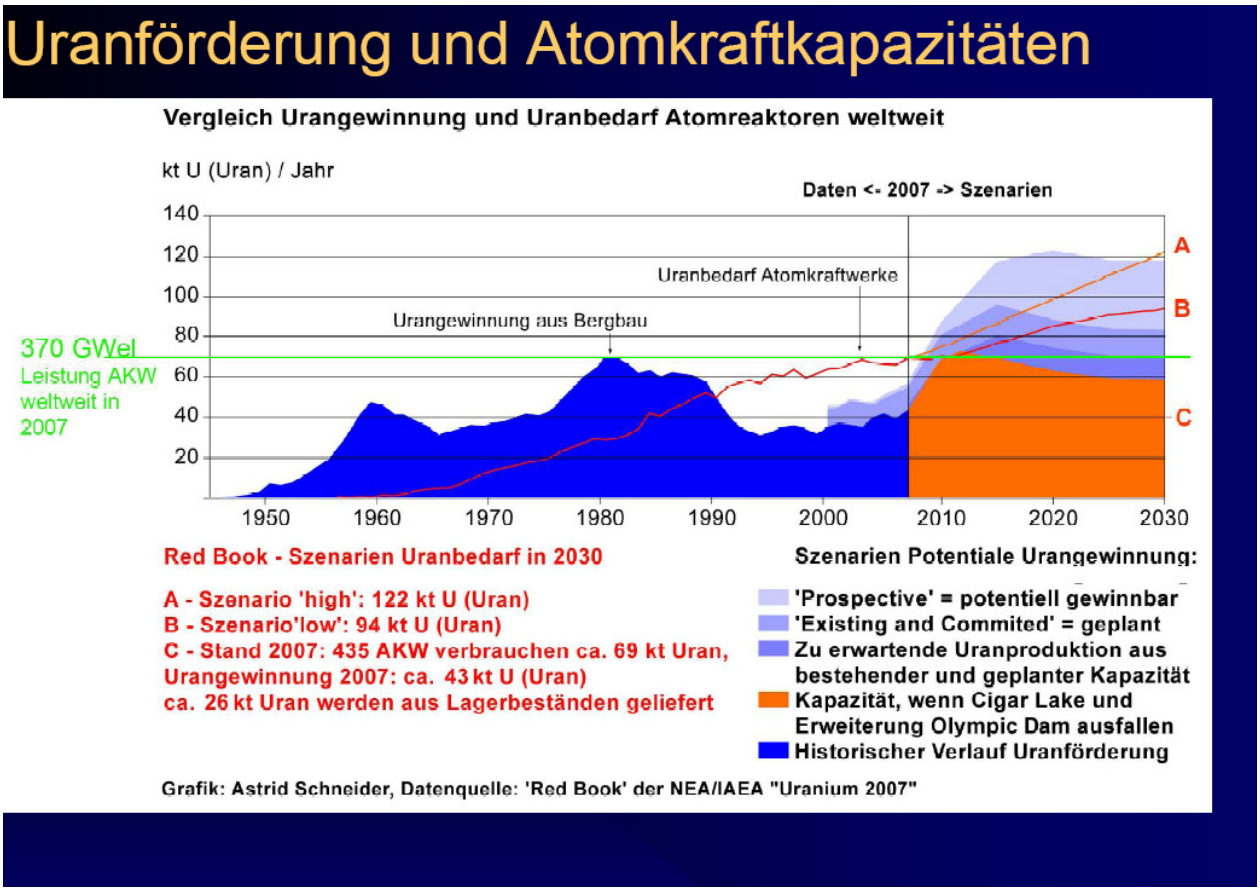


Abbildung 8: Zukünftiger Uranbedarf
Quelle: WNA 2009 *Market Report* (also earlier reports).IEA 2008 *World Energy Outlook.*



Quelle: WNA 2009 *Market Report* (also earlier reports).IEA 2008 World Energy Outlook.

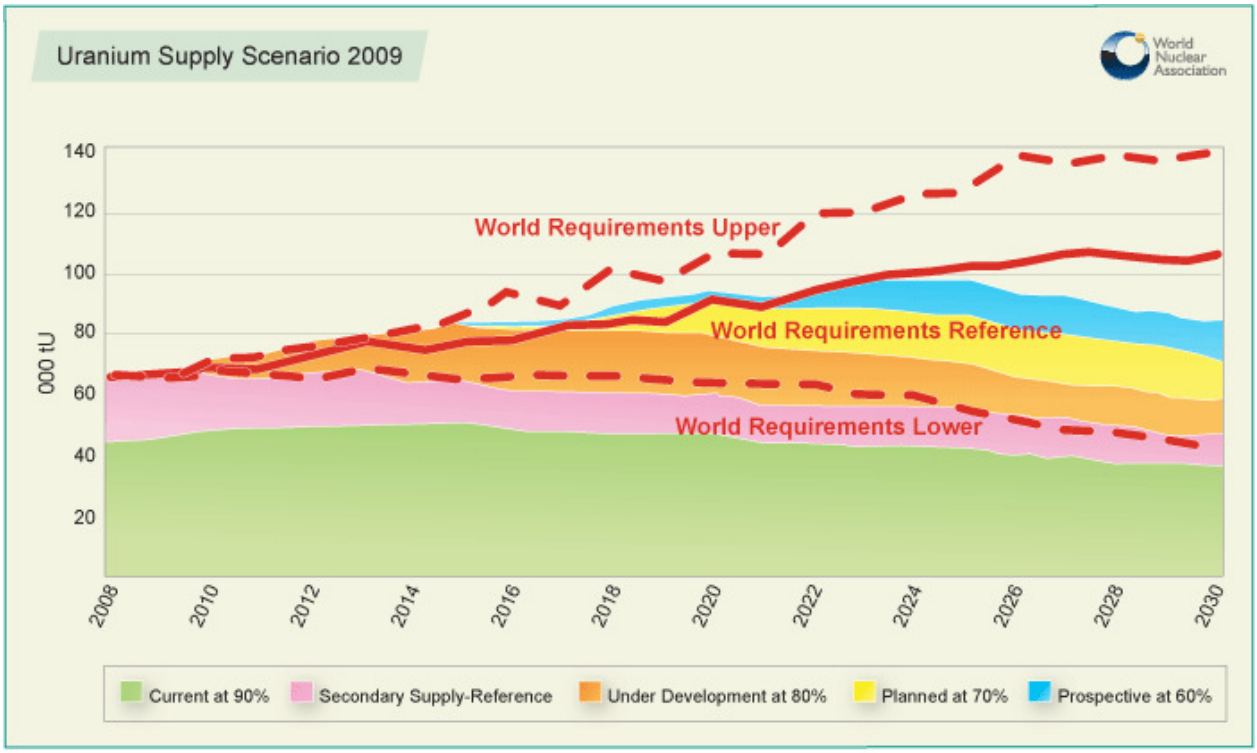


Abbildung 9: World's Nuclear Power Reactors and Uranium Requirements

Quelle: WNA 2009 *Market Report* (also earlier reports).IEA 2008 *World Energy Outlook.*

Beide Grafiken zeigen deutlich, dass ab 2030 die Nachfrage nach Uran bei einem hohen Ausbau der Atomkraft (Bedarf 122 000 t Uran) das Angebot übersteigt und Engpässe in der Uranförderung auftreten werden.

Im Szenario mit einem niedrigeren Bedarf von 94000 t Uran wird unter Ausnutzung bis dahin nicht geförderter potentiell gewinnbarer Uranbestände (teilweise bis dahin nicht ökonomisch rentabel im Abbau) die Nachfrage abgedeckt und es bleiben noch nutzbare Ressourcen, deren Ausbeutung auch wirtschaftlich ist.

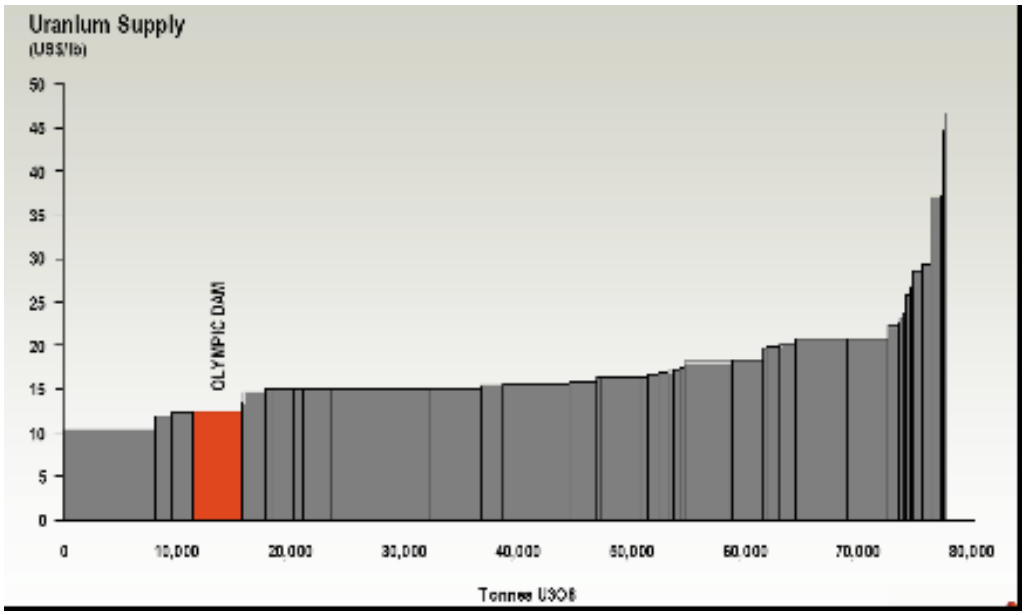


Abbildung 10: Kosten in Abhängigkeit der weltweiten Fördermenge
Quelle: Dave Forest, Resource Investor. A Summit Business Media publication6/22/2010

Die Grafik zeigt die Entwicklung der Kosten der Uran Produzenten, wobei deutlich ersichtlich ist, dass die Abbaukosten bei höheren Abbaumengen (ab 60 000 tU/Jahr) deutlich steigen. Durch den ebenfalls steigenden Uranpreis (Nachfrage übersteigt Angebot, Erschließung bis dahin unökonomischer Lagerstätten) versucht man den Abbau weiter ökonomisch zu halten.
Weitere Kostenfaktoren, die die Wirtschaftlichkeit des Abbaus beeinflussen, sind Umweltauflagen, Entsorgungskosten, Lagerkosten, Personalkosten, Kosten für die Anlagen und technischen Einrichtungen, Kosten für die Haftung für Unfälle.

Die **CAMECO** Uranmine in Saskatoon, Sakatchewan, Canada veröffentlichte in ihrem vierteljährlichen Report, die aktuellen Kostenzahlen:

2010 first quarter financial results by segment

Uranium

Highlights	Three months ended March 31 2010	2009	change
Production volume (million lbs)	**6.1**	4.8	27%
Sales volume (million lbs)	**6.6**	7.1	(7)%
Average spot price ($US/lb)	**41.79**	44.67	(6)%
Average realized price			
($US/lb)	**42.34**	36.71	15%
($Cdn/lb)	**45.79**	46.72	(2)%
Cost of sales ($Cdn/lb U_3O_8) (including DDR)	**29.81**	30.20	(1)%
Revenue ($ millions)	**305**	336	(9)%
Gross profit ($ millions) (revenue less cost of sales)	**102**	116	(12)%
Gross profit (%)	**33**	34	(3)%

depreciation, depletion and reclamation (DDR)
(Abschreibungen, Uranverluste beim Abbau, Rückgewinnung)

Tabelle 5: Kostenaufstellung einer Uranmine

Kostenaufstellung April bis Juni 2010:				
(Unaudited) ($Cdn Thousands)	**Three Months Ended**		**Six Months Ended**	
	Jun 30/10	**Jun 30/09**	**Jun 30/10**	**Jun 30/09**
Expenses				
Products and services sold	**315,210**	351,608	**566,743**	635,351
Depreciation, depletion and reclamation	**64,245**	58,804	**117,531**	107,449
Administration	**29,597**	30,189	**61,053**	60,917
Exploration	**17,743**	12,188	**32,910**	22,420
Research and development	**933**	1,081	**1,621**	2,213
Interest and other	**1,608**	-27,795	**5,409**	-14,757
Losses (gains) on derivatives	**59,675**	-101,184	**17,050**	-72,246
Cigar Lake remediation	**5,126**	4,688	**7,839**	10,192
Loss (gain) on sale of assets	**-51**	-1,948	**183**	-2,154
	494,086	327,631	**810,339**	749,385

1€ = 1,3186 CAD (Stand 19. August 2010)
1€ = 1,2799 USD (Stand 19. August 2010)

5 Einfluss von gen 4 Reaktor-Technologien

Die Ressourcenfrage für mögliche zukünftige Reaktortypen hängt wesentlich davon ab, welche Technologien tatsächlich entwickelt und zum Einsatz gebracht werden. Unter der Reaktorgeneration IV (Gen 4) versteht man Systeme zur nuklearen Energie- zumeist Stromerzeugung, die derzeit nicht industriell genutzt werden da funktionierende Prototypen auf Grund nicht gelöster technischer Probleme nicht vorhanden sind. Von seiten der Industrie wird aber deren Anwendung in der mittelfristigen Zukunft, gemeinhin nach dem Jahr 2030 gesehen. Gen4 Systeme unterscheiden sich teilweise erheblich von den im Einsatz befindlichen Reaktortypen. Die Ideen für die unter dem Begriff Gen 4 zusammengefassten Reaktorkonzepte gehen großteils auf die 1960-er Jahre zurück. Es werden andere kernphysikalische Reaktionen verwendet, andere Materialien kommen zum Einsatz, der Reaktoraufbau ist zumeist nicht vergleichbar mit heutigen Anlagen. Es handelt sich aber nicht um Reaktoren die das Prinzip der Kernfusion (Fusionsreaktor) verwenden sondern um Kernspaltung eines Brennstoffs
Aus der Vielzahl von Ideen für neuartige Reaktoren wurde durch das „Generation IV International Forum – GIF“ eine Auswahl von 6 Konzepten getroffen um die Entwicklungsmittel und Ressourcen in Hinkunft auf diese zu konzentrieren. Andere Konzepte sind zwar prinzipiell möglich, scheinen aber unter den derzeitigen Umständen weniger geeignet, etwa weil wichtige Bewertungskriterien nicht ausreichend erfüllbar sind.
Im GIF haben sich die Länder mit gemeinsamen Interesse zur Entwicklung von Generation IV Reaktoren zusammengeschlossen, dazu gehören die EU-Staaten vertreten durch EURATOM sowie Argentinien, Brasilien, Kanada, China, Frankreich, Japan, Korea, die Russische Föderation, Schweiz, Südafrika, Großbritannien und die USA.

