



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 22. Juli 2009

Literaturübersicht Kernenergie

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

B,S,S. Volkswirtschaftliche Beratung AG
Steinenberg 5
CH-4051 Basel
www.bss-basel.ch

Autoren:

Patrick Koch, B,S,S. Volkswirtschaftliche Beratung AG, patrick.koch@bss-basel.ch
Martin Schmid, B,S,S. Volkswirtschaftliche Beratung AG, martin.schmid@bss-basel.ch
Michèle Marti, risicare GmbH, michele.marti@risicare.ch (Kapitel 4.1)

Externe Experten (beratende Funktion):

Horst-Michael Prasser, Labor für Kernenergiesysteme, ETH Zürich, hprasser@ethz.ch
Anne Eckhardt, risicare GmbH, anne.eckhardt@risicare.ch

Begleitgruppe:

Patrick Hofstetter, WWF Schweiz
Patrick Kupper, ETH Zürich, Institut für Technikgeschichte
Irène Richner-Schellenberg und Philipp Hänggi, swissnuclear
Klaus Riva, Bundesamt für Energie
Georg Schwarz, ENSI Geschäftsleitung
Sabine von Stockar, Schweizerische Energiestiftung
Alexander Wokaun, PSI General Energy Research Department

BFE-Programmleiterin: Nicole Mathys

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153511 / 102722

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Zusammenfassung | IX |
| Résumé..... | XI |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Hintergrund..... | 1 |
| 1.2. Fragestellung..... | 2 |
| 1.3. Inhaltliches Vorgehen und Methodik | 2 |
| 1.4. Gliederung des Berichts..... | 3 |
| 2. Risiken der Kernenergie und ihre Relevanz..... | 5 |
| 2.1. Sicherheitskonzept und Störfallrisiken | 5 |
| 2.1.1. Sicherheitskonzept | 6 |
| 2.1.2. Sicherheitssysteme moderner Kernanlagen | 7 |
| 2.1.3. Auslegung und Sicherheitsnachweis..... | 9 |
| 2.1.4. Meldepflichtige Ereignisse | 10 |
| 2.1.5. Restrisiko, Wahrscheinlichkeiten von Kernschäden und Freisetzung von Radioaktivität | 11 |
| 2.1.6. Kritik an den Sicherheitseinschätzungen der HSK | 15 |
| 2.1.7. Vergleich mit anderen technischen Risiken | 16 |
| 2.1.8. Faktor Mensch | 17 |
| 2.2. Erdbebenrisiko..... | 19 |
| 2.3. Terroranschläge | 20 |
| 2.4. Proliferation | 22 |
| 3. Umweltrelevanz der Kernenergie..... | 26 |
| 3.1. Kernenergie und Klimawandel | 26 |
| 3.1.1. CO ₂ -Emissionen | 26 |
| 3.1.2. Klimarelevanz der Kernenergie | 29 |
| 3.2. Radioaktiver Abfall und geologische Tiefenlagerung | 31 |
| 3.2.1. Anfallende Mengen radioaktiver Abfälle..... | 31 |
| 3.2.2. Entsorgungsnachweis für radioaktive Abfälle..... | 33 |
| 3.2.3. Abschätzung der „radioaktiven Gefahr“ der Abfälle..... | 34 |
| 3.2.4. Standortsuche und Langzeitwissensübertragung..... | 37 |
| 3.2.5. Sozioökonomische Auswirkungen von Entsorgungsanlagen | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3. Weitere Umweltauswirkungen | 39 |
| 3.3.1. Umweltauswirkungen beim Abbau von Uran..... | 40 |
| 3.3.2. Umweltauswirkungen bei der Uranaufbereitung..... | 41 |
| 3.3.3. Umweltauswirkungen bei der Urananreicherung..... | 42 |
| 3.4. Lebenszyklusbetrachtung und Multikriterienanalysen | 43 |
| 3.4.1. Lebenszyklusbetrachtung | 43 |
| 3.4.2. Multikriterienanalysen | 44 |
| 4. Gesellschaftliche Akzeptanz, ethische Aspekte und gesundheitliche Auswirkungen | 46 |
| 4.1. Akzeptanz und Risikowahrnehmung | 46 |
| 4.2. Ethische Aspekte | 53 |
| 4.3. Gesundheitliche Auswirkungen..... | 54 |
| 4.3.1. Strahlenexposition | 54 |
| 4.3.2. Kinderkrebsstudien | 55 |
| 5. Kosten der Kernenergie..... | 57 |
| 5.1. Internalisierte Kosten | 57 |
| 5.2. Externe Kosten | 59 |
| 5.3. Risikohaftpflicht | 61 |
| 5.4. Kostenentwicklung der Brennstoffe..... | 63 |
| 6. Übersicht der Argumente | 66 |
| Literaturverzeichnis..... | 81 |
| Anhang | 93 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|--|-----|
| Abbildung 1 | Häufigkeit für eine Freisetzung von Radioaktivität (Cs-137) der Schweizer Kernanlagen. | 14 |
| Abbildung 2 | Erwartete physisch Geschädigte (linke Grafik) und erwartete geschädigte Lebensgrundlagen (rechte Grafik) infolge technischer Gefahren in der Schweiz. | 16 |
| Abbildung 3 | Radiotoxizitätsindex einer Tonne abgebrannter Brennelemente (spent fuel BWR) und des totalen Radionuklidinventars. | 35 |
| Abbildung 4 | Dosisberechnungen für radioaktive Abfälle im geologischen Tiefenlager (oben: abgebrannte Brennelemente, Mitte: hochaktive radioaktive Abfälle, unten: langlebige mittelaktive Abfälle) in Funktion der Zeit..... | 36 |
| Abbildung 5 | Bereich der Maximaldosis für abgebrannte Brennelemente (SF), verglaste hochaktive radioaktive Abfälle (HLW) und langlebige mittelaktive Abfälle für verschiedene Szenarien..... | 37 |
| Abbildung 6 | Ökobilanzresultate verschiedener Strombereitstellungstechnologien für das Jahr 2030 unter der Verwendung des Eco-Indicator 99. | 43 |
| Abbildung 7 | Rangfolge von Energiebereitstellungstechnologien mit höherer Gewichtung auf Klima, menschliche Gesundheit, Bereitstellungskosten und Versorgungssicherheit | 45 |
| Abbildung 8 | Rangfolge von Energiebereitstellungstechnologien mit höherer Gewichtung auf Ressourcenverbrauch, Sicherheit, politische Stabilität und Legitimation inkl. Proliferationsrisiken, Risikowahrnehmung und Konsequenzen schwerer Unfälle und direkte Arbeitsplatzeffekte | 45 |
| Abbildung 9 | Relative Zusammensetzung der Stromgestehungskosten neuer Kernkraftwerke in CHF/MWh _{el} (Realer Zinssatz: 2.5%)..... | 58 |
| Abbildung 10 | Geschichte und Vorhersage der Uran-Produktion basierend auf ausgewiesenen Ressourcen. | 64 |
| Abbildung 11 | Globale Vermeidungskostenkurve | 105 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabelle 1 | „Defence in depth“ Level..... | 6 |
| Tabelle 2 | Übersicht über die Kernschadenshäufigkeiten interner Ereignisse der Kernkraftwerke Gösgen und Mühleberg | 13 |
| Tabelle 3 | Kernschadenshäufigkeiten aufgrund von Erdbeben für die Schweizer Kernkraftwerke. | 20 |
| Tabelle 4 | CO ₂ -Emissions-Statistik ausgewählter Studien..... | 27 |
| Tabelle 5 | Treibhausgasemissionen pro kWh für verschiedene Stromerzeugungswege .. | 28 |
| Tabelle 6 | Treibhausgasemissionen pro kWh verschiedener Stromerzeugungstechnologien | 29 |
| Tabelle 7 | Volumina der hochaktiven, schwach- und mittelaktiven und alphatoxischen Abfälle der Schweiz gegliedert nach Herkunft und Radioaktivität..... | 32 |
| Tabelle 8 | Wasser- und Energieverbrauch für Uranminen..... | 41 |
| Tabelle 9 | Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland | 55 |
| Tabelle 10 | Struktur der Jahreskosten der Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt jeweils in Prozent und Stromgestehungskosten | 57 |
| Tabelle 11 | Stromgestehungskosten ausgewählter Energieträger | 59 |
| Tabelle 12 | Externe Kosten der Stromproduktion mit Kernenergie in Rp./kWh | 60 |
| Tabelle 13 | Externe Kosten ausgewählter Energieträger..... | 61 |
| Tabelle 14 | Monetäre Schäden eines schweren Unfalls mit einer Freisetzung grosser Mengen an Radioaktivität | 62 |
| Tabelle 15 | Die International Nuclear and Radiological Event Scale (INES-Skala)..... | 95 |
| Tabelle 16 | Zusammenfassung der summierten Dosismaxima in mSv/a für verschiedene Szenarien. | 106 |
| Tabelle 17 | Übersicht der Auswirkungen von Uranabbau und Weiterverarbeitung | 109 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|---|
| ATA | Alphatoxische Abfälle |
| BABS | Bundesamt für Bevölkerungsschutz |
| BAG | Bundesamt für Gesundheit |
| BFE | Bundesamt für Energie |
| BWR | Boiling Water Reactor |
| BZL | Bundeszwischenlager |
| CRIIRAD | Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité |
| ENSAD | Energy Related Severe Accident Database |
| ENSI | Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat |
| ESC | Energy Science Centre |
| HAA | Hochaktive Abfälle |
| HLW | Vitrified high-level waste (verglaste hochaktive radioaktive Abfälle) |
| HRA | Human Reliability Analysis |
| HSK | Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen |
| IAEA | International Atomic Energy Agency - Internationale Atomenergiebehörde |
| IEA | International Energy Agency - Internationale Energiebehörde |
| ILW | Long-lived intermediate-level waste (langlebige mittelaktive Abfälle) |
| INES | International Nuclear Event Scale |
| INSAG | International Nuclear Safety Advisory Group |
| IR | Inferred Resources |
| KEG | Kernenergiegesetz |
| KHG | Kernenergiehaftpflichtgesetz |
| KKW | Kernkraftwerk |
| KSA | Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen |
| NAGRA | Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle |
| NEA | Nuclear Energy Agency |

| | |
|--------|--|
| NOK | Nordostschweizerische Kraftwerke |
| NPT | Nuclear Non-proliferation Treaty – Atomsperrvertrag |
| OPA | Opalinuston-Gestein |
| PSA | Probabilistische Sicherheitsanalyse |
| PSI | Paul-Scherrer Institut |
| RAR | Reasonably Assured Resources |
| RTI | Radiotoxizitätsindex |
| SAMG | Severe Accident Management Guidelines |
| SES | Schweizerische Energie-Stiftung |
| SF | Spent fuel (abgebrannte Brennelemente) |
| SMA | Schwach- und mittelaktive Abfälle |
| VAPK | Verordnung über die Anforderungen an das Personal von Kernanlagen |
| WIPP | Waste Isolation Pilot Plant |
| WISE | World Information Service on Energy |
| WNA | World Nuclear Association |
| ZWILAG | Lager radioaktiver Abfälle der “Zwischenlager Würenlingen AG” in Würenlingen |

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Studie "Literaturübersicht Kernenergie" ist es, dem Bundesamt für Energie Grundlagen für die Bewertung der offenen Fragen und der vorhandenen Meinungs-differenzen rund um das Thema Kernenergie zu liefern. Die Studie stellt die aktuellen Literaturergebnisse zusammen und versucht die unterschiedlichen Ergebnisse durch einen Ver-gleich der Annahmen und Methoden zu begründen.

Auf der Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche und ergänzenden Expertenge-sprächen liefert der vorliegende Bericht eine möglichst objektive Übersicht zu den folgenden Themenbereichen der Kernenergie:

- **Risiken der Kernenergie:** Die Nutzung der Kernenergie impliziert die Handhabung von grossen Mengen radioaktiven Materials. Im Zusammenhang mit den Risiken der Kern-energie werden zunächst das Sicherheitskonzept und die Sicherheitssysteme von Kern-anlagen dargelegt. Es werden die Störfallrisiken bei der Nutzung der Kernenergie auf Basis der existierenden Literatur beschrieben und zu den Risiken anderer technischer Systeme in Beziehung gesetzt. Weiter werden Ergebnisse von Studien zu den Risiken gegenübergestellt, die durch Erdbeben, Terroranschläge und Proliferation entstehen.
- **Umweltrelevanz der Kernenergie:** Anhand der bestehenden Literatur wird die Band-breite der mit der Nutzung von Kernenergie verbundenen CO₂-Emissionen aufgezeigt, mit anderen Energieträgern verglichen und die Klimarelevanz der Nutzung von Kern-energie diskutiert. Weiter widmet sich die Studie der Frage der Entsorgung radioaktiver Abfälle, der geologischen Tiefenlagerung sowie weiteren Umweltauswirkungen bei der Nutzung von Kernenergie. Mithilfe von Lebenszyklusbetrachtungen wird die Umweltrele-vanz mit anderen Energieträgern verglichen. Multikriterienanalysen schliesslich stellen die Kernenergie den anderen Formen der Elektrizitätsgewinnung auf Basis weiterer Be-urteilungskriterien gegenüber.
- **Gesellschaftliche Akzeptanz, ethische Aspekte und gesundheitliche Auswirkun-gen:** Die Studie beleuchtet die Akzeptanz und die Risikowahrnehmung in Bezug auf die Kernenergie. Weiter werden ethische Aspekte und mögliche gesundheitliche Auswirkun-gen der Nutzung von Kernenergie beschrieben.
- **Kosten der Kernenergie:** Die Kosten der Kernenergie spielen eine zentrale Rolle bei der Diskussion um die Zukunft der Kernenergie. Die Studie stellt die Literaturergebnisse zu den Kosten und den externen Kosten der Kernenergie, der Risikohaftpflicht und der Kostenentwicklung von Brennstoffen zusammen und versucht die unterschiedlichen Lite-raturergebnisse zu begründen.