Die nachfolgende Betrachtung beschränkt sich auf die Auswahl der 6 Gen 4-Konzepte unter Bezug auf den benötigten Brennstoff. Es werden Fragen der Anlagensicherheit, der Proliferationsresistenz, der technologischen Machbarkeit, der finanziellen und ökonomischen Darstellbarkeit, des Abfalls, mögliche Umwelteinflüsse und Auswirkungen sowie die öffentliche Wahrnehmung und Akzeptanz hier nicht näher betrachtet.
Neben annehmbaren Entwicklungskosten und der prinzipiellen Machbarkeit gehören zu den Anforderungen für Generation IV-Systeme:

- Hohe Betriebssicherheit und Verfügbarkeit
- Vertretbare Gesamtökonomie/Errichtungs- und Betriebskosten
- Technologischer Schutz vor Proliferation
- Nachhaltigkeit

Der letzte Punkt beinhaltet eine sichere und langfristige Versorgung mit Betriebsmitteln und Kernbrennstoff. Aufgrund der technologischen Unterschiede zu herkömmlichen Reaktoren sind auch Gen 4-Brennstoffe keine heute üblichen Kernbrennstoffe, vielmehr sollen neue oder erst zu erzeugende Spaltstoffe verwendet werden, teilweise auch in herkömmlichen Leichtwasserreaktoren abgebrannter Kernbrennstoff. Diese Stoffe sind mithin nicht beliebig verfügbar und teils mit dem Brennstoffkreislauf von anderen Reaktoren verwoben und auf den Betrieb dieser Reaktoren angewiesen. Sie müssen über Zwischenschritte durch Abtrennung und Aufbereitung gewonnen werden. Grundsätzlich wurde jedoch bereits bei der Auswahl der Gen 4-Designs auf die Brennstoffverfügbarkeit als ein wichtiges Kriterium geachtet.

Zu den 6 durch das GIF ausgewählten Gen4 Konzepte gehören:

- Gasgekühlter schneller Reaktor (GFR)
- Super Hoch-Temperatur Reaktor (VHTR)
- Superkritischer Wasser-gekühlter Reaktor (SCWR)
- Natriumgekühlter schneller Reaktor (SFR)
- Bleigekühlter schneller Reaktor (LFR)
- Salzschmelze-Reaktor (MSR)

Gasgekühlter schneller Reaktor (GFR)

Dieses Reaktorkonzept arbeitet ohne Moderation (mit schnellen Neutronen) und soll sich im Bereich einer elektrischen Leistung von etwa 1200 MW_e bewegen mit Helium-Kühlung und geschlossenem Brennstoffkreislauf. Die Reaktoraustrittstemperatur liegt über 800 °C, was einen hohen thermischen Wirkungsgrad ermöglicht, dies senkt den gesamten Brennstoffeinsatz. Durch die Verwendung schneller Neutronen werden enorme Anforderungen an die Reaktionsgeschwindigkeit der Reaktorsteuersysteme gestellt. Dieser Umstand ist augenscheinlich das Problem das bis heute eine Umsetzung derartiger Reaktoren verhindert hat. Im Prozess wird aus Natururan Brennstoff durch Neutroneneinfang erbrütet, damit ist der GFR weitgehend unabhängig von Uran-235 Vorkommen und kann mit dem 300 mal häufiger vorhandenem Uran-238 betrieben werden, welches auf absehbare Zeit als unerschöpflich anzusehen ist. Würden weltweit nur GFR betrieben werden, so würden die derzeit als gesichert abbauwürdig verfügbaren Uranreserven etwa 30 000 Jahre ausreichen.

Super Hoch-Tempereatur Reaktor (VHTR)

Die Kernspaltung verläuft bei diesem Reaktorkonzept überwiegend mit in Graphit moderierten Neutronen. Der Uranbrennstoff muss deshalb schwach angereichert werden, was die Ressourcenfrage der Reichweite für U-235 berührt. Der erste Prototyp eines VHTR sollte ab 2010 in Südafrika errichtet werden, das Projekt wurde aber aus Geldmangel und aufgrund technischer Probleme vorerst gestoppt. Im VHTR sollen Betriebstemperaturen von etwa 1000 °C herrschen, was den Typ auch für die Wasserstoffherstellung (etwa für den Verkehrssektor) prädestiniert. Dieser Umstand stellt aber auch wesentlich erhöhte Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe. Durch die Notwendigkeit von U-235 als Spaltstoff würde trotz höherem Wirkungsgrad und dem energetischen Beitrag von schnellspaltenden Neutronen im U-238 beziehungsweise Brut- und Spaltprozesse keine wesentliche Verbesserung gegenüber heute verwendeten thermischen Reaktoren schlagend werden – die Reichweite der gesicherten Ressourcen wäre bei einem Einsatz von VHTR im Ausmaß der heutigen Kernenergie also etwa ebenso lange wie bei der bestehenden Reaktortechnik.

Superkritischer Wasser-gekühlter Reaktor (SCWR)

Dabei handelt es sich um eine Siedewasserreaktorkonzept der mit hohem Druck (25 MPa) und hoher Temperatur (etwa 510 °C) Es könnte damit gegenüber anderen Reaktoren einen hohen thermischen Wirkungsgrad erzielt werden. Er kann entweder als thermischer Reaktor mit angereichertem Uran oder als schneller Reaktor – wie etwa das GFR Konzept - errichtet werden. In erstem Fall stellt sich die Ressourcenfrage nach U-235 auf Grund des besseren Wirkungsgrades lediglich in etwas geringerem Maße als bei vergleichbaren heutigen Anlagen. Im zweiten Fall wird der Spaltstoff aus Natururan oder U-238 erbrütet, ein schnelles Neutronenspektrum ist vorherrschend, welches auch schwerspaltbares U-238 durch Einfang und

Umwandlung über Betazerfall anspricht um Plutonium-239 zu erzeugen. Eine geeignete Anlagengröße läge bei 1700 MWe
Im Falle des hypothetischen Vollausbaus der Kernenergienutzung in heutigem Umfang aber nur mit SCWR Reaktoren auf thermischer Basis wäre die Reichweite der kritischen Ressource U-235 nach gegenwärtig gesichert geltenden abbauwürdigen Vorkommen etwa im Bereich von 100 - 150 Jahren. Bei der Verwendung der Variante unter Verwendung des schnellen Neutronenzyklus wäre in Bezug auf den Spaltstoff die Reichweite des als gesichert abbauwürdigen U-238 (Reasonably Assured Resources plus Inferred Resources) mit 6,3 mio Tonnen als Basisressource bei heutiger Nutzungsintensität der Kernenergie ausschließlich auf Basis von SCW Reaktoren wie im Fall des GFR-Konzepts etwa 30.000 Jahren.

Natriumgekühlter schneller Reaktor (SFR)

Dieses Generation IV-Konzept besäße eine optimale Anlagengröße von 300 – 600 MWe für einen Pool-Typ bzw 600 – 1500 MWe für einen Loop-Typ Reaktor. Der SFR ist der einzige Gen4 Typ, der zumindest ansatzweise bereits heute industriell umsetzbar ist, jedoch sollen zukünftige Anlagen neben Natururan und Plutonium auch weitere Transurane aus dem herkömmlichen Kernbrennstoffkreislauf verwenden und verbrennen können. Je nach Zusammensetzung des Brennstoffs könnte der SFR einen Kreislauf auf Basis von Natururan realisieren oder müsste auf Abfälle gegenwärtiger KKW zurückgreifen, die wiederum vom Vorhandensein von U-235 abhängen. Der SFR kann etwas mehr Spaltstoff erbrüten, als er selbst für den Betrieb benötigt, dafür wird Uran-238 benötigt, welches relativ reichlich und etwa 300 mal mehr als U-235 vorhanden ist Die Reichweite unter Ausnutzung der größten Ressourcenmenge und damit die Fokussierung auf die notwendige „schnelle“ kernphysikalische Reaktion würde in etwa der des GFR entsprechen. Bei einem Ausbau der Kernenergienutzung würden sich die Reichweiten entsprechend verringern.

Bleigekühlter schneller Reaktor (LFR)

Dieser Reaktor für schnelle Neutronen gilt als einer der Hoffnungsträger im Bereich Brennstoff. Je nach Design ist er als Uran/Plutonium Brüter konstruierbar oder kann mit Thorium betrieben werden. Bei Bedarf kann er auch minore Aktiniden etwa aus herkömmlichen Leichtwasserreaktoren (LWR) verwerten und könnte dann gleichzeitig als Brüter und Brenner arbeiten. Je nach Anforderung braucht der LFR nicht auf U-235 zurückzugreifen, sondern kommt mit Natururan oder Thorium aus, welches bisher kerntechnisch nicht industriell verwendet wird und in größeren Mengen als Uran vorhanden ist. Der LFR sollte optimal mit einer Blockleistung von 300 – 1200 MWe errichtet werden und ist damit mit derzeitigen Anlagengrößen vergleichbar. Sein thermischer Wirkungsgrad ist wegen der Kühlmittelaustrittstemperatur von ca. 550 °C relativ hoch, was die Brennstoffausnutzung weiter verbessert.
Die Ressourcenreichweite entspräche der von SFR und GFR.

Salzschmelze-Reaktor (MSR)

Die Spaltstoffe wären bei diesem Konzept in einer Fluor-Salzschmelze gelöst, Kühlmittel (Salz) und Brennstoff wären somit homogensiert. Der Reaktor stellt eine lokale Verdickung des Kühlkreislaufs dar, sodass die Schmelze kritisch wird. Bei dem permanent arbeitenden System können Brennstoff und Abfallprodukte kontinuierlich zugefügt und abgetrennt werden. Das Neutronenspektrum ist thermisch bis semithermisch, da ein Graphitmoderator zum Einsatz kommen soll. Der MSR fokussiert als Brenner/Brüter vorwiegend auf die effiziente Verbrennung

von minoren Aktiniden aus abgebranntem Brennstoff von Leichtwasserreaktoren und Plutonium, welches durch Neutroneneinfang aus Natururan erbrütet wird. Je nach Neutronenspektrum könnten unterschiedliche Aktinide verwertet werden, dies bedarf im Einzelfall aber der Zugabe von U-235 als Brennstoff. Der MSR wäre damit nicht unabhängig von anderen Systemen zu sehen und benötigte auch das begrenzt verfügbare U-235, jedoch in geringerem Maße als bei in der Leistung vergleichbaren heutigen Reaktoren. Durch die Kühlmittelaustrittstemperatur von 700 – 800 °C des Primärsystems kann ein relativ hoher thermischer Wirkungsgrad erzielt werden. Je nach Ausrichtung auf die Verwertung von vorhandenen minoren Aktiniden aus thermischen Leichtwasserreaktoren ergibt sich eine rechnerische Reichweite für den Einsatz von etwa 100 Jahren auf Basis der gesichert und abbauwürdig angesehenen Uranlagerstädten zum Betrieb der benötigten LWR. Bei Konzentration auf andere Prozesse ohne oder mit nur geringer Verknüpfung mit dem gegenwärtigen Kernenergiesektor ließe sich weitgehend unabhängig von zugegebenen Transuranen und auch U-235 operieren, was die Reichweite der Technologie verlängern könnte.

So unterschiedlich die einzelnen Gen4-Konzepte sind, so unterschiedlich ist auch die langfristige Versorgungssicherheit mit Kernbrennstoff. Manche Gen4 Designs kommen gänzlich ohne U-235 aus und können in eigenständigen Kreisläufen aus dem relativ häufig verfügbaren Natururan, abgereichertem Uran (im wesentlichen U-238) oder auch aus Thorium den benötigten Spaltstoff erbrüten, der parallel kontinuierlich verbrannt wird.
Rechnerisch betrachtet und ohne Berücksichtigung anderer möglicherweise kritisch verfügbaren Betriebsstoffen wie seltene Erden und Edelmetalle für technologische Komponente wäre die zeitliche Reichweite unter optimaler Ausnutzung von Uran und einer Kernenergienutzung im gegenwärtigen weltweiten Ausmaß bis etwa 30.000 Jahren denkbar, je nachdem welche Type tatsächlich zum Einsatz käme und unter Berücksichtigung der gegenwärtig (2010) als gesichert abbauwürdig betrachteten Uranweltvorräte von 6,3 mio Tonnen. Durch die Verwendung des Thoriumkreislaufs würde etwa ebensoviel Energie bereitgestellt werden, jedoch sind die Vorräte an Thorium aufgrund im Vergleich zu Uran geringer Expolrationstätigkeit mit bedeutenden Unsicherheiten behaftet.
Andere Typen benötigen Produkte aus der nuklearen Brennstoffkette – etwa Abfall oder Abfallfraktionen bestehender Leichtwasserreaktoren. Ein Teil der Gen 4 Konzepte benötigt tatsächlich – teils auch abhängig von der Betriebsweise und der Zugabe anderer notwendiger Stoffe, die etwa Neutronen einfangen können, zusätzliches U-235, welches in absehbarer Zeit den Stoff mit der geringsten zeitlichen Reichweite darstellt.
Gen 4-Konzepte auf der Basis von U-235 haben mithin eine wesentlich kürzere Ressourcenreichweite, die teils nur im Bereich der heute verwendeten Reaktorkonzepte läge.

Es bestehen also erhebliche Unterschiede bei der Ausnutzung von Ressourcen durch Gen 4 Reaktoren. Das Gen 4-Konzepte die Brennstofffrage zumindest theoretisch unmittelbar lösen könnten, ist damit nur in Bezug auf den GFR, SFR, und LFR (die schnellen Reaktoren) richtig und nur teilweise in Bezug auf SCWR und MSR (je nach Verwendung des n-Spektrums). Keine wesentliche Verbesserung gegenüber heutiger Reichweite würde durch den VHTR erzielt werden, der allerdings eines der am weitesten fortgeschrittene Gen 4-Typen-Konzepte ist.

6 Nicht-technische Aspekte der Ressourcengewinnung

Die Betrachtung der nicht technischen Aspekte der Gewinnung der Ressource Uran werden vom Abbau über die Zerkleinerung bis hin zum Zwischenprodukt Yellowcake betrachtet. Die darauf folgenden Schritte bis hin zur Brennelementfertigung werden in der Folge nicht behandelt.

6.1 Industrielle Konzentration

Die weltweiten Uranressourcen konzentrieren sich großteils ein wenigen Staaten (vgl. Kapitel 2). Der Staat mit den mit Abstand größten Ressourcenreserven ist Australien, gefolgt von Kasachstan und Russland.

Tabelle 6:Bekannte einholbare Ressourcen 2009

Land	Tausend Tonnen U	Prozent weitweit
Australia	1673	31
Kazakhstan	651	12
Canada	485	9
Russia	480	9
South Africa	295	5
Namibia	284	5
Brazil	279	5
Niger	272	5
USA	207	4
China	171	3
Jordan	112	2
Uzbekistan	111	2
Ukraine	105	2
other	279	5
World total	**5 404**	

Weltweit gibt es 10 große Unternehmen, welche Uran abbauen. Diese Unternehmen haben einen Marktanteil von rund 89 Prozent. (SieheTabelle 7:Uranabbauunternehmen weltweit) Alleine die 5 Hauptakteure (Areva, Cameco, Rio Tinto, KazAtomProm, ARMZ) produzierten 2009 rund 73% des weltweit hergestellten Yellowcakes.

Tabelle 7:Uranabbauunternehmen weltweit (Quelle: WNA, ISR BOKU Wien)

Firma	Land	Produktion 2009 [tU]	%	Minen
Areva	Frankreich	8623	17	McArthur River(Kan), SOMAIR, COMINAK(Niger), Moinkum (Kaz), McCLean Lake(Kan)
Cameco	Kanada	8000	16	McArthur River(Kan), Inkai (Kaz), Rabbit Lake (Kan)
Rio Tinto	MNU (GB)	7963	16	Rössing (Namibia), Ranger (Aus)
KazAtomProm	Kasachstan	7467	15	Central & West Mynkuduk, Zarehnoje, Budenovskye 2 (Kaz)
ARMZ	Russland	4624	9	Krasnokamensk (Rus)
BHP Billiton	MNU (GB/AU)	2955	6	Olymic Dam (Aus)
Navoi	Usbekistan	2429	5	Uchkuduk, Nurabad, Zafarabad (Usb)
Uranium One	MNU (SA/CA)	1368	3	South Inkai (Kaz), Karatau (Kaz), Kharasan (Kaz)
Paladin	Australien	1210	2	Langer Heinrich (Namibia)
GA/Heathgate	USA	583	1	Beverley (Aus)
Other		5384	11	
Total		**50,772**	100%	

6.2 Nicht technische Unsicherheitsfaktoren der Gewinnungskette

Unter nicht technischen Unsicherheitsfaktoren der Gewinnungskette werden Aspekte verstanden, welche direkten und indirekten Einfluss auf die Ressourcengewinnung haben können. Hierzu werden ökonomische, ökologische und soziale Aspekte angeführt welche einen entscheidenden Einfluss auf die Gewinnungskette haben können.

6.2.1 Politische Faktoren

Das politische Umfeld spielt für die Exploration, die Gewinnung und den Export von Rohstoffen eine entscheidende Rolle. Unsicherheit und Instabilität wirkt sich negativ auf die potentiellen Produktionsmengen und deren Export aus. Es handelt sich in den meisten Fällen neben dem nationalen, um das regionale und lokale Umfeld, welches hier von entscheidender Bedeutung ist. Dies gilt vor allem für das betreiben von Minen und Mühlen. Signifikante oder abrupte Änderungen in der Gesetzgebung verunsichern Minenunternehmen und wirken sich negativ auf die Rohstoffverfügbarkeit aus. Das politische Umfeld muss vor dem Hintergrund von Infrastrukturmaßnahmen beleuchtet werden. Es bedarf in vielen Situationen staatlicher Unterstützung, wenn es um den Aufbau der notwendigen Infrastruktur geht. Diese notwendige Infrastruktur umfasst Strassen, Elektrizitätsversorgung, Wasserversorgung, Versorgung mit Säure, und Möglichkeiten und Rahmenbedingungen zum Export der Güter. Die Rahmenbedingungen für den Export spielen insofern eine entscheidende Rolle als Ausfuhrrestriktionen beziehungsweise –beschränkungen, Schutzzölle oder Erhöhungen von Steuern als wichtige Faktoren für den potentiellen Uranabbau gelten. Uranium One wirft etwa am Beispiel Kasachstan die Frage auf, in wie weit ausländische Firmen durch deren nationale Gesetzgebung gegen Korruption, einen klaren Wettbewerbsnachteil gegen Unternehmen haben, welche nicht an solche gesetzlichen Rahmenbedingungen gebunden sind.

6.2.2 Legislative Faktoren

In zahlreichen Staaten, welche über Uranressourcen verfügen, herrscht Ungewissheit im Bezug auf eine mögliche Verstaatlichung des Bergbaus. Der Schutz der Eigentumsrechte ist in einigen Staaten zwar aktuell gewährleistet, doch kann diese Situation kippen.

6.2.3 Ökonomische Faktoren

Zahlreiche ökonomische Risiken machen die Investition in Exploration und Abbau von Uran riskant. Uranabbauende Firmen wie etwa Uranium One beschreiben in ihren Jahresberichten Unsicherheiten aufgrund von Währungsschwankungen und der Preisvolatilität von Uran, welche bedeutende Auswirkungen auf die Rentabilität der Minen haben. Diese können zu Liquiditätsengpässen führen und damit zu Verzögerungen bei der Etablierung neuer Minen. Die globale Finanz- und Kreditkrise hat unter anderem auch negative Auswirkungen auf die Entwicklung der globalen Uran Abbaukapazitäten, da Kredite zunehmend teuer werden und sich damit negativ auf die Profite auswirken.

6.2.4 Soziale Faktoren

In Ländern mit einer starken Zivilgesellschaft mehren sich kritische Stimmen zu Uranminen, -mühlen und Konversionsanlagen, in der Nähe von Siedlungen. Es formieren sich Bürgerinitiativen gegen Uranminen und Uranmühlen, vor allem aufgrund der berechtigten Sorge vor der Belastung der Luft, des Wassers und der Erde durch Radionuklide. Weitere Proteste richten sich gegen die Verunstaltung des Landschaftsbildes und die damit verbundenen negativen Auswirkungen auf die Lebensqualität. In Ländern mit autoritären Regierungsstrukturen sind solche Bedenken der betroffenen Bevölkerung entweder nicht denkbar oder werden teils durch Gewaltanwendung unterdrückt.

6.2.5 Ökologische Faktoren

Zu den ökologischen Unsicherheiten des Uranabbau und der Uranmühlen zählen unter anderem Abfälle, welche langlebige Radionuklide enthalten, ebenso wie die Emissionen von Uranminen, welche Radon freisetzen. Aus der Tagebaugrube, den Halden und durch die Staubentwicklung beim Sprengen, Auf- und Abladen und Zermahlen des Erzes werden radioaktive Stoffe freigesetzt und in der Umwelt verteilt.
Das gefährliche Radon-Gas entströmt in großen Mengen den Halden und den Gruben und wird durch den Wind über weite Strecken vertragen. Die flüssigen Abfälle, die zum Beispiel bei der Rössing Mine in Namibia nach offiziellen Angaben täglich 80000 m3 ausmachen, werden durch einen sogenannten Tailingsdamm zu einem See aufgestaut. Da Tailings-Becken oftmals durchlässigen Böden haben, gelangt radioaktives Material in den Wasserkreislauf.
Das kann auf Grund der in den Säuren und im radioaktiven Wasser gelösten langlebigen Radionuklide zu einer Kontamination der Umgebung und einer Beeinträchtigung des natürlichen Lebensraums von Menschen, Pflanzen und Tieren führen. Der natürliche Lebensraum wird darüber hinaus durch einen massiven Eingriff in das Landschaftsbild zusätzlich negativ beeinflusst, was allerdings auch auf andere Bergbauaktivitäten zutrifft
Ein weiterer bedeutender umweltrelevanter Faktor ist der Ausstoß von großen Mengen des Luftschadstoffs SO_2.

6.2.6 Conclusio

Einzelne bzw. eine Kombination der beschriebenen Faktoren kann die Verfügbarkeit von Ressourcen auf dem Weltmarkt stark einschränken und den Preis deutlich ansteigen lassen.

7 Prognosen des Bedarfs und der Versorgung

7.1 Prognosen des Bedarfs

Prognosen zur Entwicklung der Kernenergie und damit einhergehend dem zukünftigen Bedarf an Uran werden regelmäßig von der IAEO und auch der World Nuclear Association (WNA) getätigt. Die IAEO erstellt ein hohes und ein niedriges Bedarfsszenario. Die aktuellen Prognosen (2009) belaufen sich auf einen Bedarf von 127000 t U bzw. 88000 t U für das Jahr 2030. Die von der WNA bestimmten Szenarien liegen zwischen 50000 t U und 14000 t U.