Sowohl die Argumente von Befürwortern als auch von Gegnern der Kernenergie lassen sich mit Hilfe der Literatur untermauern. Die Studie zeigt die zentralen Argumente in Bezug auf zehn Diskussionspunkte rund um das Thema Kernenergie und stellt Literatur und Expertenaussagen zu folgenden Meinungen der Befürworter und Gegner gegenüber.

1. Kernkraftwerke sind ausreichend sicher / Der Betrieb von Kernkraftwerken ist zu riskant
2. Kernkraftwerke sind sicher gegen Terrorismus, Sabotage und Krieg / Kernkraftwerke stellen bei Terrorismus, Sabotage und Krieg eine hohe Gefahr dar
3. Das Proliferationsrisiko wird ausreichend beherrscht / Das Proliferationsrisiko wird nicht ausreichend beherrscht
4. Mit der Nutzung der Kernenergie wird dem Klimawandel entgegen gewirkt / Die Nutzung der Kernenergie kann keinen wesentlichen Beitrag zur Verminderung des Klimawandels leisten
5. Eine Lösung für die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist absehbar / nicht absehbar
6. Die Schweizer Bevölkerung hat sich für die Nutzung der Kernenergie entschieden / Die Nutzung der Kernenergie spaltet die Gesellschaft
7. Die Nutzung der Kernenergie ist ethisch begründet / nicht begründbar
8. Kernanlagen sind im Normalbetrieb unbedenklich für Mensch und Umwelt / Kernanlagen schaden im Normalbetrieb Mensch und Umwelt
9. Die Nutzung der Kernenergie ist volkswirtschaftlich sinnvoll / unsinnig
10. Die Nutzung von Kernenergie ist durch hohe Brennstoffverfügbarkeit auch in Zukunft gesichert / Die Verfügbarkeit des Primärenergieträgers der Kernenergie ist gering

Résumé

La présente étude a pour objectif de fournir à l'Office fédéral de l'énergie les bases nécessaires pour évaluer les questions en suspens et les divergences d'opinion sur le thème de l'énergie nucléaire. Elle résume le contenu des publications actuelles et s'efforce d'expliquer les différents résultats par une analyse comparative des hypothèses et des méthodes.

Fondé sur des recherches approfondies, étayé par des entretiens avec des experts, le présent rapport livre un aperçu aussi objectif que possible des aspects suivants de l'énergie nucléaire:

- **Risques:** l'utilisation de l'énergie nucléaire implique le maniement de grandes quantités de matériaux radioactifs. Concernant les risques liés à cette énergie, l'étude commence par présenter le concept sécuritaire et les systèmes de sécurité des installations nucléaires. Elle décrit ensuite les risques des accidents majeurs en se fondant sur les publications existantes dans ce domaine et procède à une comparaison avec d'autres systèmes techniques. Les résultats des différentes études en matière de risques liés à des tremblements de terre, à des attaques terroristes ou à la prolifération sont ensuite mis en parallèle.
- **Composante environnementale:** sur la base de la littérature existante, l'étude présente la gamme des émissions de CO₂ liées à l'utilisation de l'énergie nucléaire, compare ces chiffres avec ceux d'autres agents énergétiques et analyse les effets que l'exploitation de l'énergie nucléaire peut avoir sur le climat. Elle aborde ensuite le problème de la gestion des déchets radioactifs, du stockage en couches géologiques profondes et des divers effets de l'exploitation de l'énergie nucléaire sur l'environnement. Sur la base de l'observation de cycles de vie, elle compare l'impact environnemental de l'énergie nucléaire à celui d'autres agents énergétiques. Dans le cadre d'analyses multicritères, l'énergie nucléaire est mise en parallèle avec d'autres formes de production d'électricité.
- **Accueil auprès la population, aspects éthiques et effets sur la santé:** l'étude expose l'accueil réservé à l'énergie nucléaire et la façon dont les risques qu'elle implique sont perçus. Elle décrit en outre les aspects éthiques de l'exploitation de l'énergie nucléaire et les effets qu'elle peut avoir sur la santé.
- **Coûts:** l'aspect financier de l'énergie nucléaire joue un rôle clé dans les débats sur son avenir. L'étude résume les différentes études faites sur les coûts internes et externes de cette énergie, sur la responsabilité civile en matière de risques et sur l'évolution du prix des combustibles et tente d'expliquer les divergences entre les données publiées dans ce domaine.

Les publications existantes viennent étayer les arguments des partisans comme des détracteurs de l'énergie nucléaire. L'étude expose les principaux arguments en relation avec dix points de discussion sur ce thème et présente les écrits et les déclarations d'experts concernant les avis contradictoires suivants:

1. Les centrales nucléaires sont suffisamment sûres. / L'exploitation des centrales nucléaires est trop risquée.
2. Les centrales nucléaires peuvent résister aux actes de terrorisme et de sabotage ainsi qu'aux conflits armés. / Les centrales nucléaires présentent un risque élevé en cas de terrorisme, de sabotage ou de guerre.
3. Le risque de prolifération est suffisamment maîtrisé. / Il n'est pas suffisamment maîtrisé.
4. L'utilisation de l'énergie nucléaire permet de contrer les effets néfastes du changement climatique. / Elle ne peut pas contribuer de façon décisive à freiner le changement climatique.
5. Une solution au problème du traitement des déchets radioactifs est en vue. / Il n'existe pas de solution au problème du traitement des déchets radioactifs.
6. La population suisse a approuvé l'exploitation de l'énergie nucléaire. / L'exploitation de l'énergie nucléaire divise la société.
7. L'exploitation de l'énergie nucléaire repose sur des critères éthiques. / Elle n'est pas défendable sur le plan éthique.
8. L'exploitation courante des installations nucléaires est sans danger pour l'homme et l'environnement. / Elle nuit à l'homme et à l'environnement.
9. L'exploitation de l'énergie nucléaire se justifie économiquement. / C'est un non-sens économique.
10. L'exploitation de l'énergie nucléaire est assurée à long terme par la grande disponibilité du combustible. / Les ressources primaires de l'énergie nucléaire ne sont pas disponibles en quantité suffisante.

1. Einleitung

Die Energiepolitik des Bundesrates sieht vielfältige Massnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Förderung der erneuerbaren Energien vor. Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, spricht der Bundesrat in der dritten Säule seiner Energiestrategie den Bau neuer Grosskraftwerke an. Dabei stehen unter anderem Kernkraftwerke zur Diskussion. Die ältesten Schweizer Kernkraftwerke (Beznau I und II und Mühleberg) werden um das Jahr 2020 ausser Betrieb genommen. Die Option Ersatz der bestehenden Kernkraftwerke durch Kernkraftwerke der nächsten Generation wird in den Energieperspektiven des Bundesamtes für Energie (BFE) behandelt.

Im Jahr 2008 wurden beim Bundesamt für Energie drei Rahmenbewilligungsgesuche für neue Kernkraftwerke eingereicht: Gösgen (Kernkraftwerk Niederamt AG, Projektgesellschaft der Atel Holding AG), Beznau (Axpo-Gruppe bzw. Konzerngesellschaften NOK und CKW) und Mühleberg (BKW FMB Energie AG). Dadurch haben Fragen rund um die Nutzung der Kernenergie an politischer Aktualität gewonnen.

1.1. Hintergrund

Die Kernenergienutzung ist seit Jahrzehnten stark umstritten. Die wichtigsten Meinungsdifferenzen bestehen bezüglich der folgenden Einschätzungen:

1. Kernkraftwerke sind ausreichend sicher / Der Betrieb von Kernkraftwerken ist zu riskant
2. Kernkraftwerke sind sicher gegen Terrorismus, Sabotage und Krieg / Kernkraftwerke stellen bei Terrorismus, Sabotage und Krieg eine hohe Gefahr dar
3. Das Proliferationsrisiko wird ausreichend beherrscht / Das Proliferationsrisiko wird nicht ausreichend beherrscht
4. Mit der Nutzung der Kernenergie wird dem Klimawandel entgegen gewirkt / Die Nutzung der Kernenergie kann keinen wesentlichen Beitrag zur Verminderung des Klimawandels leisten
5. Eine Lösung für die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist absehbar / nicht absehbar
6. Die Schweizer Bevölkerung hat sich für die Nutzung der Kernenergie entschieden / Die Nutzung der Kernenergie spaltet die Gesellschaft
7. Die Nutzung der Kernenergie ist ethisch begründet / nicht begründbar
8. Kernanlagen sind im Normalbetrieb unbedenklich für Mensch und Umwelt / Kernanlagen schaden im Normalbetrieb Mensch und Umwelt
9. Die Nutzung der Kernenergie ist volkswirtschaftlich sinnvoll / unsinnig
10. Die Nutzung von Kernenergie ist durch hohe Brennstoffverfügbarkeit auch in Zukunft gesichert / Die Verfügbarkeit des Primärenergieträgers der Kernenergie ist gering

1.2. Fragestellung

Das BFE hat die vorliegende Studie „Literaturübersicht Kernenergie“ in Auftrag gegeben, um mehr Informationen über die Herkunft der unterschiedlichen Standpunkte zum Thema Kernenergie zu erhalten und diese Standpunkte mit dem Hintergrund der Literaturarbeiten bewerten zu können.

Die Studie soll dem BFE Grundlagen für die Bewertung der offenen Fragen und der vorhandenen Meinungsdifferenzen rund um das Thema Kernenergie liefern. Dazu soll anhand der bestehenden Literatur eine möglichst objektive Übersicht erstellt werden.

Die Studie konzentriert sich dabei auf folgende Kernthemenbereiche und -fragen:

- Beurteilung der Störfall- und Unfallrisiken, Beurteilung von Sicherheitsaspekten und Wahrscheinlichkeiten
- Umweltrelevanz der Kernenergie: Beitrag zum Klimaschutz, Umgang mit radioaktiven Abfällen, weitere Umweltauswirkungen
- Gesellschaftliche Akzeptanz der Kernenergie und weitere gesellschaftliche Auswirkungen
- Gesamtkosten der Kernenergie und externe Kosten

Der Vergleich mit anderen Formen der Elektrizitätsgewinnung stellt einige Ergebnisse bezüglich der Kernenergie in einen umfassenden energiepolitischen Kontext. Dieser Vergleich wird aber nicht an jeder Stelle gezogen, da dies den Rahmen der Studie deutlich gesprengt hätte. Es wird vorausgesetzt, dass dem Leser bekannt ist, dass auch die Alternativen zur Kernenergie mit teilweise ähnlichen Problemen konfrontiert sind.

1.3. Inhaltliches Vorgehen und Methodik

Im Rahmen der Arbeit wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Die in der Studie zitierte Literatur wurde nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Relevanz für den Themenbereich
- Aktualität der Literatur
- Ausgewogenheit: Für alle Themenbereiche wurde Wert darauf gelegt, eine möglichst ausgewogene Auswahl an Literatur zu beschaffen und zu analysieren, die eine objektive Analyse ermöglicht.
- Hohes Aggregationsniveau: Wo möglich wurde darauf geachtet, dass die ausgewählte Literatur den Themenbereich möglichst breit abdeckt. Dafür wurden insbesondere auch Meta-Studien herangezogen.
- Literaturhinweise: Weitere Literaturstellen wurden auf Anregung der Begleitgruppenmitglieder und der interviewten Experten gesichtet und in die Studie aufgenommen.

Ausgehend von den ausgewählten Studien auf hohem Aggregationsniveau wird die relevante Literatur hinsichtlich ihrer Aussagen zu den aufgeworfenen Fragen vertieft analysiert. Dabei wird insbesondere die Bandbreite der Ergebnisse aufgezeigt und begründet.

Einzelne Aspekte der Literaturergebnisse wurden durch Gespräche mit Experten analysiert und überprüft. Durch diese Gespräche konnten zusätzliche Argumente und Literaturstellen gefunden werden. Die Erkenntnisse eines Teils der Expertengespräche sind in den Bericht eingeflossen. Die Einschätzungen bzw. Meinungen folgender Experten werden berücksichtigt:

- Stefan Hirschberg, Laboratory for Energy Systems Analysis, PSI Villigen
- Walter Wildi, Direktor des Instituts F.A. Forel, Universität Genf
- Stephan Kurth, Öko-Institut e.V. Darmstadt, Bereich Nuklearsicherheit und Anlagensicherheit
- Peter Zwicky, Basler & Hofmann AG, Experte für Erdbebensicherheit und Baudynamik

An dieser Stelle wird explizit darauf verwiesen, dass die Zielstellung der Studie die wertungsfreie Zusammenstellung der Literaturergebnisse ist. Die betrachtete Literatur schliesst nicht nur wissenschaftlich referenzierte Forschungsarbeiten, sondern auch Studien und Positionspapiere von Interessensgruppen mit ein. Eine Beurteilung der Qualität der zitierten Literatur bleibt jedem Leser und jeder Leserin selbst vorbehalten.

1.4. Gliederung des Berichts

Der vorliegende Bericht ist wie folgt gegliedert: In den Kapiteln 2 bis 5 werden die Resultate der Literatur für die in Kapitel 1.2. genannten Kernthemenbereiche und -fragen dargelegt. Dabei werden insbesondere auch Antworten auf die in Kapitel 1.1. genannten Diskussionsthemen gesucht.

Kapitel 2 beschreibt die Risiken der Kernenergie und liefert damit insbesondere Erkenntnisse zu den Störfallrisiken im normalen Betrieb und bei Erdbeben (Diskussionsthema 1), zur Gefahr durch Terroranschläge (Diskussionsthema 2) und zur Proliferation (Diskussionsthema 3).

In Kapitel 3 wird die Umweltrelevanz der Kernenergie dargelegt. Dadurch können Aussagen zur Kernenergie in Bezug auf den Klimawandel (Diskussionsthema 4) und zur Frage der Entsorgung radioaktiver Abfälle (Diskussionsthema 5) getroffen werden. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel weitere Umweltauswirkungen diskutiert und die Auswirkungen der Kernenergie mithilfe von Lebenszyklusbetrachtungen und Multikriterienanalysen in den Kontext anderer Formen der Elektrizitätsgewinnung gestellt (Diskussionsthema 8).

Die gesellschaftliche Akzeptanz, ethische Aspekte und gesundheitliche Auswirkungen sind Gegenstand von Kapitel 4. Das Kapitel liefert Informationen zu den Diskussionsthemen 6, 7 und 8.

Kapitel 5 befasst sich mit den Kosten der Kernenergie und der Brennstoffverfügbarkeit und dient damit zur Klärung der Diskussionsthemen 9 und 10.

Damit werden mit dieser Studie fast alle politisch brisanten Fragestellungen rund um das Thema Kernenergie abgedeckt. Einzig die Frage der Versorgungssicherheit bleibt ausgeklammert, wozu an dieser Stelle auf die Energieperspektiven (Prognos 2007) verwiesen sei.

In Kapitel 6 werden die wichtigsten Argumente, welche zu den Diskussionsthemen erhoben wurden, zusammengefasst.

2. Risiken der Kernenergie und ihre Relevanz

Die Nutzung der Kernenergie impliziert die Handhabung von grossen Mengen radioaktiven Materials. Die ionisierende Strahlung, die von diesem Material ausgeht, stellt eine potentielle Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Ein sicherer Betrieb der Nuklearanlagen soll primär verhindern, dass aus der direkten Strahlenexposition sowie aus der Aufnahme von radioaktiven Stoffen eine Gefährdung der Bevölkerung entsteht. Die in den Anlagen vorhandene Sicherheitstechnik und ein System der Sicherheitskultur (hohe Qualifikation des Betriebspersonals, organisatorische Zuverlässigkeit der Betreiberfirmen und umfassende, fachlich kompetenten und gesellschaftlich autorisierte Aufsicht) tragen dazu bei, dass von den Kernanlagen nur ein geringes Risiko ausgeht. Risiko wird dabei als Produkt aus Schadenausmass und Eintretenswahrscheinlichkeit von Ereignissen verstanden. Da Sicherheitssysteme und Handlungen des Betriebspersonals nicht als vollständig zuverlässig angesehen werden können, können Schäden infolge unzulässig hoher Strahlenexpositionen durch Störfälle nicht vollständig ausgeschlossen werden (siehe Kapitel 2.1.5 und 2.1.8). Zudem sind im Vergleich zu anderen technischen Risiken insbesondere die grossen Langzeitschäden im Falle eines Unfalles zu berücksichtigen (siehe Kap. 2.1.7).

Das real bestehende Risiko lässt sich nur durch die statistische Auswertung einer grossen Anzahl von Schadensfällen ermitteln. Dafür fehlt in der Kerntechnik die Datenbasis, weil Schadensfälle zu selten sind. Deshalb wird aufgrund der Analyse von Störfallszenarien mithilfe von Modellen ein prognostisches Risiko ermittelt. Die Risikowahrnehmung unterscheidet sich oft gravierend von diesem technisch-mathematisch ermittelten Risiko. Der Risikowahrnehmung kommt grosse Bedeutung für die gesellschaftliche Akzeptanz zu (siehe Kapitel 4).

Die Risiken der Kernenergienutzung werden im Folgenden anhand der Literatur näher beschrieben. Dabei werden zunächst in Kapitel 2.1. das Sicherheitskonzept und die Störfallrisiken dargelegt. Die Risiken, die durch Erdbeben und terroristische Attacken auf Kernkraftwerke entstehen, sind Gegenstand der Ausführungen der Kapitel 2.2. bzw. 2.3. In Kapitel 2.4. wird die Gefahr durch Proliferation skizziert.

2.1. Sicherheitskonzept und Störfallrisiken

Bei Störfällen in Kernanlagen sind Auslegungsstörfälle und auslegungsüberschreitende Störfälle zu unterscheiden. Der Auslegungsstörfall (Design Base Accident) eines Kernkraftwerks ist ein Störfall, bei dem durch auslegungsgemässes Verhalten der Sicherheitssysteme keine unzulässige Freisetzung radioaktiver Stoffe und keine unzulässige Bestrahlung von Personen auftritt. Die Beherrschbarkeit eines Auslegungsstörfalles ist im Genehmigungsverfahren und bei den regelmässigen Sicherheitsprüfungen eines Kernkraftwerkes nachzuweisen (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen 2004).

Als auslegungsüberschreitend (Beyond Design Base Accident) wird ein Störfall bezeichnet, welcher in Bezug auf das auslösende Ereignis oder die Art und Anzahl zusätzlicher Fehler den Rahmen der Auslegung durchbricht. Es ist dabei nicht auszuschliessen, dass radioaktive Stoffe in gefährdendem Umfang freigesetzt werden (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen 2004).

2.1.1. Sicherheitskonzept

Zur Beherrschung der Risiken sind in der Störfallrichtlinie der HSK (HSK-R-100/d) (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen 2004) vier Schutzziele definiert. Diese sind: (1) Kontrolle der Reaktivität, (2) Kühlung der Brennelemente, (3) Einschluss der radioaktiven Stoffe und (4) Begrenzung der Strahlenexposition.

Moderne Kernanlagen orientieren sich am Konzept gestaffelter Schutzmassnahmen („Defence in depth“). Das Konzept beruht auf dem Prinzip, dass im Falle des Versagens einer Sicherheitsebene (Level), die nächste Ebene zum Tragen kommt. Die Tabelle 1 beschreibt die fünf aufeinander aufbauenden Level (International Atomic Energy Agency IAEA 1996).

Tabelle 1 „Defence in depth“ Level

| „Defence in depth“ Level | Ziele | Grundlegende Aussage |
|--------------------------|---|--|
| Level 1 | Prävention anormaler Abläufe und Störungen | Konservative Auslegung und hohe Qualität bei Bau und Betrieb der Anlagen |
| Level 2 | Kontrolle abnormaler Abläufe und Erkennung von Störungen | Kontroll-, Begrenzungs- und Schutzsysteme und andere Überwachungseinrichtungen |
| Level 3 | Kontrolle von Unfällen innerhalb der Auslegungsbasis (Design Basis Accidents) | Erarbeitete Sicherheitseinrichtungen und Unfallprozeduren |
| Level 4 | Kontrolle schwerer Anlagen Bedingungen, inkl. Prävention des Fortschreitens von Unfällen und Entschärfung der Konsequenzen schwerer Unfälle (Beyond Design Basis Accidents) | Ergänzende Massnahmen und Unfallmanagement |
| Level 5 | Entschärfung radiologischer Konsequenzen signifikanter Freisetzung radioaktiven Materials | Externer Notfallschutz |

Für alle diese Ebenen sind gemäss der Richtlinie Systeme und Massnahmen zur Erreichung der genannten Schutzziele vorzusehen. Die Sicherheitsebene 3 für Auslegungsstörfälle wird je nach Grad der Schäden an der Anlage in drei Kategorien unterteilt:

- Kategorie 1: Ereignisse dieser Kategorie führen weder zu Schäden an sicherheitsrelevanten Anlageteilen, noch zu Schäden an Brennstabhüllrohren.
- Kategorie 2: Es treten nur begrenzte Schäden an Anlageteilen, die für die Sicherheit von Bedeutung sind, oder nur Schäden an einzelnen Brennstab-Hüllrohrsäulen auf. Das kann zu einer beschränkten Freisetzung radioaktiver Stoffe innerhalb des Kernkraftwerks führen.
- Kategorie 3: Das Ereignis kann zu erheblichen Schäden an Anlageteilen oder zur Beschädigung einer grösseren Zahl von Brennstab-Hüllrohren und damit zu einer Freisetzung erheblicher Mengen radioaktiver Stoffe innerhalb des Kernkraftwerks führen. Jedoch sind die Kühlbarkeit des Reaktorkerns und die Integrität des Containments gewährleistet.

Zu den Sicherheitsebenen 1 bis 5 sowie den Kategorien der Auslegungsstörfälle werden Dosislimiten für die Umgebung und das Personal festgelegt. Die Definition der Kategorien der Auslegungsstörfälle beinhaltet Angaben zu deren Häufigkeit. Betriebsstörungen können mit einer Häufigkeit von $>10^{-1}$ auftreten. Für Auslegungsstörfälle werden Häufigkeitsklassen von 10^{-1} bis 10^{-2} (Kategorie 1), 10^{-2} bis 10^{-4} (Kategorie 2) bzw. 10^{-4} bis 10^{-6} (Kategorie 3) gebildet. Der relevante Grenzwert für auslegungsüberschreitende Störfälle liegt bei einer Wahrscheinlichkeit von $<10^{-6}$ pro Jahr. Für jede Häufigkeitsklasse sind Anforderungen (Schädigung, Maximaldosis) vorgegeben, deren Einhaltung mit den deterministischen Sicherheitsanalysen nachzuweisen ist (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen 2004).

2.1.2. Sicherheitssysteme moderner Kernanlagen

Die tiefen Wahrscheinlichkeiten, mit denen mit auslegungsüberschreitenden Störfällen zu rechnen ist, sind das Ergebnis verschiedenster Massnahmen, mit denen die Sicherheit der zivilen Nutzung von Kernenergie erhöht wird. In diesem Kapitel werden die entsprechenden technischen Systeme und organisatorische Massnahmen vorgestellt. Die technische Sicherheit von Kernkraftwerken basiert auf vielen passiven und aktiven Konzepten.¹ Das radiotoxische Potential, das sich im Kernkraftwerk befindet, hier hauptsächlich in den Brennstäben des Reaktors, wird durch ein System von Barrieren an der Freisetzung in die Umgebung gehindert. Im Folgenden werden diese Barrieren beschrieben und die Sicherheitssysteme skizziert, die zum Schutz dieser Barrieren dienen (swissnuclear 2008b).

¹ Passive Sicherheitssysteme basieren auf passiven Komponenten, die zu ihrer Funktion keine externe Energieversorgung benötigen. Ihre Funktion basiert auf dem Vorhandensein unbeweglicher Strukturen, die im Reaktorsystem selbst vorhandenen Energie oder gespeicherter Energie.

Passive Sicherheitsbarrieren

In modernen Kernanlagen stehen gemäss der gebräuchlichen Klassifizierung nach der International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG-10) die folgenden Sicherheitsbarrieren zur Verfügung (International Atomic Energy Agency IAEA 1996):

- 1. Barriere: Dicht verschweisste Hüllrohre der Brennstäbe.
- 2. Barriere: Reaktordruckbehälter aus extrem dickwandigem Spezialstahl, der es ermöglicht den Reaktor bei hohem Druck zu betreiben und mit den Wandungen des gesamten Primärkreislaufes die Freisetzung von radioaktiven Stoffen verhindern soll.
- 3. Barriere: Druckfeste Sicherheitshülle aus Stahl (Containment), die je nach Reaktortyp den Druckbehälter oder den Reaktor samt dem unmittelbar anschliessenden Teil des Kühlkreislaufs umschliesst und das Reaktorgebäude aus meterdickem Beton.

In der Literatur sind auch geringfügig andere Untergliederungen des Barrierensystems anzutreffen.² Die HSK geht von den oben beschriebenen drei Barrieren aus (Brennelementhülle, Reaktor- und Reaktorkreislaufummantelung, Containment).

Sicherheitssysteme

Unter Störfallbedingungen muss die Intaktheit der oben genannten Barrieren sichergestellt werden. Wichtigstes Element ist der Schutz der Hüllrohre der Brennelemente. Sie sind bei unzulässiger Erhöhung der Temperatur durch eine Reihe von Schädigungsprozessen gefährdet. Die Temperaturerhöhung kann unterschiedliche Ursachen haben (Kühlmittelverluststörfälle, unzulässige Leistungserhöhung infolge ungewollter Anfachung der Kettenreaktion, Ausfall der jeweils benötigten Wärmesenke). Eine wichtige Aufgabe des Sicherheitssystems ist somit die Sicherstellung einer adäquaten Kühlung des Reaktorkerns unter Störfallbedingungen. Von grosser Bedeutung ist hierbei die Berücksichtigung der sogenannten Nachzerfallswärme, die auch nach der Unterbrechung der nuklearen Kettenreaktion noch weiter gebildet wird. Darüber hinaus muss auch die Integrität der weiteren Barrieren gewährleistet werden. Hierfür sind weitere Systeme wie z.B. zur Druckentlastung und zur Isolation desContainments (Durchdringungsabschluss) bei Auftreten eines Kühlmittelverluststörfalls erforderlich (International Atomic Energy Agency IAEA 2004a und International Atomic Energy Agency IAEA 2004b).

Das Sicherheitssystem umfasst das Reaktorschutzsystem und eine Anzahl von Sicherheitseinrichtungen. Letztere können sowohl aktiv als auch passiv ausgelegt sein. Aktive Sicherheitseinrichtungen benötigen zu ihrer Funktion zuverlässige externe Energiequellen, während passive Einrichtungen ohne diese auskommen. In der Reaktorentwicklung herrscht der

² In der Literatur wird häufig auch die kristalline Brennstoffmatrix der UO₂-Pellets innerhalb der Hüllrohre aufgrund ihrer Rückhalteeigenschaften bereits als erste Barriere betrachtet. Manchmal wird auch der biologische Schild, in der sich der Reaktor befindet, zu den Barrieren gezählt.

Trend vor, aktive Sicherheitseinrichtungen durch passive zu ersetzen, wobei bei den verschiedenen Reaktorneuentwicklungen ein unterschiedlicher Grad der Passivität angestrebt bzw. erreicht wird (International Atomic Energy Agency IAEA 1991).