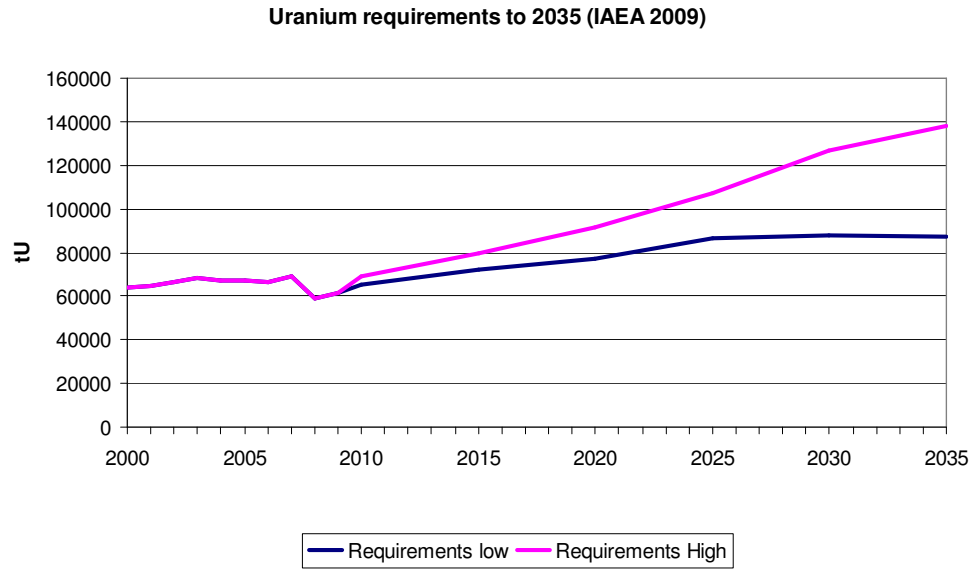


Abbildung 11: Uranium Requirement scenarios IAEO

7.2 Vergleich von Produktions- und Bedarfsszenarien

Durch die große Schwankungsbreite der Bedarfsprognosen ist ein Vergleich mit Produktionsszenarien naturgemäß mit noch größeren Unsicherheiten behaftet.
Ein möglicher Ansatz ist es die geplanten Produktionskapazitäten und möglicher sekundäre Quellen zusammenzuführen und mit den Szenarien zu vergleichen. In einer auf diese Weise gefertigten Darstellung der WNA zeigen sich für ein starkes Wachstum der Kernenergie Produktions- und Versorgungsengpässe bereits ab dem Jahr 2015.
Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Zusammenführung der Daten der IAEO in Abbildung 12 (vgl Kap 3.3). Sekundäre Quellen sind in dieser Darstellung nicht berücksichtigt. Einen Engpass in der Versorgung würde es nach diesem Szenario erst später geben.

Wichtig für die Betrachtung solcher Versorgungsszenarien ist es auch sich vor Augen zu halten, dass die Zeitspanne von der Entdeckung bis zum tatsächlichen Abbau an einer Mine einen deutlichen Anstieg über die letzten Jahre/Jahrzehnte(Abbildung 13). Obwohl dies auch auf eine fallende Nachfrage zurückzuführen ist, muss für eine neue Produktionsstätte auf jeden Fall mit Genehmigungs- und Errichtungszeiten von 5-15 Jahren gerechnet werden. Bei drohenden Versorgungsengpässen müsste daher schon frühzeitig reagiert und neue Planungen forciert werden.

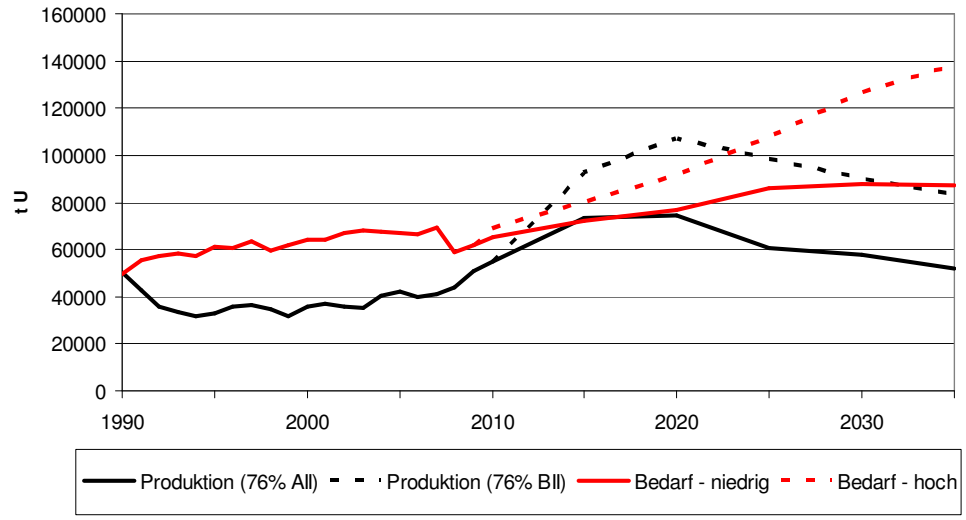


Abbildung 12: Vergleich von Prognosen für Produktion, Kapazität und Bedarf (Werte bis 2009 historisch, 2010 – 2035 Prognosen IAEA)
Quelle: Uranium 2005 -2009, und Redbook Redtrospective, OECD/IAEA

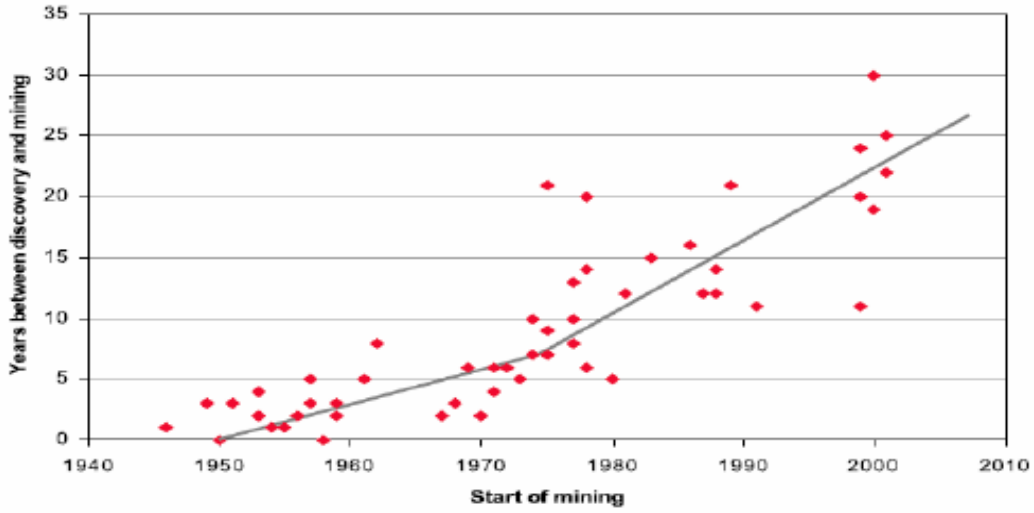


Abbildung 13: Zeit von der Entdeckung bis zur Inbetriebnahme von Uranminen
Quelle: OECD Redbook Redtrospective 2004

Eine umfassendere Darstellung der Verfügbarkeit ergibt sich aus der Kombination der Daten zur Minenproduktion mit den in den Lagerstätten verfügbaren Ressourcen. Es lassen sich neben einem Verfügbarkeitsbild entsprechend der Kapazitäten der nächsten Jahre auch Gesamtreichweiten für die aktuell bekannten Ressourcen bestimmen.
Entsprechende Darstellungen des Institutes für Sicherheits- und Risikowissenschaften der Boku Wien aus dem Jahr 2008, basierend auf Zahlen von 2007, zeigen des folgende.
RAR (Abbildung 14)**:** Bei voller Auslastung der Minen und plangemäßem Ausbau zeigt sich eine mögliche Deckung des Uranbedarfs rein aus der Primärproduktion, vor allem getrieben durch den starken Anstieg in Kasachstan. Man sieht jedoch auch, dass dann spätestens gegen Ende der 2020er mit einem starken Rückgang in der Produktion zu rechnen ist, der dann durch sekundäre Quellen ausgeglichen werden muss, welche nur in sehr begrenztem Umfang zur Verfügung stehen.

Identified Resources: Hier zeigt sich für den oben angenommenen Optimalfall die Möglichkeit zur Deckung des hohen Bedarfsszenarios durch Minen bis etwa 2025 und durch gebildete Reserven etwas darüber hinaus. Jedoch dürften aufgrund des folgenden Abfalls in der Produktion auch die Identified Ressources nur ausreichen um eine geringe Bedarfssteigerung längerfristig zu versorgen.

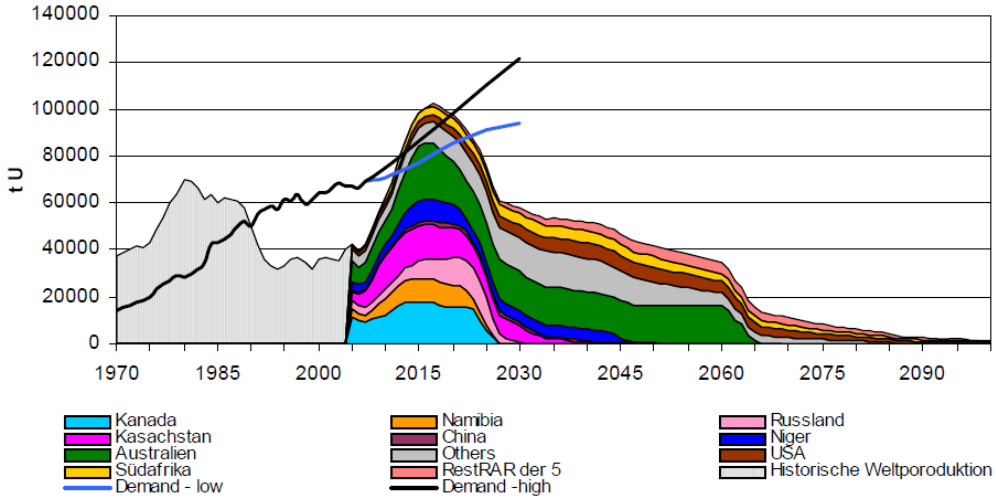


Abbildung 14: Abschätzung der Reichweite der RAR auf Minenbasis (volle Kapazität)
Quelle: ISR BOKU Wien, Nikolaus Arnold

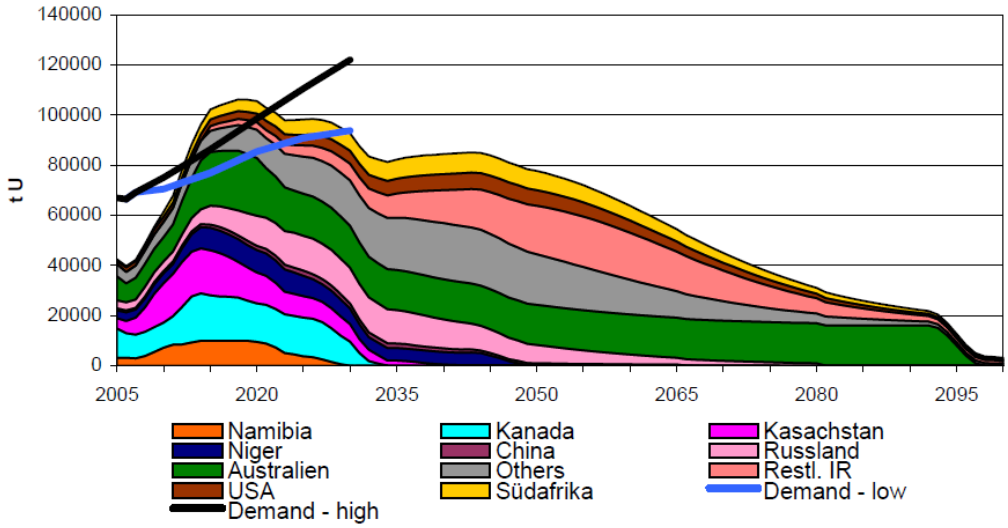


Abbildung 15: Abschätzung der Reichweite der Identified Resources auf Minenbasis (volle Kapazität)
Quelle: ISR BOKU Wien, Nikolaus Arnold

8 Uranprospektion in Österreich und Exploration sowie Bergbau in Forstau (Salzburg)

Die erste Uranprospektion in Österreich wurde bald nach 1955 durch das Institut für Geologie und Lagerstättenlehre der montanistischen Hochschule Leoben im *Bauxitbergbau Unterlaussa* durchgeführt. Erhöhte Urangehalte wurden in kohligen Schiefern der Gosauschichten über dem Bauxit festgestellt. Bald darauf organisierte die Österreichische Studiengesellschaft für Atomenergie in Zusammenarbeit mit der Geologischen Bundesanstalt und mehreren Universitätsinstituten eine regionale Uranerzsuche. Die ersten radiometrischen und geochemischen Untersuchungen wurden im *Kristallin der Böhmischen Masse* nördlich der Donau durchgeführt. Sie erbrachten keine wirtschaftlich verwertbaren Indikationen. Die in *Kohlenaschen einiger Braunkohlenbergbaue* (Trimmelkam, Langau und Berndorf) verstreuten isolierten hohen Urangehalte waren nicht wirtschaftlich verwertbar.
Angeregt durch Vergleichsbegehungen in den West- und Südalpen wurden (ab 1968) Prospektionsarbeiten im *Grödener Sandstein* nahe der jugoslawischen Grenze *bei Eisenkappe*l durchgeführt. Sie ergaben zwar örtlich erhebliche radioaktive Anomalien, die aber zu einem beträchtlichen Anteil auf Thorium zurückzuführen waren.