Das Reaktorschutzsystem dient zur dauernden Überwachung des Reaktors und aller weiteren Systeme. Wichtige Messdaten wie Betriebsdruck, Temperatur, Neutronenzufluss und Radioaktivität werden redundant erfasst und ausgewertet. Wird ein festgelegter Grenzwert überschritten, schaltet das System den Reaktor inner Sekunden automatisch ab. Neben der Reaktorschnellabschaltung übernimmt das Reaktorschutzsystem auch die Aktivierung der Sicherheitseinrichtungen im Anforderungsfall. Sowohl das Reaktorschutzsystem als auch die Sicherheitseinrichtungen sind redundant und diversitär ausgelegt. Redundanz sorgt für eine hohe Verfügbarkeit im Anforderungsfall, während Diversifizierung Robustheit gegenüber unvorhergesehenen Defiziten in physikalischen Wirkprinzipien der Sicherheitssysteme schafft.³

Die Anlagen werden von den Kernkraftwerksbetreibern durch laufende Investitionen in die Sicherheit unter Berücksichtigung der weltweiten Betriebserfahrung immer auf dem neusten Stand von Wissenschaft und Technik gehalten. Im Sinne der Vorsorge sind gemäss Kernenergiegesetz weiter alle Vorkehrungen zu treffen, die zu einer zusätzlichen Verminderung der Gefährdung beitragen, soweit sie angemessen sind (Kernenergiegesetz KEG). Hierdurch wird die Aufsichtsbehörde vom Gesetzgeber mit dem nötigen Ermessensspielraum ausgestattet. Die Sicherheit der Schweizer Kernanlagen wird von der Schweizer nuklearen Sicherheitsbehörde (ab 2009 das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, vorher die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK) beaufsichtigt. Berücksichtigt werden dabei unter anderem die Resultate aus Inspektionen, Tests, Prüfungen, Sicherheitsanalysen sowie aus der Betriebserfahrung.

2.1.3. Auslegung und Sicherheitsnachweis

In der Störfall-Richtlinie der HSK (HSK-R-100/d) werden die auslösenden Ereignisse derjenigen Auslegungsstörfalle festgehalten (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK 2004), für die der Nachweis zu erbringen ist, dass durch eine geeignete Auslegung der Anlage alle Schutzziele erreicht werden. Gemäss der Richtlinie sind diese Analysen ausgehend vom Stand der Technik mit deterministischen Modellen durchzuführen. Hierbei sind

³ Redundanz bezeichnet das mehrfache Vorhandensein einer Sicherheitseinrichtung. Die einzelnen Stränge müssen unabhängig voneinander funktionieren und bei Bedarf auch unabhängig voneinander mit Energie versorgt werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer redundanten Notstromversorgung. Durch die redundante Auslegung wird erreicht, dass die sicherheitsgerichtete Funktion des Gesamtsystems auch dann erreicht wird, wenn nicht alle Einzelsysteme verfügbar sind.

Diversität bezeichnet die Anwendung unterschiedlicher physikalischer Wirkprinzipien und Konstruktionen zur Erreichung derselben Sicherheitsfunktion. Durch die Diversifizierung wird gewährleistet, dass die Sicherheitsfunktion auch dann noch wahrgenommen werden kann, wenn eines der für die Sicherheitsfunktion eingesetzten Systeme Designfehler aufweist. Die gewünschte Wirkung wird dann mit grosser Wahrscheinlichkeit von einem andersartig konstruierten System erzielt.

konservative Annahmen zu treffen, die die Unschärfen der verfügbaren Modelle ausreichend berücksichtigen. Weiterhin ist das sogenannte Einzelfehlerkriterium anzuwenden. Auslegungsstörfälle müssen entsprechend der Störfall-Richtlinie HSK-R-100 auch dann beherrscht werden, wenn ein vom auslösenden Ereignis unabhängiger Einzelfehler in einem zur Störfallbeherrschung erforderlichen Sicherheitssystem unterstellt wird. Die Analyse von Störfallsequenzen, die über den Rahmen der Auslegungsstörfälle hinausgehen, wird in der sogenannten Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) durchgeführt., mit deren Hilfe ermittelt wird, mit welcher Wahrscheinlichkeit es zu einem Kernschaden kommen kann.⁴

Die Störfallrichtlinie enthält, unterschieden nach Druck- und Siedewasserreaktoren, den Mindestumfang der Ereignisse, für die deterministische Störfallanalysen durchzuführen sind. Ferner werden Ereignisse aufgeführt, für die keine deterministischen Störfallanalysen gefordert werden.

Die Störfallrichtlinie enthält eine explizite Aufzählung von Ereignissen, für die deterministische Störfallanalysen gefordert werden. Sie betreffen unterschiedliche Ereignisse aus den folgenden Kategorien: Störungen der Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkühlkreislauf, unzulässige Zufuhr von Reaktivität, Verlust von Reaktorkühlmittel, Störfälle in Hilfsanlagen und bei der Brennelement-Handhabung, Einwirkungen von innen wie z.B. Brand, Explosionen sowie Einwirkungen von aussen wie Erdbeben, Überflutungen, Blitzschlag, Brand oder Sturm. Für die in den Analysen aufgezählten Auslegungsstörfälle ist das Gesamtverhalten der Anlage zusammen mit allen Sicherheits- und Steuersystemen massgebend. Die Anforderungen der Massnahmen, die der behördlichen Aufsicht unterliegen, und der periodischen Sicherheitsüberprüfungen sind in Anhang 1 beschrieben.

2.1.4. Meldepflichtige Ereignisse

Störfälle und Abweichungen vom Normalbetrieb unterliegen gemäss Artikel 22 des Kernenergiegesetzes der Meldepflicht. Auf internationaler Ebene wird der Schweregrad von Störfällen in Kernanlagen auf der sogenannten International Nuclear Event Scale (INES) der internationalen Atomenergiebehörde und der Nuclear Energy Agency angegeben. Durch diese Skala wird die Bedeutung von Störfällen in eine international gemeinsame Perspektive gesetzt. Die Skala unterscheidet sieben Stufen (1 bis 7) von einer Anomalie bis zu einem schwerwiegenden Unfall (International Atomic Energy Agency IAEA 2008). Alle meldepflichtigen Ereignisse werden zusammen mit einer Kurzbeschreibung und der Einstufung gemäss der INES Skala veröffentlicht. In der Schweiz geschieht dies neben einer aktuellen Information zusammenfassend im jährlich erscheinenden Aufsichtsbericht der HSK bzw. des ENSI zur nuklearen Sicherheit in den schweizerischen Kernanlagen (siehe z.B. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (2008a): Aufsichtsbericht 2007). Eine Übersicht der INES-Skala findet sich in Anhang 2.

⁴ Probabilistische Sicherheitsanalysen werden in Kapitel 2.1.5. genauer beschrieben.

Die Fraktion der Grünen im Europäischen Parlament hat 2007 eine Studie herausgegeben, in welcher Störfälle, die nach Tschernobyl 1986 in den Kernkraftwerken der Welt stattgefunden haben, beschrieben werden (Kastchiev et al. 2007). Die Studie kommt zum Schluss, dass viele sicherheitsrelevante Ereignisse jedes Jahr, überall auf der Welt, in allen Typen von Kernkraftwerken und Kernreaktoren stattfinden und dass viele dieser Ereignisse in der INES-Skala nur ungenügend abgebildet oder nicht richtig bewertet werden. Zur Begründung wird unter anderem angeführt, dass es diesem Meldesystem an Unabhängigkeit mangelt, da die Bewertung von den Betreibern der Kernanlagen und den nationalen Aufsichtsbehörden durchgeführt wird. Weiterhin sei es schwierig, die grosse Komplexität möglicher Störfälle richtig zu erfassen. In Anhang 3 sind sechzehn in der Studie genannte Störfallereignisse abgedruckt.

2.1.5. Restrisiko, Wahrscheinlichkeiten von Kernschäden und Freisetzung von Radioaktivität

Trotz der hohen Sicherheitsvorkehrungen verbleibt ein Restrisiko, dass durch Versagen von einer höheren Anzahl von Sicherheitssystemen bzw. durch Fehlhandlungen der Betriebsmannschaft Schutzziele nicht eingehalten werden und sich daraus Störfallsequenzen entwickeln, die zu Kernschäden und gegebenenfalls auch zu gravierenden Freisetzungen von radioaktiven Stoffen führen. Zur Quantifizierung des Risikos werden Probabilistische Sicherheitsanalysen durchgeführt, für die drei Stufen unterschieden werden (Kröger 2006):

- PSA Level 1 analysiert die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Kernschadens. Dieser Fall charakterisiert das Versagen der Sicherheitssysteme.
- PSA Level 2 analysiert, mit welcher Wahrscheinlichkeit es zu Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus der Anlage in die Umgebung kommt. Diese Wahrscheinlichkeit wird als Funktion der erwarteten freigesetzten Aktivität ausgewiesen.
- PSA Level 3 schätzt die sich aus den Freisetzungsraten ergebenden Strahlenexpositionen der Bevölkerung ab und ermittelt die jeweils zu erwartenden gesundheitlichen Auswirkungen. Auf Grundlage der sogenannten Dosisextrapolation werden die durch radiologische Spätschäden zu erwartenden Fatalitäten abgeschätzt.

Während von Seiten der Aufsichtsbehörde gefordert wird, international anerkannte quantitative Risikokenngrößen für die Kernschadenshäufigkeit und die Freisetzungshäufigkeit in Bewilligungsgesuchen und periodischen Sicherheitsüberprüfungen auszuweisen, was den Stufen PSA Level 1 und PSA Level 2 entspricht, ist die Analyse der Strahlenexposition als Funktion der Eintrittswahrscheinlichkeit auslegungsüberschreitender Störfälle (PSA Level 3) nicht Bestandteil von Genehmigungsverfahren. PSA Level 3 haben somit derzeit den Charakter wissenschaftlicher Untersuchungen mit dem Ziel der Bewertung der Kernenergie im Vergleich mit den Risiken anderer Energieerzeugungstechnologien (z.B. Burgherr & Hirschberg 2008).

Für die Bewertung der Ergebnisse von Probabilistischen Sicherheitsanalysen sind Grenz- und Richtwerte erforderlich. Die Internationale Atomenergiebehörde empfiehlt für die Kernschadenshäufigkeit einen Richtwert von 10^{-5} pro Reaktorjahr (für Neuanlagen)⁵ (International Atomic Energy Agency IAEA 2006). In der Schweiz gilt als Grundlage für die Durchführung von PSA und die Ableitung von Massnahmen auf Basis der ermittelten Kernschadenshäufigkeiten sowie der Häufigkeiten für grosse Aktivitätsfreisetzungen (LERF = Large Early Release Frequency) die Richtlinie für Probabilistische Sicherheitsanalysen (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen 2008b).

Die in der Schweiz durchgeführten PSA ergeben für die Schweizer Kernkraftwerke Eintretenswahrscheinlichkeiten von Kernschäden zwischen 10^{-5} und 10^{-6} pro Reaktorjahr. Tabelle 2 zeigt die Kernschadenshäufigkeiten verschiedener interner und externer Ereignisse für die Kernkraftwerke Gösgen und Mühleberg basierend auf den periodischen Sicherheitsüberprüfungen der HSK (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK 1999 und 2007).⁶ Die Tabelle gibt also an, mit welcher Häufigkeit die aufgeführten Ereignisse gemäss den modellierten Wahrscheinlichkeiten zu einem Kernschaden führen können (Hirschberg et al. 2005).

Für Reaktoranlagen der 2. Generation wurden die in Tabelle 2 angegebenen Kernschadenshäufigkeiten erst durch umfangreiche Nachrüstmassnahmen erreicht. Hierzu zählt die Ausrüstung der Werke mit Notstandssystemen, die auch eine gebunkerte Notstandswarte einschliessen, von der aus die wichtigsten Sicherheitsfunktionen im Fall einer Zerstörung des Wartungsgebäudes überwacht und gesteuert werden können.

Gemäss den Berechnungen der Kernkraftwerksbetreiber liegen die Wahrscheinlichkeiten eines Kernschadens bei allen Schweizer Kernkraftwerken unter der Empfehlung der IAEA. Auf internationaler Ebene wurden in den letzten 30 Jahren zahlreiche Risikostudien durchgeführt. Übliche Resultate für Kernschadenshäufigkeiten liegen für die USA, Frankreich und Deutschland bei einer Wahrscheinlichkeit von $5 \cdot 10^{-5}$ pro Reaktorjahr (Leurs & Wit 2003). Damit liegen die Wahrscheinlichkeiten eines Kernschadens in der Schweiz tiefer als im internationalen Vergleich.

⁵ Der Richtwert für Altanlagen liegt bei 10^{-4} pro Reaktorjahr.

⁶ Da uns Daten für die anderen Schweizer Kernkraftwerke nicht zugänglich waren, beschränken wir uns hier auf die Kernkraftwerke Gösgen und Mühleberg. Beznau wurde im Jahr 2004, das Kernkraftwerk Leibstadt in den Jahren 1996 und 2009 begutachtet.