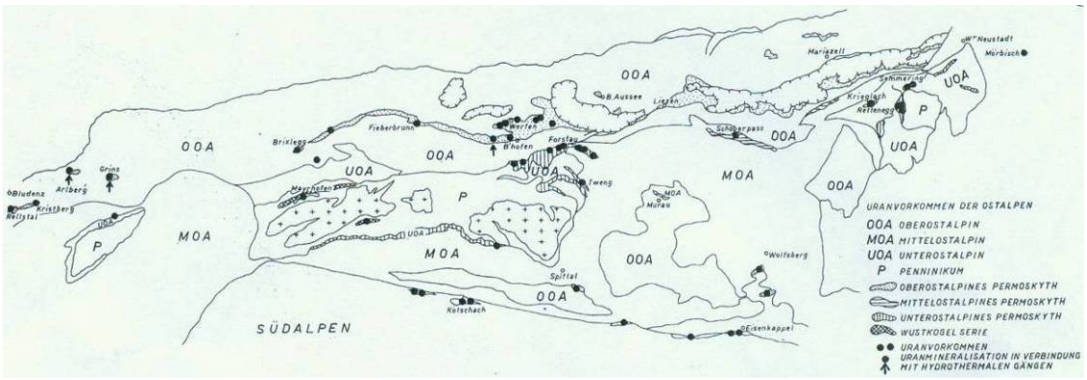


Abbildung 16: Uranvorkommen und Indikationen in den Ostalpen
Quelle.: Petraschek W. E., 1977, S.301

Die Mehrzahl der in Abb. 16 dargestellten Fundpunkte sind lokale radiometrische Anomalien.
O. SCHULZ (1970) fand erhöhte Urangehalte im *Bundsandstein bei Fieberbrunn* (Tirol).

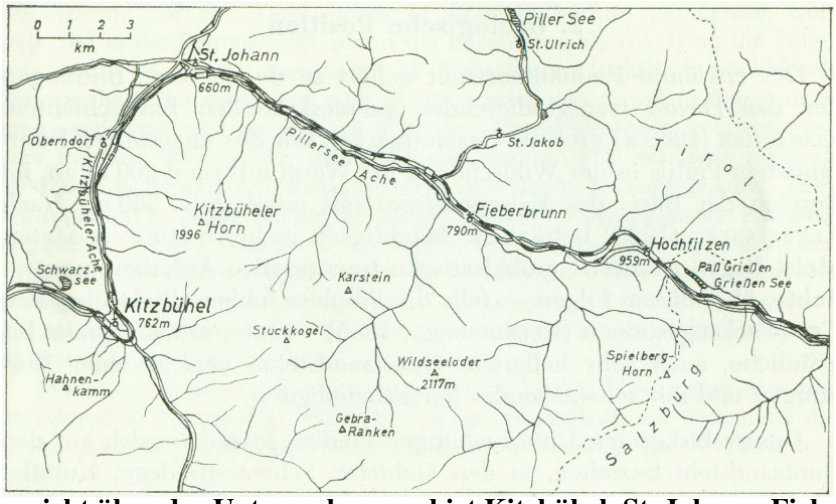


Abbildung 17: Übersicht über das Untersuchungsgebiet Kitzbühel, St. Johann, Fieberbrunn, Hochfilzen
Quelle.: Schulz O., Lukas W., 1970, S.216

Feinkörnige graue Quarzsandsteine und quarzsandige Serizitschiefer enthalten an Pflanzenreste gebundene Pechblende, häufig begleitet von Pyrit, Markasit und Kupferkies.
Die Prospektionsarbeiten der Bergbau- und Mineralgesellschaft 1968-1969 führten zur Entdeckung von rund 60 stärkeren Anomalien in Österreich.
Bergmännisch untersucht wurde die *Uranerzlagerstätte in Forstau* zwischen Radstadt und Schladming, über die weiter unten berichtet wird.

Andere sogenannte „Hoffnungsgebiete“ wurden insbesondere im Mitterberger Kupferbergwerk (BAUER und SCHERMANN, 1971), am Semmering (Prinzenkogel bei Rettenegg, Waldbach), auf der Fanninghöhe bei Tweng (Lungau), in Obertauern und südlich von Wald am Schoberpass erkannt.
Im ehemaligen *Kupferbergbau Mühlbach/Salzburg* fand man das Uranerz Uraninit in Verbindung mit gediegenem Gold in den unterpermischen violetten Schiefern. Das elementare Gold ist in Form von Drähten und Blechen an die nierenförmig ausgebildete Pechblende gebunden. Im Jahre 1974/75 wurde auf Sohle 7 eine Uranlaugungsanlage installiert und erstmals in Österreich Yellow Cake erzeugt. Durch Schließung des Kupferbergbaus im Jahre 1977 wurde hier die Forschungsherstellung eingestellt.

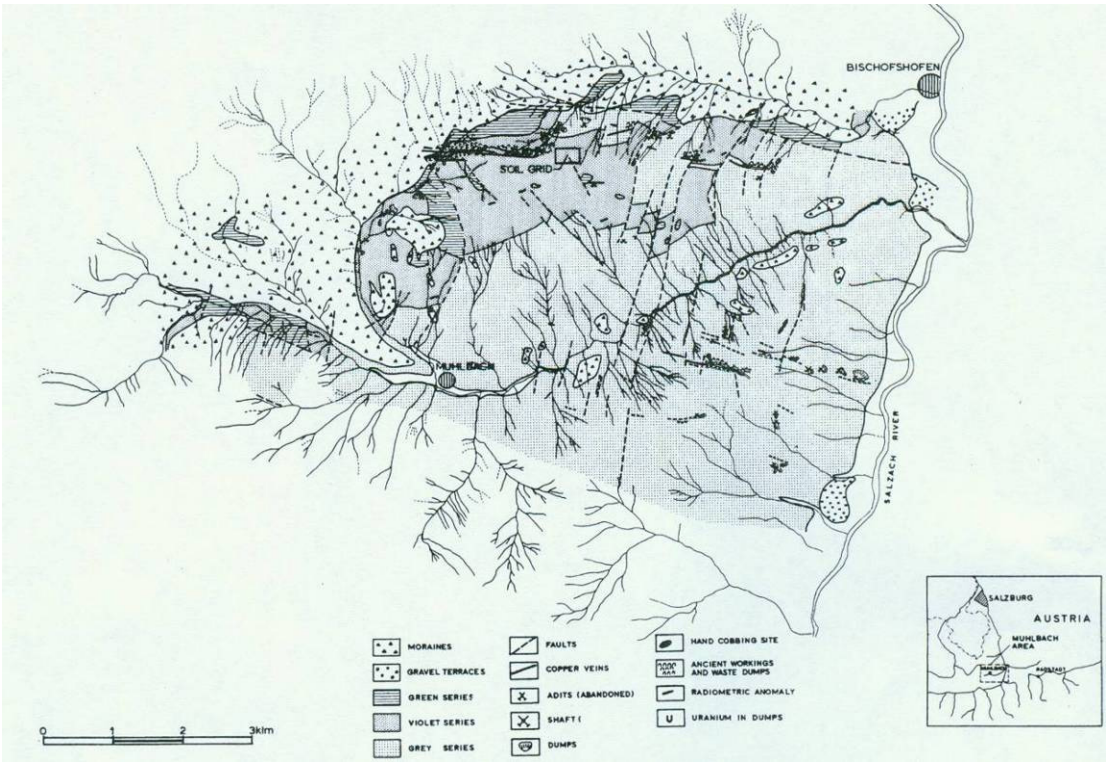


Abbildung 18: Vereinfachte geologische Karte des Mühlbach-Gebietes, Salzburg
Quelle.: Smith A. Y., Cameron J., Baretto P. M. 1977, S. 305

Ein in *Obertauern am Osthang des Taurachtales* ca. 40-50 m mächtiger, mineralisierter Serizit-Quarzschiefer erstreckt sich über 4 km. Die Länge der mineralisierten Linsen überschreitet selten 10 Meter, die Mächtigkeit ist unter 1 Meter. Die Urankonzentration solcher Linsen beträgt 0,16 % U_3O_8.
Die *Uranvorkommen von Tweng* liegen in karbonatischen chloritführenden Muskovit-Quarzschiefern und Graphitschiefern mit zwei uranführenden Horizonten. Als Uranerz wurde Pechblende nachgewiesen, die im intragranularen Zwischenraum des gröberkörnigen Quarzes eingewachsen ist.
In den Rottenmanner Tauern *südlich des Schoberpasses* sind zahlreiche Uran-Kupfer Mineralisationen bekannt. Diese Mineralisationen (linsige Erzkörper in dm- bis m-Größe) sind an Serizitquarzite der permoskythischen Rannach-Formation des Ostalpins gebunden mit Urangehalt bis 0,8%.
Durch eine vergleichende stratigraphische und paläogeografische Untersuchung erkannte ERKAN (1977), dass die eigentliche Uranführung in den östlichen Ostalpen auf eine vorwiegend schiefrige, unter reduzierenden Bedingungen gebildete Partie des unteren Perm beschränkt ist. In Abb. 19 wird diese Situation durch mehrere geologische Profile durch die Permoskythischen Gesteine der östlichen Ostalpen erläutert.

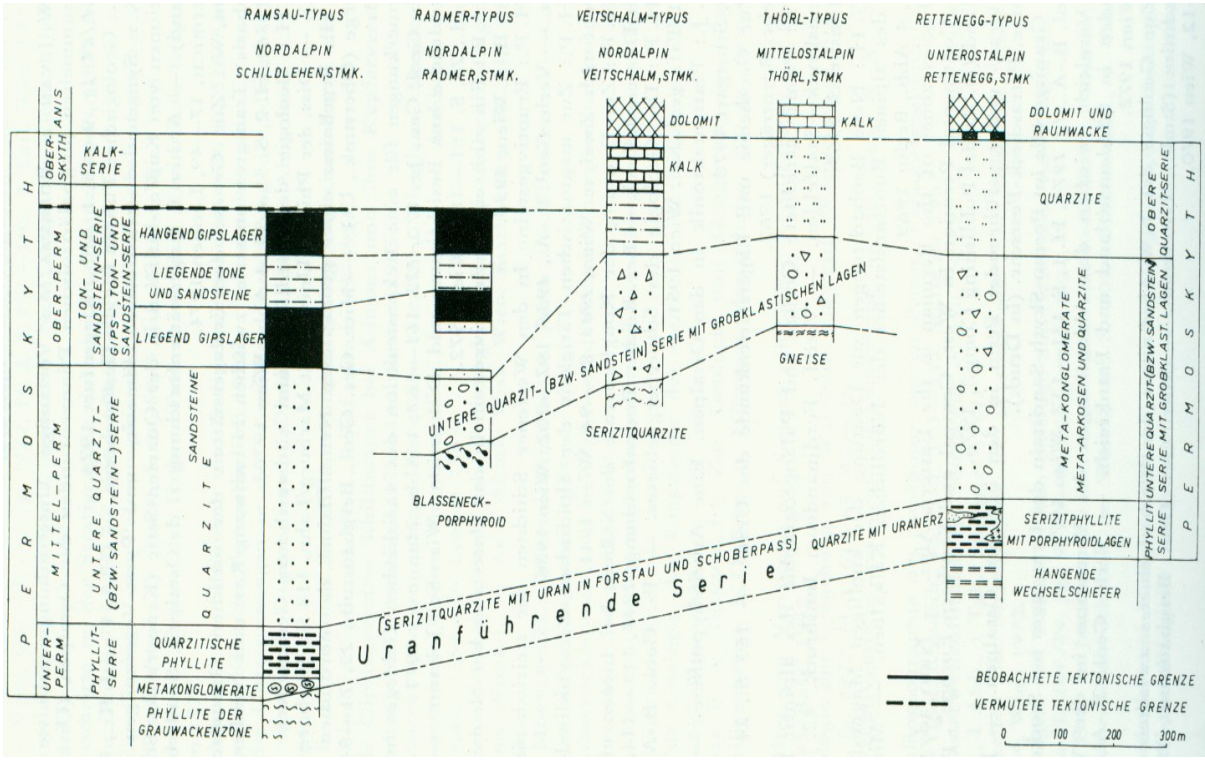


Abbildung 19: Permoskyth-Typus Profile der östlichen Ostalpen,
Quelle.: Erkan E., 1977, S. 395

Diese Gesteinspartie füllt tiefere Wannen des postvariscischen Reliefs und dürfte marin-aestuarischen Ursprungs sein, während höhere Sandstein und Schuttablagerungen terrestrische Einstreuungen der Rücken sind.

Durch Rückführung der tektonischen Deckeneinheiten in ihre ursprüngliche Ablagerungsposition schloss Erkan, dass die Uran führenden Tröge quer zum heutigen E-W-Streichen der Zonen liegen. Als Uranliefergebiete sprach er Gneisrücken zwischen den Becken an.