Tabelle 2 Übersicht über die Kernschadenshäufigkeiten interner Ereignisse der Kernkraftwerke Gösgen und Mühleberg

| | Auslösendes Ereignis | KKW Gösgen | KKW Mühleberg |
|---|---|---------------------------------------|--|
| | | Häufigkeit [1/Jahr] | Häufigkeit [1/Jahr] |
| Interne Ereignisse | Kühlmittelverluststörfälle | $8.3 \cdot 10^{-7}$ | $1.11 \cdot 10^{-6}$ |
| | Transienten | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | $4.81 \cdot 10^{-7}$ |
| | Total interne Ereignisse | $9.5 \cdot 10^{-7}$ | $1.59 \cdot 10^{-6}$ |
| Externe & interne systemübergreifende Ereignisse | Brand | $1.8 \cdot 10^{-7}$ | $6.72 \cdot 10^{-6}$ |
| | Interne Überflutung | $1.1 \cdot 10^{-8}$ | $1.85 \cdot 10^{-6}$ |
| | Verstopfungen der Wasserfassungen | $7.2 \cdot 10^{-8}$ | kein Wert |
| | Externe Überflutung | kein Wert | $5.19 \cdot 10^{-7}$ |
| | Flugzeugabsturz | $2.1 \cdot 10^{-8}$ | $6.17 \cdot 10^{-8}$ |
| | Extreme Winde & Tornados | kein Wert | $6.40 \cdot 10^{-7}$ |
| | Total externe & interne systemübergreifende Ereignisse | $2.5 \cdot 10^{-7}$ | $9.79 \cdot 10^{-6}$ |
| Totale Kernschadenshäufigkeit (ohne Erdbeben) | | $1.2 \cdot 10^{-6}$ | $1.14 \cdot 10^{-5}$ |

Die Kernschadenshäufigkeit ist jedoch nicht identisch mit der Wahrscheinlichkeit einer gravierenden Freisetzung radioaktiver Stoffe infolge eines Störfalls. Für den Fall, dass sich die Anlage in eine Störfallsequenz begibt, bei der die Reaktorschutz- und Sicherheitssysteme derart versagen, dass ein Kernschaden droht oder bereits eingesetzt hat, wurden eine Anzahl von Massnahmen erarbeitet und im Betriebshandbuch vorgeschrieben. Diese Massnahmen werden SAMG (Severe Accident Management Guidelines) genannt und werden der 4. Ebene (vgl. Tabelle 1) zugeordnet (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen 1993a). Für die Durchführung der SAMG sind zum Teil zusätzliche technische Einrichtungen erforderlich. Bei den sich heute in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken der 2. Generation wurden diese Systeme im Zuge von Nachrüstmassnahmen infolge einer vertieften Sicherheitsbewertung in den 80er und 90er Jahren installiert. Anhang 4 beschreibt, welche Massnahmen die SAMG umfassen.⁷

⁷ Darüber hinaus gibt es eine Reihe externer Notfallschutzmassnahmen zur Entschärfung radiologischer Konsequenzen einer signifikanten Freisetzung radioaktiven Materials (Ebene 5 gemäss Tabelle 1). Exemplarisch sei auf COSMO-2 von MeteoSchweiz hingewiesen. Ein wichtiger Einsatzbereich von COSMO-2 ist die Modellierung der Atmosphäre und ihrer Entwicklung in der Umgebung von Kernkraftwerken im Schweizer Mittelland. Die genaue Kenntnis der meteorologischen Situation (insbesondere der lokalen Windfelder) ist ein wichtiges Element, um den Transport und die Ausbreitung von kontaminierten Luftmassen im Störfall zu berechnen. Mit diesen örtlichen Informationen kann das ENSI die Ausbreitung radioaktiver Luftmassen gezielter verfolgen

Mit Probabilistischen Sicherheitsanalysen des Levels 2 wird die Häufigkeit von Freisetzungen abgeschätzt. Abbildung 1 zeigt die Häufigkeit der Freisetzung von Radioaktivität anhand von sogenannten Cäsium-137-Äquivalenten für die Schweizer Kernkraftwerke. Beispielsweise wird für die Freisetzung von Radioaktivität, die 1000g Cäsium-137 entspricht, je nach Kernkraftwerk eine Häufigkeit von 10^{-7} bis 10^{-6} pro Jahr ermittelt (Schmocker et al. 1999).

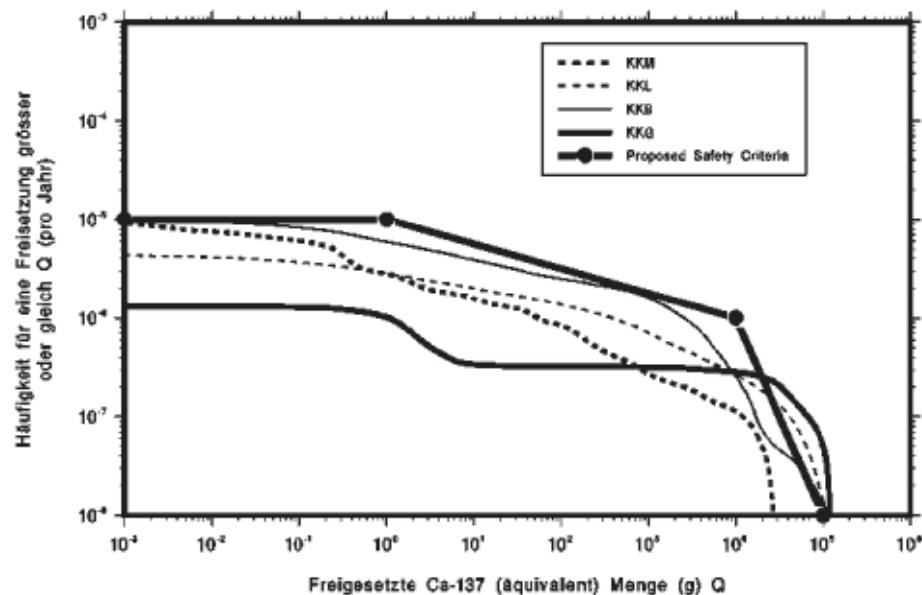


Abbildung 1 Häufigkeit einer Freisetzung von Radioaktivität (Cs-137) aus Schweizer Kernanlagen (Schmocker et al. 1999).

Hirschberg et al. (1999) geben für das KKW Mühleberg eine Wahrscheinlichkeit einer grossen Freisetzung von Radioaktivität von 10^{-9} pro GW_ea an. Hierbei handelt es sich um einen Grenzfall, bei dem nahezu das gesamte radioaktive Inventar des Reaktors freigesetzt wird, was mit der Lage des steilen Abfalls der Häufigkeiten auf der Seite grosser freigesetzter Mengen in Abbildung 1 korrespondiert.

Im Falle einer Einführung der nächsten Generation von Leichtwasserreaktoren, der sogenannten Generationen III bzw. III+, treten zwei wesentliche Veränderungen in der oben beschriebenen Situation auf.

1. Reaktoren der Generation III verfügen über automatische Sicherheitssysteme zur Beherrschung aller denkbaren Störfallszenarien – einschliesslich der Ebene 4. Dazu gehört auch die Beherrschung einer Kernschmelze (Fischer 2004)⁸.

und damit den Schutz der Bevölkerung verbessern (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz 2008).

⁸ Es sei darauf hingewiesen, dass Schäden der Anlage bei Störfällen der Ebene 4 so gross sein können, dass das Kraftwerk nach dem Störfall nicht wieder in einen funktionsfähigen Zustand versetzt werden kann. Die Sicherheitseinrichtungen verhindern jedoch die unzulässige Freisetzung radioaktiver Stoffe. Das Sicherheitskonzept stützt sich nicht mehr auf nachträglich eingeführte Massnahmen zur Beherrschung schwerer Störfälle (SAMG) ab, wie dies bei den heute in Betrieb befindlichen Reaktoren der 2. Generation der Fall ist.

2. Die redundante und diversitäre Auslegung der Sicherheitssysteme zur Verhinderung eines Kernschadens sind in Reaktoren der Generation III weiter ausgebaut.⁹

Damit wurden die Störfallsequenzen, einschliesslich der durch Einwirkung von aussen hervorgerufenen, die bei den Anlagen der 2. Generation durch Nachrüstmassnahmen und die Einführung der Richtlinien zur Beherrschung und Begrenzung schwerer Störfälle (SAMG) nachträglich berücksichtigt wurden, von vornherein in das Anlagen- und Sicherheitskonzept einbezogen. Dadurch ergeben sich um etwa eine Größenordnung geringere Eintrittshäufigkeiten für Kernschäden und Freisetzungshäufigkeiten als die in Abbildung 1 dargestellten Werte. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Elemente der Sicherheitssysteme moderner Reaktoren unterschiedlicher Hersteller zusammen mit der Angabe der Kernschadenshäufigkeit, die Analysen der Entwickler entnommen wurden, sind in Anhang 5 zusammengefasst.

2.1.6. Kritik an den Sicherheitseinschätzungen der HSK

Die Sicherheitsanalysen stehen in der Kritik der Kernkraftgegner. Ein Vorwurf lautet, seit 1990 seien im Kernmantel des Reaktors Mühleberg Risse bekannt.¹⁰ Die risikoreichste Rundnaht ist bis zu 25% gerissen und die Risstiefen betragen bis zu 90% der Wanddicke. Der Kernmantel in Mühleberg wurde 1996 mit vier grossen Klammern stabilisiert. Gemäss Fokus Anti-Atom (2008) wird dieser Tatsache in den Sicherheitsüberlegungen und -analysen der HSK nicht genügend Rechnung getragen.

Probleme mit Rissen im Kernmantel liegen bei einer Reihe ausländischer Kraftwerke mit Siedewasserreaktoren vor. Bei rund 10 japanischen Anlagen wurde der Kernmantel vollständig durch einen neuen ersetzt. Von 47 Anlagen desselben Herstellers wie beim KKW Mühleberg werden derzeit 19 Anlagen, bei denen ähnliche Risse vorhanden sind, mit Klammern weiter betrieben. Zwei Anlagen, unter anderem das Kernkraftwerk Würgassen in Deutschland, wurden ausser Betrieb genommen, die übrigen Anlagen weisen keine Risse im Kernmantel auf (Fokus Anti-Atom 2008).

Eine weitere Kritik betrifft die Tatsache, dass Probabilistische Sicherheitsanalysen nur ein theoretisches Risiko berechnen können. Für neue Reaktoren ist aufgrund der geringen Betriebserfahrung in diesen Sicherheitsanalysen mit grösseren Unsicherheiten zu rechnen. Zudem ist eine kompetente Kontrolle durch die Aufsichtsbehörden aufgrund des erforderlichen Detailwissens schwierig.¹¹

⁹ So werden einerseits erhöhte Redundanzen eingerichtet, wie z.B. 4 x 100 % anstelle von 4 x 50 % oder 3 x 100% (Areva 2005), andererseits kommen verstärkt passive Sicherheitssysteme zum Einsatz, die von einer externen Energieversorgung unabhängig sind (International Atomic Energy Agency IAEA 2005). Speziell in Bezug auf Einwirkungen von aussen sind Anlagen - wie beispielsweise der europäische Druckwasserreaktor (EPR) - durch entsprechende bauliche Massnahmen besser geschützt als heutige Kernkraftwerke (Areva 2005).

¹⁰ Der Kernmantel ist für die Kühlung des Kernes im Normalbetrieb und in Notfällen unabdingbar, ist jedoch mechanisch vergleichsweise wenig belastet, da es sich nicht um eine druckführende Komponente handelt, nicht zu verwechseln mit dem Reaktordruckbehälter, der dem hohen Innendruck des Reaktors standhalten muss.

¹¹ Auffassung von Walter Wildi, Direktor des Instituts F.A. Forel, Universität Genf.

2.1.7. Vergleich mit anderen technischen Risiken

Technische Systeme sind im Allgemeinen mit Risiken für Menschen und Umwelt verbunden. Abbildung 2 zeigt die erwarteten physisch Geschädigten und die erwartete geschädigte Lebensgrundlage (in km^2) infolge einiger Gefahren in der Schweiz (Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS 2003). Die Anzahl der Todesopfer, Schwer- und Leichtverletzten bzw. das Ausmass der geschädigten Lebensgrundlage werden deren Eintretenswahrscheinlichkeiten gegenübergestellt.

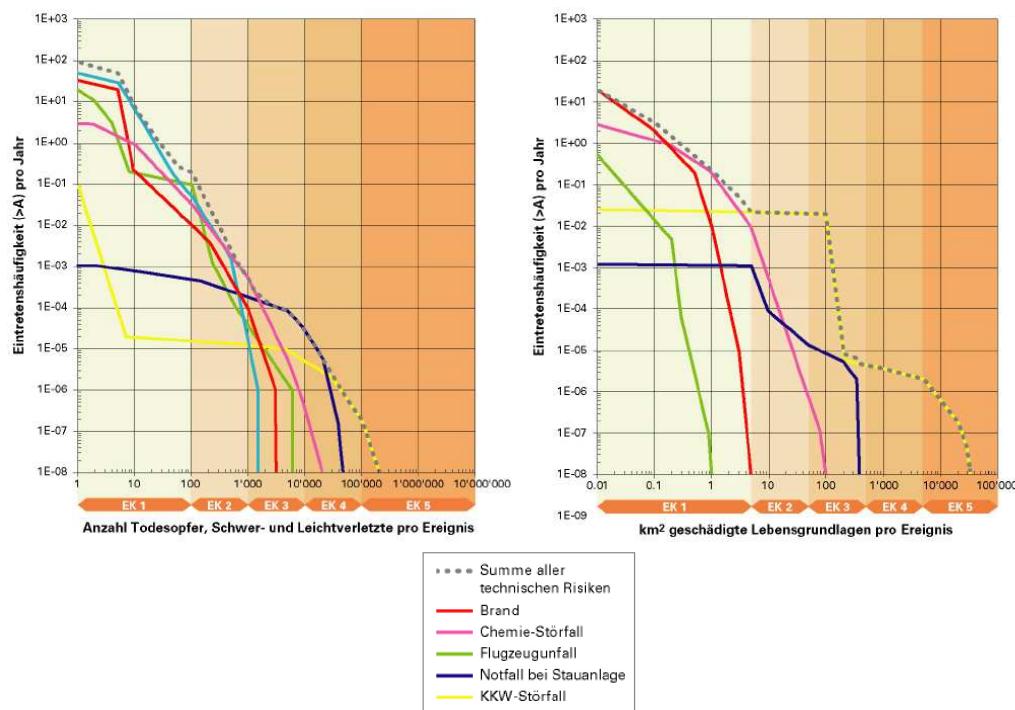


Abbildung 2 Erwartete physisch Geschädigte (linke Grafik) und erwartete geschädigte Lebensgrundlagen (rechte Grafik) infolge verschiedener Gefahren in der Schweiz (Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS 2003).

Im Folgenden werden die Risiken der Kernenergie mit Risiken von Stauanlagen in der Schweiz verglichen, weil beide Risiken zur Erzeugung von Elektrizität eingegangen werden. Mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 10^{-6} pro Jahr ist bei der Kernkraft ein Ereignis mit rund 40'000 Todesopfern, Schwer- und Leichtverletzten zu erwarten. Ein Störfall bei einer grossen Stauanlage mit der gleichen Eintretenswahrscheinlichkeit fordert rund 20'000 Todesopfer, Schwer- und Leichtverletzte. Mit derselben Wahrscheinlichkeit ist für die Wasserkraft mit rund 300 km^2 und für die Kernenergie mit rund 8'000 km^2 geschädigter Lebensgrundlage zu rechnen.

Die Zahl der physisch Geschädigten ist bei der gewählten Wahrscheinlichkeit von 10^{-6} pro Jahr (vergleiche Richtlinien der HSK) demnach bei der Kernkraft rund doppelt so hoch, die geschädigte Lebensgrundlage rund 25-mal so hoch wie bei der Elektrizitätsgewinnung aus Stauanlagen.

Die Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund folgender Überlegungen interpretiert werden:

- Die Berechnungen beziehen sich auf alle Anlagen in der Schweiz. Wird das Risiko in Bezug zu der produzierten Strommenge gesetzt, schneidet die Wasserkraft im Vergleich zur Kernenergie noch etwas besser ab.
- Die Dauer der Schädigung bei einem Unfall wird in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Teile der betroffenen Flächen sind nach einem schweren Unfall in einer Kernanlage über mehrere Jahrhunderte nicht bewohnbar und nicht oder nur eingeschränkt nutzbar.

Eine vergleichende Studie der Störfallrisiken der Energieketten der fossilen Energieträger sowie der Wasserkraft und der Kernenergie wurde kürzlich von Burgherr und Hirschberg (2008) vorgelegt. Als schwer wird hier ein Störfall definiert, wenn mindestens eins der folgenden Kriterien erfüllt ist: 5 Todesfälle, 10 Verletzte, 200 Evakuierte, extensive Unbrauchbarmachung von Lebensmitteln, Freisetzung von Kohlenwasserstoffen über 10'000 Tonnen, extensive Massnahmen zur Dekontamination von Land- oder Wasserflächen über 25 km², ein ökonomischer Verlust von mindestens 5 Mio. US Dollar. Während für die Auswertung der Häufigkeit von schweren Störfällen in den Bereichen fossile Energieträger und Wasserkraft statistische Daten realer Ereignisse aus der ENSAD (Energy Related Severe Accident Database) Datenbank¹² ausgewertet wurden, ist ein solches Vorgehen bei der Kernenergie aufgrund der geringen Anzahl tatsächlich stattgefunder schwerer Störfälle und demzufolge mangelnder Statistik nicht möglich und es muss hier auf theoretische Ergebnisse aus Probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) zurückgegriffen werden. Die Wasserkraft in Nicht-OECD-Staaten sowie der Bereich der Versorgung mit fossilen Energieträgern erweisen sich als besonders störfallanfällig. Die erwarteten Todesfallraten sind – bezogen auf die erzeugte Energiemenge – am niedrigsten für die Wasserkraft in westlichen Ländern sowie für die Kernenergie. Während bei den fossilen Energieträgern und der Wasserkraft direkte Todesopfer dominieren, sind es bei der Kernkraft die latenten Todesfälle, die durch Dosisextrapolation theoretisch ermittelt werden (Burgherr und Hirschberg 2008).

2.1.8. Faktor Mensch

Eine wichtige Komponente bei der Bewertung des Risikos von Kernkraftwerken stellt der Faktor Mensch dar. Etwa die Hälfte der meldepflichtigen Ereignisse (siehe Abschnitt 2.1.4.) werden auf Fehler des Personals oder Mängel in der Organisation bzw. des Managements des Betreibers zurückgeführt. Der Beitrag zur theoretisch ermittelten Kernschadenshäufigkeit schwankt je nach Anlagentyp und Analysemethode zwischen 15 und 80%. Mit Verbesserungen bei den technischen Sicherheitssystemen wächst tendenziell der Einfluss des Faktors Mensch bei gleichzeitiger Abnahme des Risikos bzw. der Kernschadenshäufigkeit (OECD / Nuclear Energy Agency NEA 2004a).

¹² Die internationale Datenbank wurde im Rahmen einer Studie des BFE aufgebaut (Hirschberg et al. 1998).

Die Berücksichtigung des Faktors Mensch auf die Sicherheit von Kernkraftwerken ist in heutige üblichen Probabilistischen Sicherheitsanalysen fest verankert. Sie wird "Human Reliability Analysis" (HRA) genannt. Die Wahrscheinlichkeit von Operateurfehlern wird in den Fehlerbäumen, auf denen die Probabilistischen Analysen beruhen, in der gleichen Weise berücksichtigt wie die Zuverlässigkeit technischer Komponenten und Sicherheitssysteme. Menschliches Versagen wird ebenso wie das Versagen einer technischen Sicherheitseinrichtung durch eine Verzweigung im Ereignisbaum modelliert, für die eine Eintrittswahrscheinlichkeit angesetzt wird. Anhang 6 enthält Details zur HRA. Ein Hauptproblem stellt die Quantifizierung der Wahrscheinlichkeiten für menschliche Fehlhandlungen, die Bandbreite möglicher Fehler und deren Interaktion mit den technischen Risiken dar.¹³ Sie stützt sich auf die Auswertung der vorliegenden Betriebserfahrung. Da nur wenige relevante Störfallsequenzen für eine Auswertung zur Verfügung stehen, wird ein grosser Teil der Datenbasis durch Auswertung von Simulatortrainings und Expertenbefragungen gewonnen. Den grossen Unsicherheiten wird durch den Ansatz konservativer Fehlerwahrscheinlichkeiten begegnet.¹⁴

Von den Kraftwerksbetreibern wird präventiv eine Reihe von Massnahmen ergriffen, um die Wahrscheinlichkeit von Fehlern durch die Bedienmannschaft so klein wie möglich zu halten.¹⁵ Das Personal von Kernanlagen unterliegt zudem hohen Anforderungen an Qualifikation, Ausbildung und Eignung, die in der Verordnung über die Anforderungen an das Personal von Kernanlagen (VAPK) festgeschrieben sind.¹⁶

Eine Überforderung der Operateure durch eine Vielzahl teilweise redundanter Signale, wie sie noch auf dem Kraftwerksblock TMI-2 in Harrisburg wesentlich zur Auslösung der Kernschmelze beigetragen hat, wird heute durch eine gezielte Filterung und Konzentration auf wesentliche Parameter verhindert, ohne dabei dem Operateur die Möglichkeit zu nehmen, sich Informationen über alle Details zu verschaffen.

In einem NEA Report wird darauf verwiesen, dass die ausschliessliche Berücksichtigung des Faktor Mensch als Fehlerquelle eine Vereinfachung darstellt (OECD / Nuclear Energy Agency NEA 2004a). Der Mensch ist in der Lage, seine Kreativität auch in unvorhergesehnen Situationen zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen einzusetzen. Zu sicherheitsgerechtem Verhalten in diesem Sinn gehören demnach nicht nur die Abwesenheit von

¹³ Einschätzung von Stephan Kurth, Öko-Institut e.V., Bereich Nuklearsicherheit und Anlagensicherheit.

¹⁴ Auskunft von Horst-Michael Prasser, Professor für Kernenergiesysteme an der ETH Zürich.

¹⁵ Hierzu gehört die Forderung der Berücksichtigung ergonomischer Gesichtspunkte bei der Gestaltung der Arbeitsplätze und Arbeitsabläufe für Bedienung und Unterhalt sowie für Funktions- und Wiederholungsprüfungen, durch die ein sicherheitsgerechtes Verhalten der Beschäftigten möglichst erleichtert wird.

¹⁶ Reaktoroperateure unterliegen einem Ausbildungsprozess, der ebenfalls in der VAPK im Einzelnen definiert ist. Die Operateure werden von der Aufsichtsbehörde lizenziert, die Behörde ist bei den Prüfungen anwesend. Neben der fachlichen Kompetenz ist die medizinisch-somatische Eignung sowie die psychische (menschliche) Eignung für die jeweilige Aufgabe nachzuweisen (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen 1993b).

Fehlern, sondern auch positive Beiträge in Form von Prävention, Erkennung und Begrenzung von Fehlern.

In einer vom Öko-Institut e.V. 2002 verfassten Studie wird der Einfluss des Faktors Mensch auf die Sicherheit von Kernanlagen ausführlich beschrieben (Öko-Institut e. V. 2002). Die Studie kommt zum Schluss, dass quantitative Aussagen über die Wahrscheinlichkeiten schwerer Kernschäden bzw. das Risiko von Freisetzungen radioaktiver Stoffe zur Beschreibung der Sicherheit von Kernkraftwerken unter der Berücksichtigung des Faktors Mensch nicht geeignet sind und zu Fehleinschätzungen führen können. Gemäss Öko-Institut zeigen Beispiele, dass die Zahlenwerte für menschliche Zuverlässigkeiten nicht oder nur bedingt quantifizierbare Unsicherheiten sowie Grenzen bezüglich der erfassbaren Handlungsabläufe und äusseren Einflüsse aufweisen. Die rechnerisch ermittelten Werte haben eine Gültigkeit nur innerhalb der zugrunde gelegten Modelle, die jedoch von realen Verhältnissen abweichen können. Absolute Kenngrößen sind daraus nicht ableitbar.¹⁷ Insgesamt ist die Angabe von Zahlenwerten, z.B. für die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehlhandlungen, nach Ansicht des Öko-Instituts nur mit grossen Unsicherheiten, die auch grosse Ermessensspielräume der Prüfer implizieren, möglich. Die Aussagekraft des Ergebnisses sei daher erheblich einschränkt.

2.2. Erdbebenrisiko

Die Risiken der Kernenergie durch Erdbeben wurden in den oben zitierten Kernschadenshäufigkeiten (siehe Tabelle 2) ausgeklammert. Von 2000 bis 2004 wurde eine umfassende Studie zur probabilistischen Erdbebengefährdung der Kernkraftwerkstandorte in der Schweiz durchgeführt (Projekt PEGASOS). Die Autoren der Studie beurteilen die Erdbebengefährdung neu und kommen zum Schluss, dass das zerstörerische Potential von Erdbeben heute höher eingestuft werden muss als früher. Der Grund dafür liegt vor allem in der besseren Kenntnis der bei Erdbeben gemessenen Kräfte (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK 2007). Basierend auf den Erkenntnissen der PEGASOS-Studie hat die HSK 2005 verschärft Erdbebengefährdungsannahmen für die Sicherheitsberechnungen von Kernkraftwerken festgelegt. Auf Grundlage der Ergebnisse der Studie wurden an den Schweizer Kernkraftwerken laufend Massnahmen gegen die Erbebengefährdung umgesetzt, um die Schutzziele auch unter den neuen Annahmen bezüglich Erdbebenstärke und -häufigkeit zu gewährleisten: Beispielsweise wurden Backsteinmauern verstärkt, Elektroschränke, Motorleitstände, Kabelpritschen, Dieseltanks, Rohrleitungsabschnitte und Kommandoräume nachgerüstet.

In anderen Regionen der Welt, insbesondere in Japan, ist die Gefahr eines starken Erdbebens weit grösser als in der Schweiz. Daher sind in Japan die Kernkraftwerke so ausgelegt, dass sie ein Erdbeben mit einer Stärke von 6.5 auf der logarithmischen Richterskala mit

¹⁷ Einschätzung von Stephan Kurth, Öko-Institut e.V., Bereich Nuklearsicherheit und Anlagensicherheit.

Epizentrum direkt unterhalb des Reaktors unbeschadet überstehen. Einzelne Reaktoren, welche in Gebieten mit einer noch grösseren Erdbebengefährdung stehen, sind sogar so konstruiert, dass sie ein Erdbeben mit einer Stärke von bis zu 8.5 auf der Richterskala unbeschadet überstehen (World Nuclear Association WNA 2008).

Wahrscheinlichkeiten

Die Tabelle 3 zeigt die Kernschadenshäufigkeiten aufgrund von Erdbeben für die Schweizer Kernkraftwerke. Der Beitrag von Erdbeben zur Gesamtwahrscheinlichkeit eines Kernschadens beträgt rund ein Drittel und ist damit ein wesentlicher Faktor bei der Beurteilung des Gesamtrisikos (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK 2007).

Tabelle 3 Kernschadenshäufigkeiten aufgrund von Erdbeben für die Schweizer Kernkraftwerke.

| Kernkraftwerk | Kernschadenshäufigkeit pro Jahr | |
|---------------|---------------------------------|-----|
| Beznau | $1.4 * 10^{-6}$ | (1) |
| Leibstadt | $3.0 * 10^{-7}$ | (2) |
| Mühleberg | $4.8 * 10^{-6}$ | (3) |
| Gösgen | Keine Angaben | (4) |

(1) HSK 2004
(2) HSK 1996
(3) HSK 2007
(4) bisher nicht publiziert. Wird im aktuellen Gutachten zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung behandelt (Publikation 2010)

2.3. Terroranschläge

Die Nutzung der Kernenergie bietet verschiedene Angriffsflächen für Terroranschläge: Anschläge auf den Transport von radioaktivem Material, Anschläge auf ein zukünftiges Tiefenlager, Anschläge auf ein Kernkraftwerk (Flugzeug, interne Sabotage). In der Literatur wird vor dem Hintergrund der Anschläge vom 11. September 2001 insbesondere auf die Möglichkeit eines vorsätzlich herbeigeführten Flugzeugabsturzes auf Kernkraftwerke eingegangen. Verschiedene Länder und Institute haben Studien erarbeitet, welche das Risiko eines solchen Absturzes und die Folgen abschätzen.