Abb. 20 zeigt die paläogeographische Situation des Unterperm im Zusammenhang mit Uran in den östlichen Ostalpen.

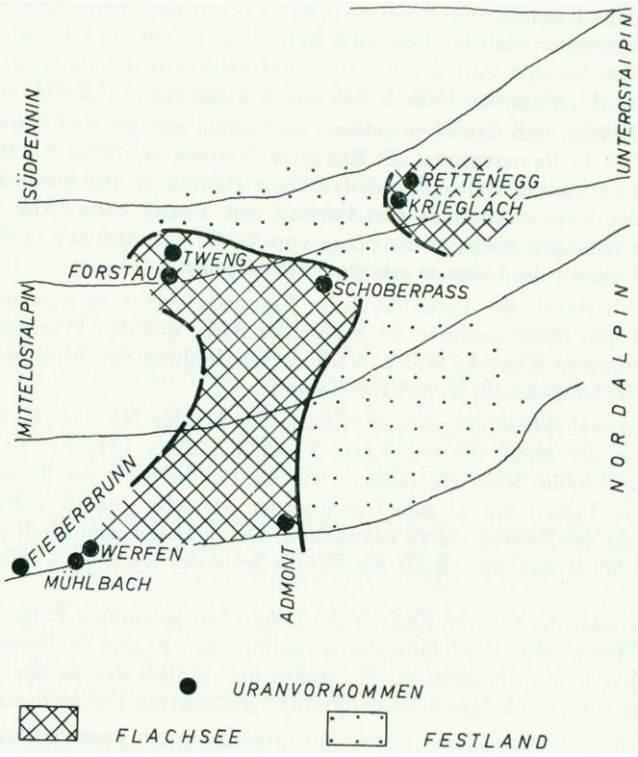
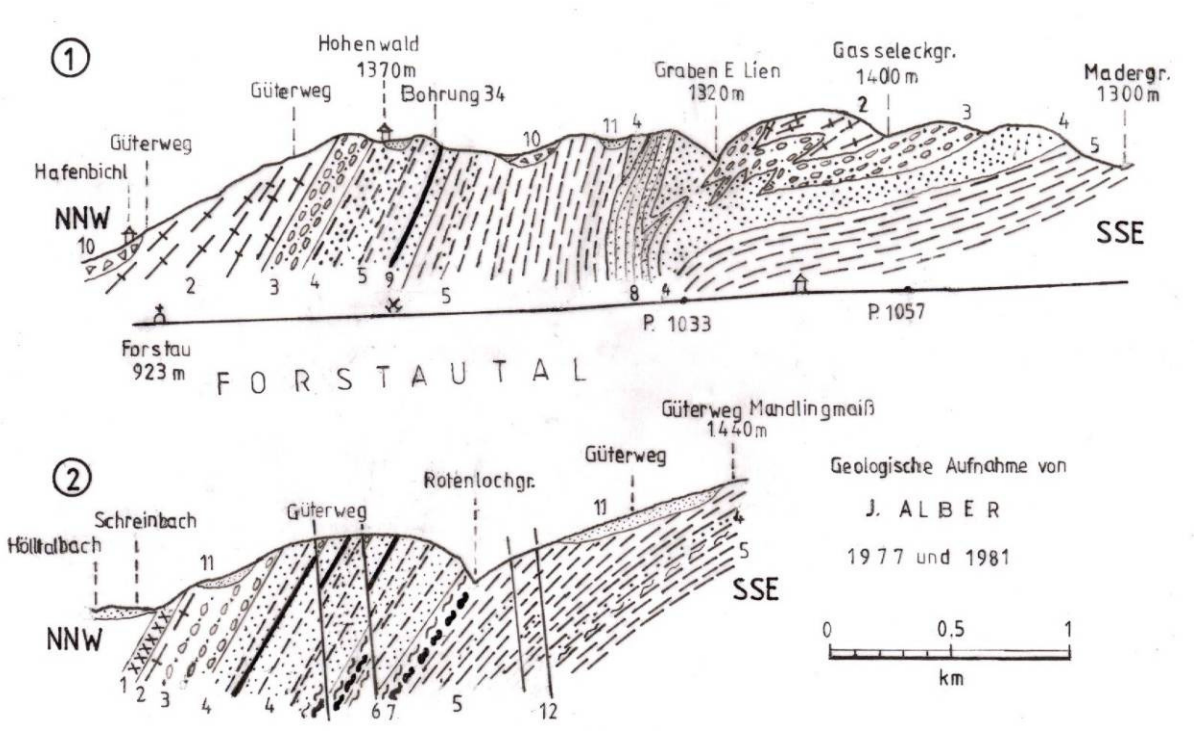


Abbildung 20:
Paläogeografie und Uranvorkommen des Unterperm in den östlichen Ostalpen
(Quelle.: Erkan E., 1977, S. 387)

Im Semmering-Wechsel Gebiet sind im Bereich *Prinzenkogel – Rettenegg – Waldbach* sowohl primäre als auch sekundäre Uranmineralisationen in unterostalpinen grobkörnigen, permischen Quarziten und Metaarkosen der Phyllit-Serie bekannt. Die Vorkommen sind lediglich von wissenschaftlichem Interesse.

Bergmännisch untersucht wurde die ***Uranerzlagerstätte in Forstau*** zwischen Radstadt und Schladming, die in permischen, Ankerit führenden Serizit-Quarz-Schiefern und Serizitquarziten platziert ist. Sie ist auf 15 km streichende Länge nachgewiesen, auf 4 km Länge abgebohrt und auf ca. 800 m im Stollenbau aufgeschlossen. Durch beträchtlichen tektonischen Einfluss entspricht die Erzzone im Großen dem sedimentären Ost-West-Streichen der Schichten, folgt im Aufschlussbereich aber meist einer mit 25° dazu schrägen Transversalschieferung. Die erzführenden Gesteine tauchen etwa 50-60 Grad gegen N.
Die Vererzung besteht im Wesentlichen aus feinkörnigem Uraninit, der mit Framboidpyrit vergesellschaftet und fein dispers an organische Substanz gebunden (Schermann, 1979) schichtparallel im Nebengestein eingelagert ist. Pechblende tritt in Form von dünnen Lagen und Bändern im Nebengestein auf. Gelegentliche Einlagerungen in der Schieferung oder Klüftung wurden ebenfalls beobachtet. SCHERMANN (1980) fand auf Niveau 1040 m N.N.(Barbara Stollen) eine Uran-Gangvererzung. Die erzführende Zone erreicht im Bereich von Forstau Mächtigkeiten bis zu 10 Metern. Im Streichen sind die einzelnen linsenförmigen Erzkörper, deren Mächtigkeit zwischen wenigen cm und 3 m beträgt, auf 5 bis 50 m zu verfolgen. Im Bereich von Forstau wurden an geologischen Vorräten rund 800 t Erz mit einem durchschnittlichen Metallgehalt von 850 ppm U_3O_8 nachgewiesen.



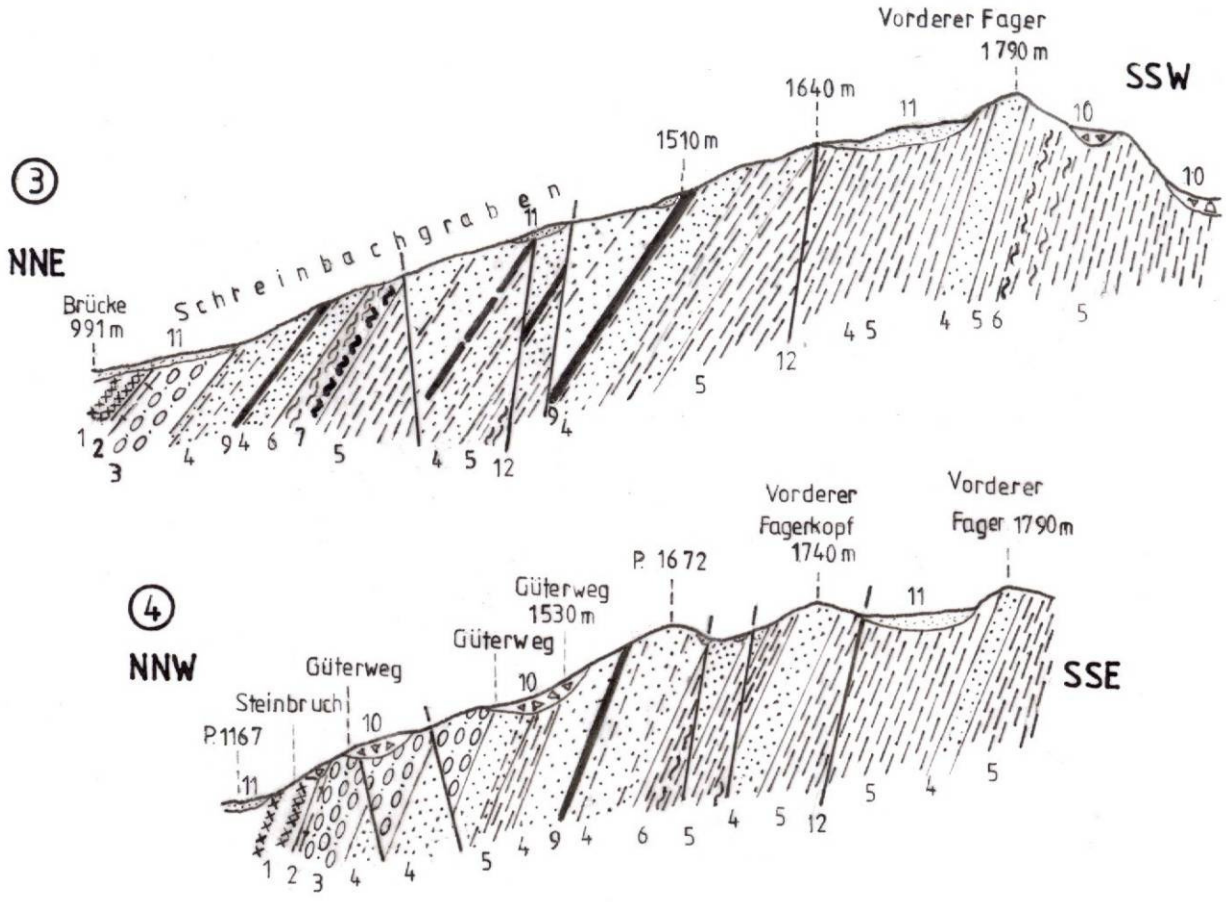


Abbildung 21: Profile durch den Alpinen Verrucano im tektonisch Liegenden des Schladminger Kristallins südlich von Forstau

Quelle.: Hellerschmidt-Alber J., 2008, S. 165

Die Abb. 22 zeigt 4 geologische Querschnitte südlich von Forstau. Profile durch die permotriadischen Gesteine (Alpiner Verrucano) im tektonisch Liegenden des Schladminger Kristallins südlich von Forstau. Dazu die Legende:

Schladminger Kristallin: 1 = Amphibolit; 2 = migmatischer Paragneis, untergeordnete inschaltungen von Granitgneis, Hornblendegneis, Chloritschiefer.
Permotrias: Alpiner Verrucano: 3 = hellgraues Metaquarzkonglomerat, hellgrauer Quarzit und Quarz-Serizitschiefer mit Gerölllagen; 4 = hellgrauer, quarz-, plagioklas- und ankeritreicher Serizit-Quarzitschiefer, Metaarkosen; 5 = hellgrau-grünlicher z. T. violetter Quarzphyllit; chloritreiche Einschaltungen; quarz- und ankeritreiche Lagen; 6 = Chloritschiefer (Grünschiefer); 7 = Graphitphyllit und grauer bis schwarzer Serizitphyllit. 8 = Lantschfeldquarzit. 9 = Uranvererzung.
Quartär: 10 = Bergsturz-Blockwerk, Rutschmassen; 11 = Gehängeschutt, Moräne und Alluvium, 12 = tektonische Störung, Abschiebung.

Position der Profile Nr. 1 bis 4: 1 = Osthang des Forstautales vom Anwesen Hafenbichl über Hohenwald (P. 1370) zum Gasseleckgraben 1400 m SH.; 2 = Hölltal P. 991 über Haideggwald Güterweg, Rotenlochgr. 1100 m SH., Mandlingmaiß 1440 m SH.; 3 = Schreinbachgraben bis 1640 m SH., Vorderer Fager (P. 1790); 4 = P. 1167 (170 m S Kurzenhof) über P 1672, Vorderer Fagerkopf (P. 1740), Vorderer Fager (P. 1790).