Studie der HSK

Die HSK hat 2003 für die Schweiz die möglichen Auswirkungen eines vorsätzlich herbeigeführten Absturzes auf die fünf Schweizer Kernkraftwerke untersucht (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK 2003). Dabei wurden die weltweit verbreiteten Verkehrs-

flugzeugtypen¹⁸, deren Gewicht, die Treibstoffmenge, die Geschwindigkeit und weitere Anflugbedingungen berücksichtigt. Die Studie zeigt, dass der Schutzgrad aller fünf Schweizer Kernkraftwerke gegen einen vorsätzlich herbeigeführten Flugzeugabsturz hoch ist. Dabei wurde eine theoretische Quantifizierung der Wahrscheinlichkeiten vorgenommen. Die Regierungen und Behörden der OECD-Länder haben sich aber darauf geeinigt, detaillierte Daten, Methoden und Resultate der Untersuchungen im Interesse der internationalen Massnahmen zur Terrorismusprävention nicht zu veröffentlichen. Die Autoren der Studie kommen zu folgenden Schlüssen:

- Bei einem vorsätzlichen Absturz eines zivilen Passagierflugzeugs auf ein Kernkraftwerk ist mit schweren Personen- und Sachschäden in der Anlage zu rechnen.
- Der Aufprall muss mit einer erhöhten bis hohen Geschwindigkeit erfolgen, damit eine lokale Durchdringung des Reaktorgebäudes möglich ist. Damit ist es schwierig, das Reaktorgebäude so genau zu treffen, dass auch massive Beschädigungen eintreten. Dies gilt insbesondere für die Anlage Mühleberg, die in einem Tal eingebettet ist und durch umliegende Hügel für ein Zivilflugzeug mit hohen Geschwindigkeiten kaum zielgenau zu treffen ist.
- Da alle schweizerischen Kernkraftwerke über autarke, gebunkerte Notstandssysteme verfügen, weisen sie weltweit gesehen einen sehr hohen Sicherheitsstandard auf. Diese zusätzlichen Sicherheitssysteme erhöhen auch den Schutzgrad bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz.
- Die Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt sind gegen einen Aufprall bei allen untersuchten Geschwindigkeiten so gut geschützt, dass ein Durchbrechen der Reaktorgebäude praktisch nicht möglich ist. Die Untersuchungen zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Freisetzung von Radioaktivität aufgrund eines Flugzeugabsturzes daher sehr niedrig ist.
- Für die Kernkraftwerke Beznau zeigte sich, dass die Anlagen einen Vollschutz bei mittleren und erhöhten Geschwindigkeiten aufweisen. Für das Kernkraftwerk Mühleberg konnte ein Vollschutz des Reaktorgebäudes gegen Penetration bei mittleren Geschwindigkeiten ausgewiesen werden. Dank der inneren, massiven Strukturen ist auch bei einem Durchbrechen des äusseren Gebäudes ein hoher Schutzgrad gegen eine Beschädigung der für die Kernkühlung relevanten Systeme vorhanden. Die Analysen der Betreiber der Anlagen Beznau und Mühleberg zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz niedrig ist.

¹⁸ Folgende Flugzeugtypen wurden berücksichtigt: SAAB 2000, Fokker 100, A320, A310 und B747-400.

- Die bedingten Wahrscheinlichkeiten für eine grössere Freisetzung nach einem Angriff liegen zwischen 10^{-2} (Mühleberg, Beznau) und 10^{-3} (Gösgen, Leibstadt)¹⁹. "Bedingte Wahrscheinlichkeit" bedeutet hier, dass es mit der angegebenen Wahrscheinlichkeit zu einer grossen Freisetzung kommt, wenn unterstellt wird, dass der Aufprall des Flugzeugs bereits erfolgt ist.

Studie des Öko-Instituts e.V.

Im Jahr 2007 hat das Öko-Institut e.V. eine vergleichbare Studie für die Sicherheit deutscher Kernkraftwerke gegen einen vorsätzlich herbeigeführten Flugzeugabsturz durchgeführt (Öko-Institut e.V. 2007a). Die Autoren kommen zum Schluss, dass bei neueren deutschen Anlagen ein hoher Schutz gegenüber dem Aufprall eines zivilen Grossflugzeugs besteht. Demgegenüber ist bei den ältesten deutschen Anlagen, insbesondere der Anlage Biblis A, bereits bei kleinen Flugzeugtypen und hoher Geschwindigkeit oder mittleren Flugzeugtypen und niedriger Geschwindigkeit eine Zerstörung des Reaktorgebäudes nicht auszuschliessen. Im Fall von Biblis A kann es zur Freisetzung grosser Mengen von Radioaktivität kommen. Hauptgrund hierfür sind Mängel im Notstandssystem. Im Fall einer durch einen Flugzeugabsturz oder eine gezielte Attacke ausgelösten gravierenden Freisetzung von radioaktiven Stoffen wären Massnahmen der Evakuierung und Umsiedlung auf Flächen in der Größenordnung von $10'000 \text{ km}^2$ notwendig.

Amerikanische Studien

Die Nuclear Regulatory Commission (NRC) hat die amerikanischen Reaktoren auf deren Sicherheit bei Flugzeugabstürzen überprüft und kam zu dem Ergebnis, dass die Wahrscheinlichkeit einer Gesundheitsgefährdung der Bevölkerung gering ist. In einer weiteren Studie wurden Massnahmen identifiziert, mit denen der Schaden und das Risiko für die Öffentlichkeit bei grossem Feuer bzw. grossen Explosionen reduziert werden kann. In den amerikanischen Kernkraftwerken wurden anschliessend diese Massnahmen eingeführt (Nuclear Regulatory Commission NRC 2007). Eine Quantifizierung des Risikos nicht vorgenommen.

2.4. Proliferation

Auf Initiative der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA wurde 1968 ein Kernwaffen-sperrvertrag (Nuclear Non-proliferation Treaty NPT) erstellt. Der Vertrag hält fest, dass ausser den Staaten, welche schon vor 1968 Kernwaffen besassen – China, Frankreich, Grossbritannien, Russland und die USA – kein Land Kernwaffen erwerben oder entwickeln darf. Ziele des Vertrages sind ein Stopp der weiteren Verbreitung von Kernwaffen, die Sicherheit

¹⁹ Aussage von Georg Schwarz, Stv. Direktor des ENSI, an der Medienkonferenz zur Veröffentlichung des Berichtes der HSK.

für „Nicht-Kernwaffen-Staaten“, die Förderung der internationalen Zusammenarbeit bei der friedlichen Nutzung von Kernenergie und Verhandlungen zur Abrüstung von Kernwaffen. Heute haben 187 Staaten den Vertrag unterzeichnet. Die wichtigsten Staaten, welche den Vertrag nicht unterzeichnet haben, sind Israel, Indien und Pakistan. Bei diesen Ländern muss von einem Besitz von Kernwaffen ausgegangen werden. In weiteren Ländern wie beispielsweise Nordkorea, Irak oder Iran wurden bzw. werden Kernwaffenprogramme vermutet. Durch das Unterzeichnen des Kernwaffensperrvertrages verpflichten sich die Nicht-Nuklearwaffenstaaten, auf Kernwaffen zu verzichten. Als Gegenleistung werden sie von den Nuklearwaffenstaaten bei der zivilen Nutzung der Kernenergie unterstützt. Die fünf offiziellen Nuklearwaffenstaaten verpflichten sich, weder Kernwaffen noch kernwaffenfähiges Material an Nicht-Nuklearwaffenstaaten weiterzugeben. Außerdem verpflichten sie sich, die vollständige Abrüstung ihrer Kernwaffen unter internationaler Aufsicht vertraglich zu vereinbaren. Die Unterzeichnerstaaten müssen ihre Kernanlagen in regelmässigen Abständen durch die IAEA kontrollieren lassen. Dabei überprüft die IAEA, dass kein Nuklearmaterial für nicht zivile Zwecke missbraucht wird. Zusatzprotokolle zum Kernwaffensperrvertrag erlauben der IAEA zudem schärfere und unangemeldete Kontrollen (Labor Spiez 2008).

Die wichtigsten Instrumente zur Vermeidung der Proliferation sind (Hirschberg et al. 2005):

- Eine umfassende Inventarisierung und Kontrolle aller sensiblen Materialien
- Eine Minimierung der Mengen an sensitiven Materialien, die sich im Umlauf befinden
- Eine Reduktion der Transporte sensitiver Materialien.

Umgang mit waffenfähigem Plutonium

Plutonium entsteht bei der Nutzung von Kernenergie als Spaltprodukt und bleibt in den abgebrannten Kernelementen zurück²⁰. Aus den abgebrannten Kernelementen kann in Aufbereitungsanlagen Uran und Plutonium herausgelöst werden. Da es sich um einen chemischen Extraktionsprozess handelt, wird das Plutonium ohne Veränderung seiner Isotopenzusammensetzung abgetrennt. Neben dem Spaltuklid Pu₂₃₉ sind somit weitere, zum Teil nicht thermisch spaltbare Plutoniumisotope, vorrangig Pu₂₄₀, enthalten. Weltweit werden zurzeit Tausende Tonnen Plutonium durch Wiederaufbereitungsanlagen und Produktionsanlagen für MOX (Mixed fuel) gehandhabt. Die Umwandlung von rund 0.1% der jährlich verarbeiteten Menge würde für den Bau einer Atombombe reichen (World Information Service on Energy WISE 2003). In Europa stehen Wiederaufbereitungsanlagen in La Hague (Frankreich) und Sellafield (Grossbritannien). Nach WISE (2003) ist die täglich in diesen Anlagen produzierte Menge an Plutonium ausreichend für den Bau einer Atombombe. Die Menge an Plutonium aus diesen Aufbereitungsanlagen belief sich im Jahr 2003 in Europa auf rund 200 Tonnen (World Information Service on Energy WISE 2003).

²⁰ Abgebrannte Kernelemente enthalten typischerweise Plutoniumisotope mit den folgenden Anteilen: 2-3% Pu₂₃₈, 50 – 60% Pu₂₃₉, 20 – 25% Pu₂₄₀, 9-10% Pu₂₄₁ und 7-8% Pu₂₄₂.

Aufgabe der IAEA ist es, durch Messungen und eine Reihe anderer Massnahmen eine eventuelle Abzweigung von „signifikanten“ Mengen an spaltbarem Material festzustellen und dem Weltsicherheitsrat zu melden. Als „signifikant“ für den Bau einer Atombombe gelten 8 kg Plutonium mit einem Gehalt an Pu₂₃₉ von 94%, 8 kg U₂₃₃ oder 25% angereichertes Uran (Gehalt an U₂₃₅ von 20% oder mehr) (Grawe et al. 2005).

Einen wichtigen inhärenten Schutz gegen die Verwendung von Plutonium aus Leistungsreaktoren als Spaltstoff für Nuklearsprengköpfe stellt der hohe Anteil am Nuklid Pu₂₄₀ dar. Die oben genannten Konzentrationen von 97% bzw. 94% Pu₂₃₉ werden in abgebrannten Brennelementen von Leichtwasserreaktoren nicht erreicht, da sich bei Reaktorzyklen von einem Jahr oder länger typische Konzentrationen des Nuklids Pu₂₄₀ von 23 bis 24 % aufbauen. Pu₂₄₀ ist ähnlich dem U₂₃₈ im Natururan nicht mit thermischen Neutronen spaltbar und verhindert deshalb eine Nutzung des Plutoniums in herkömmlichen Kernwaffen.²¹

Für eine Isotopentrennung mit dem Ziel, das Nuklid Pu₂₄₀ aus dem Reaktorplutonium zu entfernen, existiert keine einsatzfähige Technologie. Dies ist seit der Anfangszeit der militärischen Nutzung der Kernspaltung bekannt, weswegen Anlagen zur Erbrütung waffenfähigen Plutoniums so ausgelegt sind, dass man Brennstoffbestrahlungen über kürzere Zeiträume durchführen kann. In Leichtwasserreaktoren, wie den fünf in der Schweiz betriebenen, aber auch den für Neubauten in Frage kommenden, steht der technologische Ablauf einer kurzzeitigen Brennstoffbestrahlung entgegen.

Kritiker erwidern, dass es auch mit Spaltstoff, der stärker durch nicht thermisch spaltbare Nuklide verunreinigt ist, möglich ist, Kernwaffen zu produzieren, wenngleich nur mit deutlich verminderter Sprengkraft. So kommt Carson Mark (1990) durch Diskussion der neutronenphysikalischen Eigenschaften der im Reaktorplutonium enthaltenen Nuklide zum Schluss, dass es möglich ist, mit Reaktorplutonium die Sprengkraft der Trinity-Bombe²² zu erreichen, ohne dabei auf qualitativ neue Schwierigkeiten im Vergleich zum waffenfähigen Plutonium zu stoßen. Wohl wären die Entwicklung und der Bau mit graduell höheren Schwierigkeiten verbunden, da eine grössere Menge Spaltstoff zur Erreichung der notwendigen hohen Überkritikalität eingesetzt werden müsste. Zudem wäre bei der Produktion des Spaltstoffs mit wesentlich stärker radioaktiven Materialien umzugehen, als dies bei bestimmtem für die militärische Nutzung produziertem Plutonium der Fall sein würde. Eine wesentliche Wirkung

²¹ Ein weiterer störender Einfluss des Isotops Pu₂₄₀ besteht in der erhöhten Rate von Spontanspaltungen, in deren Resultat ein Spaltneutronenfluss gebildet wird, bevor die eigentliche Kettenreaktion in Gang kommt. Das führt zu einer Abschwächung des Leistungs-Zeitverlaufs und damit zu einer erheblichen Sprengkrafteinbusse. Die Verwendung von spaltbarem Material aus Kernbrennstoffen für Waffen mit verminderter Sprengkraft wird von Philipp Hänggi (swissnuclear) als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt, da Aufwand und Ertrag stark im Ungleichgewicht sind. Die Wirkung von Waffen mit verminderter Sprengkraft kann demnach viel günstiger erreicht werden.