HRUBÝ führte erstmals 1979 eine Auswertung der Ergebnisse und des Verlaufes der vererzten Zone im Zusammenhang mit Quer- und Diagonaltektonik durch.
Wie die Abb. 24 (siehe nächste Seite) zeigt, besteht der Erzkörper aus einzelnen parallel liegenden Erzlagern verschiedener Mächtigkeit (dm-3m), die in einem Schichtpaket von ca. 10 m Mächtigkeit entwickelt sind. Die Länge einzelner Lager ist verschieden (5–50 m). Innerhalb des erzführenden Schichtpaketes decken sich meistens 2–4 solcher Lager, die dann zusammen den Erzkörper bilden. Die Länge des gesamten Körpers beträgt auf allen drei Stollenniveaus ca. 300 m, wobei der mittlere (Barbara) Stollen am produktivsten ist und wahrscheinlich eine ca. horizontal liegende Achse einer ursprünglichen Sedimentationsstruktur darstellt. Entlang dieser Achse scheint auch die Mächtigkeit der grobkörnigen Einlagen größer zu sein.

Nach einer ausführlichen tektonischen Analyse erkannte HRUBY (1979), dass die Lagerstätte im Osten so wie im Westen durch ein System von NE – SW verlaufenden Brüchen disloziiert und durch eine Längsstörung zur Teufe abgeschnitten wurde. Abb. 23 zeigt ein W-E Längsprofil durch die Lagerstätte Forstau mit den verschiedenen tektonischen Blöcken.
Der gesamte Vertikalversatz zwischen dem Weststollenbereich und dem Oststollen beträgt 150 – 200 m, Eine Hebung bringt die Querstörung am Ende des Oststollens auf der Ostseite des Forstautales. Im Westen schiebt eine ähnliche Störung den anschließenden Block wieder nach oben, indem der Erzkörper versetzt wird. Eine der wichtigsten Störungen verläuft durch den Schreinbachgraben und verursacht eine Absenkung des Westblocks (Fager) um mindestens 300m.

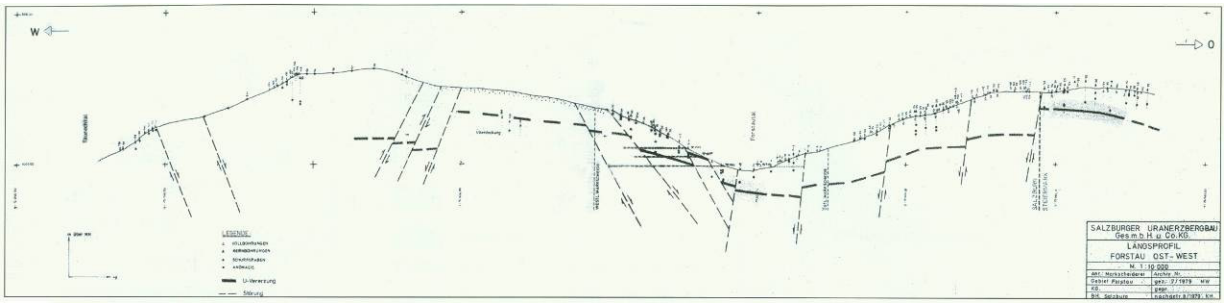


Abbildung 22:: E-W Längsprofil durch die Lagerstätte Forstau mit den verschiedenen tektonischen Blöcken und etwaigem Verlauf der erzführenden Struktur
Quelle: Anl. 2 , J. Hrubý 1979

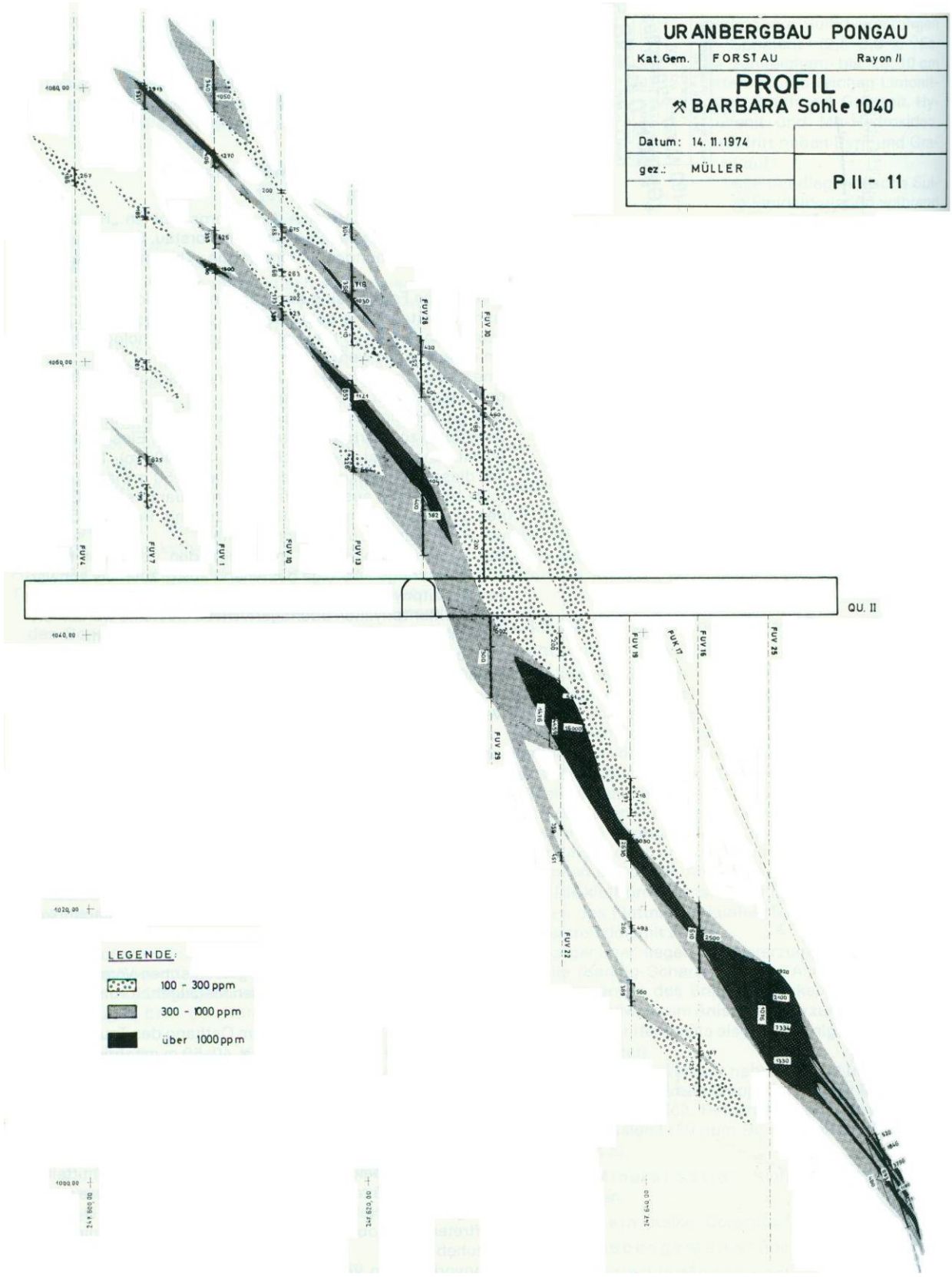


Abbildung 23: Querprofil durch die Uranlagerstätte Forstau (Sohle 1040, Barbara)
(Quelle.: WEBER L. et. al., 1997, Abb. 330, S. 384)

9 Kurzfassung der Vorträge

Ressourcen, Eine Einführung
Abstract zum Vortrag von Nikolaus Arnold, BOKU Wien ISR, am 15.09.2010
Siehe Kapitel 1 und 2;

Uranprospektion in Österreich und Exploration sowie Bergbau in Forstau (Salzburg)
Abstract zum Vortrag von Johann Hellerschmidt-Alber am 15.09.2010
Siehe Kapitel 8;

The IAEA Supporting Uranium Production Cycle Activities
Jan Slezak, Uranium Resources Specialist, NEFW, IAEA Vienna, j.slezak@iaea.org

Since the IAEA's foundation in 1957, the Agency has had an increasing interest in uranium production cycle (UPC) developments. Recent activities cover tasks on uranium geology and deposits, exploration, mining and processing, all including environmental issues. The two projects titles are (1) "Updating uranium resources, supply and demand and nuclear fuel cycle databases" and (2) "Supporting good practices in the UPC in particular for new countries". Based on the recent experience, one of the new activities is focussed at human resources development to improve application of best/good practice. It is called UPNET (Uranium Production cycle Network on Education and Training).

Wie Nachhaltig ist die Kernspaltungsenergie wirklich oder was wissen ``wir'' über abbauwürdige Uranresourcen?
Abstract zum Vortrag von Michael Dittmar, ETH Zürich am 15.9.2010

Ein weit verbreiteter Glauben bezüglich der Kernspaltungsenergie ist eine nahezu unbegrenzte Menge von nutzbarem Uran in der Erdkruste. Dieser Glauben basiert auf den Aussagen von vielen Experten die behaupten dass die konventionellen Uranresourcen für über hundert Jahre reichen, und sogar tausende von Jahren wenn man neue Reaktortechnologie mit den nicht konventionellen Ressourcen verbindet (http://www.nea.fr/press/2010/2010-03.html).

Bei diesen Aussagen werden die folgenden Punkte gerne vergessen:
(1) in den letzten 15 Jahren nur rund 2/3 des benötigten Urans aus Minen und 1/3 aus den so genannten ``sekundären Quellen'', im wesentlichen den zivilen und militärischen Beständen aus den Zeiten des kalten Krieges, kam. Obwohl die weltweite Uranproduktion im Jahre 2009 um fast 7000 Tonnen auf 51000 Tonnen gesteigert werden konnte, liegt diese Menge immer noch rund 20000 Tonnen unter dem jährlichen Bedarf der 441 aktiven Kernkraftwerke;
(2) Aussagen zur Reichweite der Ressourcen beziehen sich auf den heutigen Bedarf. Gerade bei der Kernenergie erzeugt diese aber nur weniger als 2.5% unseres Bedarfs an Endenergie: Kernkraftwerke liefern heute rund 14% der weltweit produzierten elektrischen Energie, die wiederum insgesamt nur 16% unseres weltweiten Energiebedarfs deckt;
(3) bei einem starken Ausbau der Kernenergie um 5%/Jahr, entsprechend einer Verdoppelung des Anteils der Kernenergie alle 14 Jahre, wären die konventionellen Ressourcen schon in 36 Jahren verbraucht und selbst die zusätzlich nicht konventionellen Ressourcen wären schon in 53 Jahren verbraucht. Selbst der hypothetische Einsatz von heute nicht existierenden schnellen Brütern schnellen Brütern ab dem Jahre 2040 könnte an diesen theoretischen Zahlen

nicht mehr viel verändern;
(4) Ein weiteres wenig diskutiertes Problem für die zukünftige Nutzung der Kernenergie kommt von der realen Erschließung neuer Uranminen. Rechnungen zeigen, dass selbst wenn alle Planungen für neue Uranminen in den nächsten 10 Jahren realisiert werden, man schon bei einem bescheidenen Wachstum der Kernspaltungsenergie pro Jahr um 1-2% spätestens ab dem Jahr 2016 in ein Problem der Uranknappheit läuft
(http://www.u3o8corp.com/main1.aspx?id=20).

URAN – Aspekte der globalen Rohstoffwirtschaft und Rohstoffpolitik
Abstract zum Vortrag von Günter Tiess, Montanuniversität Leoben am 15.9.2010

Der weltweite Uranbedarf für Kernkraftwerke hat in 2008 59,065 tU betragen, in 2009 wird dieser auf 61 730 tU geschätzt. Weltweit befinden sich 438 Kernkraftwerke im Betrieb und produzieren 372 692 GWel; 46 befinden sich im Bau (OECD / IAEA, 2010). - Bedarf an Uran ist in letzten Jahren kontinuierlich gestiegen (z.B. CO2-Thematik, fossile Brennstoffe, steigender Bedarf in Schwellenländer (China [>30 Kraftwerke geplant]).
Die globale Uranproduktion setzt sich aus primären Quellen (Bergbau, direkt) und sekundären Quellen (Lagerbestände, „Waffenuran“, Uran aus Recycling etc.) zusammen. Die weltweite (Bergbau-)Produktion ist von 39 617 tU in 2006 auf 41 244 tU in 2007 gestiegen (4.1%) und in 2008 auf 43 880 tU (6% von 2007). Für 2009, wird mit einem Anstieg von 16% auf 51 000 tU gerechnet (IAEA, 2010). Noch in den letzten Jahren hat der Prozentanteil der primären Uran(erz)produktion rd. 60% betragen; der restliche Teil kam aus sekundären Quellen (va. „Waffenuran“), sinkt nun aber. Die Reduktion der sekundären Quellen sowie die Zunahme des globalen Uranbedarfs hat die Primärproduktion wieder ansteigen lassen. Es wird geschätzt, dass nach 2013 das Angebot an sekundäre Uranquellen generell sinken wird. Die erhöhte Uran-Nachfrage hat zum Anstieg des Weltmarktpreises geführt, (Anstieg etwa ab 2002), erreicht in 2007 einen „historischen Wert“ (> 250 US$ Spotpreis bzw. knappe 200 US$ Long-Term-Preis, nach Rezension Preis wieder im Ansteigen), und somit eine erhöhte Exploration ausgelöst (neuer Explorationszirkel, ab 2003). Schätzung der primären Uranressourcen global auf 5.4 Mio. t (80-100 Jahre, gemessen an gegenwärtigen Spotpreisen bzw. nach Verwendung in kommerziellen Reaktoren). Werden alle konventionellen Uranquellen miteinbezogen, ergeben sich weitere Uranressourcen von 5.5 Mio. Tonnen; dies bedeutet eine Versorgungssicherheit von insgesamt 160 Jahren gemessen an gegenwärtiger Bedarfsrate (WNA, 2010). Uranvorkommen global betrachtet, konzentriert. Die größten Vorkommen (2009) weist Australien auf (31 % - 1,673,000 Tonnen [<US$ 130/Kg U]]), dann folgt Kazakhstan mit 12% (651 800 t [<US$ 130/Kg U]) und Kanada (9% [485 300 t]).
Technische Aspekte - Primärproduktion, Recycling, Substitution
Bergbau auf Uran erfolgt als Untertagebau (Abbautiefen bis 2 000 m [weltweit: 2009, 25.0%]), im Tagebau (28.9%), oder als Lösungsbergbau (in-situ leaching [36.3%]). Recycling ist möglich. (Ein 1300 MW-Reaktor produziert ca. 25 t abgebrannten Brennstoff pro Jahr.) Im Falle der Wiederaufbereitung werden verbrauchte Brennelemente nach etwa 5 Jahren Zwischenlagerung für Transport zur Wiederaufbereitungsanlage in radioaktiv abgeschirmte Spezialbehälter gefüllt (z.B. BRD: La Hague [Frankreich]. Einige Länder, darunter USA (bisherige Kosten für Entsorgung und Endablagerung rd. 18 Mrd. US$) haben sich für direkte Endablagerung entschieden. Direkte Endablagerungsfrage in BRD wird noch diskutiert. Substitution: Thorium, eine Möglichkeit; wird zZ. in Indien getestet (hat beachtliches Rohstoffpotential). Hat noch nicht NuclearNon-Proliferation Treaty unterzeichnet, kein Zugang zum Uranweltmarkt. Heimische Uranressourcen weisen Verknappungstendenzen auf, gleichzeitig ambitioniertes Nuklear-programm.

Energetischer Nutzen, kostenrelevante Aspekte, rohstoff- und energiepolitische Aspekte
Die thermische Energie, die der Kernbrennstoff (UO2) im Reaktor abgibt, wird als Abbrand bezeichnet und in MWd/kg angegeben. Dieser ist vergleichbar mit dem Heizwert von fossilen Brennstoffen. Ein MWd ist gleich 24 MWh und entspricht 2,95 t SKE. Druckwasserreaktoren haben einen Wirkungsgrad von ca. 34,5 %. Damit beträgt die Stromerzeugung zwischen 331 und 360 MWhel pro kg Uranbrennstoff (Panos, 2007). 1 Tonne Uran produziert etwa 40 GWhel; vergleichsweise, werden dafür etwa 16 000 Tonnen Kohle sowie 80 000 Barrel Rohöl benötigt. Der Bau eines Kernkraftwerk der neuen Generation (z.B. Finnischer Reaktor) benötigt 2-3 Mrd. €. Stilllegung und Frage der Entsorgung ist relevant: rd. 9-15% der Anlagekosten, Zeitraum 10 bis 20 Jahren. Ökologischer Aspekt: problematische Langzeitfolgen, wenn technische Standards vernachlässigt werden: z.B. ehemaligen Bergwerksstandorte im Osten Deutschlands. Seit 1990 werden die in DDR-Zeit verursachten Umweltschäden mit 6,2 Milliarden Euro durch Wismut GmbH saniert.
Der Rohstoff Uran ist ein staatseigener Rohstoff. Verleihung einer Exploration- bzw. Abbaulizenz obliegt Staat. Verschiedene Betrachtungsfälle – rohstoffpolitisch motiviert: Länder die nur produzieren, aber nicht/kaum konsumieren (z.B. Australien), Länder welche Produzenten und Konsumenten sind (USA produziert etwa global 4% und konsumiert global 33%). In Europa fördern zurzeit Tschechien und teils Rumänien. Derzeit laufen verschiedene Explorationsaktivitäten (z.B. Finnland, Schweden, Schweiz [Kanton Wallis]. So hat man in der Slowakei eine Lagerstätte exploriert (Koschitze), welche einen Abbau von 15 Jahren (Untertagebau) ermöglichen könnte; Durchführung ist eine rohstoffpolitische Frage.
Innerhalb der OECD gibt es signifikante Differenzen in Bezug auf Nuklear-Energiepolitik. Länder wie Japan, Süd Korea, USA (Anreize durch Energy Policy Act 2005) wollen ihre Kapazität ausbauen. Belgien, BRD, Spanien wollen weiter ein phase out; Schweden diskutiert noch. Tschechien, Finnland, Frankreich, Ungarn und die Slowakische Republik bekennen sich zur Aufrechterhaltung der Nuklearenergie als Teil ihres Energiemix. In Tschechien wurden 2008 rd. 275 Tonnen Uran (Rozna) produziert ([1/3 des Bedarfes] 0.6 % Weltanteil, Platz 13). Uranbedarf für Kernkraftwerke Dukovany and Temelín beträgt jährlich 670–700 Tonnen (Czech Geological Survey, 2009). Uranbedarf der EU: Die Russische Föderation ist für die EU ein wesentlicher Uran-Lieferant. Ende 2009, hat die EU-Kommission den Vorschlag für erneuertes Mandat zu Verhandlungen mit Russischen Föderation unterbreitet; Ziel: neues bilaterales Abkommen (vom Rat angenommen).

Umweltauswirkungen des Uranabbaus
Abstract zum Vortrag von Peter Diehl, WISE am 15.9.2010

Bis zum Verfall der Uranpreise Anfang der 1980er Jahre beziehungsweise bis zur politischen Wende in Europa 1989 wurde Uran in vielen Ländern in großem Maßstab abgebaut, im allgemeinen einhergehend mit großen Auswirkungen auf die Umwelt. Der Umgang mit den Hinterlassenschaften aus dieser Zeit war in den vergangenen 20 Jahren sehr unterschiedlich: Während in einigen Fällen von staatlicher Seite aufwendige Sanierungsprogramme aufgelegt wurden, kam es andernorts nur zu halbherzigen Sanierungs-Bemühungen, oder man ließ die Probleme sogar auf sich beruhen. Seit etwa drei Jahren ist das Interesse am Uranbergbau wieder gestiegen, und viele neue Abbauprojekte sollen nun in Betrieb gehen. Die Befürworter dieser Projekte versichern, dass der Umwelt heute ein viel größerer Stellenwert eingeräumt wird als in den frühen Jahren. Eine Analyse bestehender und geplanter Abbauprojekte zeigt jedoch, dass Verbesserungen nur in Teilbereichen zu verzeichnen sind. Daran können auch zunehmend eingesetzte neue Technologien wie der Lösungsbergbau (in situ leaching) prinzipiell nichts ändern, da sie neue Probleme mit sich bringen. Hinzu kommt, dass viele neue Abbauprojekte beim heutigen Uranpreis noch nicht konkurrenzfähig arbeiten können. Es werden also in

nächster Zeit vorwiegend solche Projekte realisiert werden, die nur aufgrund spezieller Bedingungen jetzt schon wirtschaftlich sind - und dazu gehört vielfach, dass sie die Umwelt übermäßig in Anspruch nehmen.

10 Referenzen und weiterführende Literatur

- Uranium 2009: Resources, Production and Demand, OECD/IAEA 2010
- Uranium 2007: Resources, Production and Demand, OECD/IAEA 2008
- Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective "The Red Book Redtrospective" OECD 2006
- Risiken der Fissions-Kernenergienutzung unter Berücksichtigung der verfügbaren Nuklearbrennstoffressourcen, Nikolaus Arnold, 2008
- World Nuclear Association, http://www.world-nuclear.org, accessed September 2010
- ANNUAL INFORMATION FORM 2009, PALADIN ENERGY LTD 2009
- ANNUAL INFORMATION FORM 2009, URANIUM ONE INC. 2010
- Evaluation of UF6-to-UO2 Conversion Capability at Commercial Nuclear Fuel Fabrication Facilities, U.S. Department of Energy 2001
- The Nuclear Fuel Cycle, Radiochemistry Group of the Royal Society of Chemistry 2004
- http://www.world-nuclear.org/info/inf03.html (Zugriff 13.08.2010)
- Aspekte der zukünftigen Kernenergienutzung, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 53/2008, P. Biermayr, R. Haas, TU Wien, März 2008
- Rohstoffpolitik in Europa, Günter Tiess, Springer Verlag, 2009
- http://www.wise-uranium.org/

Literatur – Uranabbau in Österreich:

BAUER, F. K. und SCHERMANN, O.: Über eine Pechblende-Gold-Paragenese aus dem Bergbau Mitterberg, Salzburg.- Verh. Geol. B.-A. Wien, 1971, A 97-A100.

BERGBAU- U. MINERALGESELLSCHAFT PRYSSOK & CO.: Die Uranprospektion der Bergbau- und Mineralgesellschaft PRYSSOK & Co KG in Österreich von 1969 bis Juni 1974.- Unveröff. Ber. (Lagerst. Arch. Geol. B.-A.), 24 S., 16 Anl., Forstau 1974.

ERKAN, E.: Uran- und gipsführendes Perm in den östlichen Ostalpen.- Jb. Geol. B.-A., 120, S. 343-400, 15 Abb., 13 Prof., 1 Taf., Wien 1977b.

HELLERSCHMIDT-ALBER, J., Geologie des Gebietes S Forstau im Ennstal auf ÖK 126 Radstadt (Bundesland Salzburg), Jb. Geol. B. –A., **148**, Heft 2, S. 159–173, Wien, Dez. 2008
IUREP-REPORT: International Uranium Resources Evaluation Project – Austria. - OECD Nuclear Energy Agency, 38, Paris 1981.

HRUBÝ, J.: Bewertung der Exploration der Lagerstätte Forstau.- Unveröff. Ber., 12 S., 3 Anl., Forstau 1979

IUREP-REPORT: International Uranium Resources Evaluation Project – Austria. - OECD Nuclear Energy Agency, 38, Paris 1981.

MINEREX–MINERAL-EXPLORATIONSGESELLSCHAFT MBH: Abschlussbetriebsplan anlässlich der Auflassung der Bergwerks-berechtigungen;Genehmigung.- Unveröff. Bescheid BH Salzburg Zl. 3998/82 v. 25. 01. 1983, Salzburg 1983.

OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY: IUREP Orientation Phase Mission. Summary Report – Austria.- OECD, 25 S., Paris 1981.

PETRASCHECK, W.E.: Dei geologische Stellung der Uranerzlagerstätten in Österreich.- Berg- u- Hüttenm. Mh., 122, 301-302, Wien 1977c.

PETRASCHECK, W.E.: Die Uranerzprospektion in Österreich.- Berg- u- Hüttenm. Mh., 124, 612-613, Wien 1979.

PETRASCHECK, W.E.: Uranerz in Österreich.- Berg- u- Hüttenm. Mh., 120/8, 353-355, Wien 1975.

PETRASCHECK, W.E.: Die Uranerzprospektion in Österreich.- Berg- u- Hüttenm. Mh., **124**, 612-613, Wien 1979.

PETRASCHECK, W.E.; ERKAN, E. & SIEGL, W.: Type of uranium deposits in the Austrian Alps.- IMT meeting, 71-75, 6 Abb., London 1976.

SCHERMANN, O.: Über die Genese einer Uranmineralisation in der Gosau der Unterlaussa. Verh. Geol. B.-A. 1979/3, 371-372, Wien 1980a.

SCHERMANN, O.: Erztypen und ihre Genese im Uranvorkommen von Forstau (Vorläufiger Bericht).- Verh. Geol. B.-A., **1980**, 373-376, Wien 1980b.

SCHULZ, O. und LUKAS, W.: Eine Uranerzlagerstätte in permotriadischen Sedimenten Tirols.- TMPM 14, 213-231, 1970.

WEBER, L. (Hrsg.): Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industrieminerale und Energierohstoffe Österreichs. Erläuterungen zur metallogenetischen Karte von Österreich 1 : 500.000 unter Einbeziehung der Industrieminerale und Energie-rohstoffe. - Arch. Lagerst.forsch. Geol. B.-A., **19**, 607 S., 393 Abb., 37 Tab., 2 Ktn., 2 Listen (Minerale, Rohstoffvork.), Wien 1997.