²² Der Trinity-Test war die erste jemals durchgeföhrte Kernwaffenexplosion. Der Kernwaffentest wurde am 16. Juli 1945 von den USA im Rahmen des Manhattan-Projekts, des Projektes der USA zur Kernwaffenforschung, durchgeführt. Trinity war der Codename des US-Militärs für diese erste Kernwaffenexplosion und die dabei gezündete Bombe. Dabei wurde eine Sprengkraft von 21 Kilotonnen TNT-Äquivalenten erreicht.

von Waffen, die nur geringe Sprengkraft erreichen, würde zudem in einer weitreichenden Kontamination mit radioaktiven Stoffen bestehen (Carson Mark 1990).

Eine neutronenphysikalische Simulation von Kessler et al. (2008) bestätigt den Sprengkraftverlust durch die Verunreinigung des Reaktorplutoniums mit höheren Plutonium-Isotopen. Sie berechnet für Kernladungen aus Reaktorplutonium eine Sprengkraft zwischen 0.119 und 0.354 kt TNT-Äquivalent. Die Referenzrechnung mit waffenfähigem Plutonium kommt auf 24.2 kt TNT-Äquivalent. Mit Reaktorplutonium wird folglich eine um den Faktor 70 bis 200 geringere Sprengkraft erreicht (Kessler et al. 2008).

Zum Problembereich der Verwendung von Kernbrennstoff zu terroristischen Zwecken gehört ferner die Nutzung von chemischen Sprengstoffen zur Dispersion von an sich nicht zur Kettenreaktion fähigen radioaktiven Stoffen, bei der man auch von „Schmutzigen Bomben“ (dirty bombs) spricht. Hierbei können Radionuklide aus der Kernenergie, aber auch aus anderen Bereichen der Industrie eingesetzt werden. Häufig wird hierauf eingewendet, dass vergleichbare Wirkungen mit wesentlich leichter zugänglichen Mitteln, wie chemischen oder biologischen Waffen, erreicht werden könnten (United States Nuclear Regulatory Commission 2003).

Es ist zu bemerken, dass die Kernmaterialkontrolle, der sich Betreiber von Kernanlagen in Ländern unterziehen müssen, die dem Kernwaffensperrvertrag beigetreten sind, alle Formen von Spaltstoff einschließlich von Brutstoffen, wie Thorium oder abgereichertes Uran umfassen. Die dabei relevanten Mengen und Anreicherungen sind hinsichtlich der unautorisierten Verwendung dieser Stoffe sehr konservativ und restriktiv gefasst. So liegen beispielsweise Grenzwerte für Mengen von spaltbarem Material, oberhalb derer für Aufbewahrung und Transport strenge Sicherungsvorschriften zu beachten sind, weit unter den Mengen, die zur Herstellung einer kritischen Masse erforderlich sind, wie der Internationalen Konvention zum physischen Schutz von Kernmaterial von 1980 zu entnehmen ist (International Atomic Energy Agency IAEA 1980).

Seit Juni 2006 ist in der Schweiz ein 10-jähriges Moratorium in Kraft, welches es den Schweizer Kernkraftwerksbetreibern verbietet, abgebrannte Brennelemente in Wiederaufbereitungsanlagen rezyklieren zu lassen (Art. 106 Abs. 4 Kernenergiegesetz KEG). Durch dieses Moratorium soll die Gefahr der Proliferation durch Schweizer Material im Ausland gemindert werden.

3. Umweltrelevanz der Kernenergie

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Kernenergie auf die Umwelt dargestellt. Dabei werden die Aspekte Kernenergie und Klimawandel, radioaktive Abfälle und geologische Tieflagerung sowie weitere Umweltauswirkungen der Kernenergie näher erläutert.

3.1. Kernenergie und Klimawandel

3.1.1. CO₂-Emissionen

Bei der Diskussion der Umweltrelevanz von Energieträgern sind die Emissionen von CO₂ inzwischen einer der wichtigsten Faktoren. In zahlreichen Studien wurden die CO₂-Emissionen der Kernenergie berechnet. Sovacool (2008) fasst die Ergebnisse von 103 Lebenszyklusstudien zusammen.²³ Die Emissionen liegen in diesen Studien zwischen 1.36 g CO₂e/kWh und 288.25 g CO₂e/kWh. Die hohe Streuung resultiert aufgrund verschiedener Modellannahmen. Insbesondere beinhaltet die Auswahl eine Vielzahl von Ländern, in denen die errechneten Emissionen schon deswegen variieren, weil verschiedene Anreicherungsverfahren oder ganz einfach ein unterschiedlicher Strommix eingesetzt wird. Bei einer Be trachtung der Schweizer Kraftwerke ist daher insbesondere der obere Grenzwert deutlich überzogen.

Von den 103 Studien hat Sovacool (2008) 19 ausgewählt, welche im Detail miteinander verglichen wurden (Tabelle 4). Die Entstehung von Emissionen werden dabei in fünf Bereiche aufgeteilt: Brennstoffbeschaffung (Abbau in der Mine, Verarbeitung zu „yellow cake“ und Anreicherung), Konstruktion der Kernkraftwerke, Betrieb der Werke,endlagerung der Abfälle und Stilllegung der Werke bzw. Minen. Die übrigen Studien wurden aufgrund ihres Alters (älter als 10 Jahre), ihrer Zugänglichkeit oder ihrer inkonsistenten Methodik ausgeschlossen.

Die von Sovacool (2008) berücksichtigten Studien zeigen eine Streuung von 3 CO₂e/kWh bis fast 140 CO₂e/kWh. Auch in dieser bereits eingeengten Spannbreite sind die Ursachen der unterschiedlichen Ergebnisse in den differierenden Rahmenbedingungen der Modellrechnungen zu sehen. Deutlich wird die Wirkung der Länderwahl beispielsweise bei einem Vergleich der Studien von Dones et al. Die Autoren errechnen für die Schweiz 8.5g CO₂e/kWh (Dones et al. 2005), die USA 10.95g CO₂e/kWh (Dones et al. 2003) und für China 44.5g CO₂e/kWh (Dones et al. 2004b).

²³ Gemäss Stefan Hirschberg (Laboratory for Energy Systems Analysis, PSI Villigen) sind die Ergebnisse verschiedener Studien zwar leicht zu sichten, die Differenzen aber schwierig zu interpretieren sind. Damit wird auf die unterschiedliche Qualität der Studienergebnisse hingewiesen.

Tabelle 4 CO₂-Emissions-Statistik ausgewählter Studien nach Sovacool (2008) in g CO₂e/kWh.

| Studie | Brenn-stoffbe-schaffung | Konstruk-tion | Betrieb | End-lagerung | Still-legung | Total |
|---------------------------------|-------------------------|---------------|---------|--------------|--------------|-------|
| Andseta et al. (1998) | 0.68 | 2.22 | 11.9 | - | 0.61 | 15.41 |
| Barnaby and Kemp (2007) | 56 | 11.5 | - | - | 35.5 | 103 |
| Dones et al. (2005) | 6.85 | 1.2 | - | 0.45 | - | 8.5 |
| Dones et al. (2003) | 9 | 1.15 | - | 0.8 | - | 10.95 |
| Dones et al. (2004b) | 42.4 | 1.2 | - | 0.9 | - | 44.5 |
| European Commission (1998) | - | 11.5 | - | - | - | 11.5 |
| Fritzsche and Lim (2006) | 20 | 11 | - | 33 | - | 64 |
| Fthenakis and Kim (2007) | 16.85 | 9.1 | 5.41 | 2.8 | 1.3 | 35.46 |
| Hondo (2005) | 17 | 2.8 | 3.2 | 0.8 | 0.4 | 24.2 |
| IEA (2002) | 4.86 | 2.55 | - | 4.86 | 0.17 | 12.44 |
| ISA (2006) | 31.5 | 7.3 | 18.55 | 11.95 | 0.7 | 70 |
| ISA (2006) | 29.25 | 6.8 | 17.2 | 11.1 | 0.65 | 65 |
| Rashad and Hammad (2000) | 23.5 | 2 | 0.4 | 0.5 | - | 26.4 |
| Storm van Leeuwen et al. (2005) | 36 | 23.5 | - | 17 | 34.5 | 111 |
| Storm van Leeuwen et al. (2006) | 39 | 24.5 | - | 17 | 36 | 116.5 |
| Storm van Leeuwen et al. (2007) | 22.27 | 20 | 24.4 | 28.13 | 44.3 | 139.1 |
| Tokimatsu et al. (2006) | 61.95 | 13.65 | 21 | 7.35 | 1.05 | 105 |
| Vorspools et al. (2000) | - | 2 | - | 1 | - | 3 |
| White and Kulcinski (2000) | 9.5 | 1.9 | 2.2 | 1.4 | 0.01 | 15.01 |

Gemäss Dones et al. (2004a) ist ein Schlüsselfaktor für die der gesamten nuklearen Energiekette zugeordneten Emissionen, wo und mit welchem Verfahren Uran angereichert wird. Für die Kernkraftwerke der Schweiz wird die Urananreicherung meist in Frankreich vorgenommen, in der auf Strom mit geringen CO₂-Emissionen zurückgegriffen werden kann. Mit dem verstärkten Einsatz von Zentrifugen, welche in der Regel tiefere Energieintensitäten als Diffusionszellen aufweisen, und dem Übergang zur Ultrazentrifuge als Anreicherungstechnologie ist zukünftig mit einer weiter abnehmenden Energieintensität und daher mit geringeren Emissionen zu rechnen (World Nuclear Association WNA 2009). Nach den im Faktenblatt der WNA enthaltenen Angaben basiert heute etwa 65% der weltweiten Anreicherungskapazität auf Ultrazentrifugen. Für 2017 wird ein Anteil von 96% an der Bedarfsdeckung prognostiziert, wobei die restlichen 4% aus der Umwandlung hoch angereicherten Waffenurans gedeckt werden wird. Gasdiffusionsanlagen werden nach den Vorhersagen der WNA dann nicht mehr in Betrieb sein.

Der Uranabbau trägt nach Dones et al. (2004a) zurzeit nur gering zu den totalen Treibhausgasemissionen bei. Allerdings wird der Erzgehalt in konventionell abgebauten Uranminen kontinuierlich abnehmen, was den Einfluss auf die Emissionen wahrscheinlich signifikant erhöht (Dones et al. 2004a).

Die Studien von Storm van Leeuwen liefern Ergebnisse, die am oberen Ende der Bandbreite liegen. Die relativ schlechte CO₂-Bilanz resultiert unter anderem, weil bezüglich des Ener-

giebedarfs beim Uranabbau alte Werte (aus den siebziger Jahren) im Berechnungsmodell integriert wurden und der Einfluss des Abraums nicht berücksichtigt wurde (Prasser 2008).

Kürzlich haben die Nordostschweizerischen Kraftwerke (NOK) eine Studie herausgegeben, in welcher für das KKW Beznau Treibhausgasemissionen in der Höhe von 3.04 g CO₂e/kWh_{el} berechnet wurden.²⁴ Dabei wurde von einem Uranmix aus konventionellem Brennstoff, Mischoxidbrennstoff und wieder aufbereitetem Brennstoff (zum Teil aus waffenfähigem Uran) ausgegangen. Die Prozesse der Herstellung von abgebranntem Brennstoff, abgereichertem Uran und angereichertem Uran aus der Abrüstung von Kernwaffen wurden in die Lebenszyklusbetrachtung nicht einbezogen (NOK 2008).

Vergleich zu anderen Energieträgern

Dones et al. (2004a) und Bauer et al. (2008) vergleichen die Treibhausgasemissionen verschiedener Energiesysteme mit Hilfe umfassender Ökobilanzdaten. Bauer et al. stellt dabei die Emissionen im Jahr 2005 den voraussichtlichen Emissionen im Jahr 2030 gegenüber. Die Tabelle 5 fasst die Resultate von Bauer et al. zusammen.

Tabelle 5 Treibhausgasemissionen pro kWh für verschiedene Stromerzeugungswege (Bauer et al. 2008)

| | Jahr 2005 | Jahr 2030 |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | [g CO ₂ e/kWh] | [g CO ₂ e/kWh] |
| Steinkohle | 912 | 753 |
| Erdgas ¹ | 634 | 540 |
| Synthetisches Erdgas | 123 | 95 |
| Biogas ² | 77 | 37 |
| Photovoltaik ³ | 62 | 30 |
| Geothermie | k.A. | 27 |
| Windkraft, onshore CH | 17 | 16 |
| Windkraft, offshore DK | 10 | 10 |
| Kernenergie | 6 | 4 |
| Speicherwasserkraftwerk | 4 | 4 |
| Laufwasserkraftwerk | 3 | 3 |

¹ Erdgas Wärme-Kraft-Kopplung

² Multikristallin Silizium Zellen auf Dächern

³ Biogas Wärme-Kraft-Kopplung

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei praktisch allen Technologien bis zum Jahr 2030 Verminderungen der CO₂-Emissionen pro erzeugte Kilowattstunde durch verbesserte Technologien möglich sind.

²⁴ Der niedrige Wert kommt dadurch zustande, dass die ursprünglichen CO₂-Emissionen, die bei der Herstellung des Waffen-Urans aufgetreten sind, nicht angerechnet werden.

Mit 3 bzw. 4g CO₂e/kWh weist die Wasserkraft die geringsten Emissionen auf. Die fossilen Energieträger (Steinkohle und Erdgas) haben im Vergleich zu den Alternativen deutlich höhere CO₂-Emissionen.

Das Öko-Institut e.V. (2007b) hat die Treibhausgasemissionen verschiedener Stromerzeugungstechnologien für Deutschland verglichen. Die Resultate sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6 Treibhausgasemissionen pro kWh verschiedener Stromerzeugungstechnologien (Öko-Institut e.V. 2007b)

| THG-Emissionen | |
|--------------------------------|--|
| | [g CO ₂ e/kWh _{el}] |
| Braunkohle | 1153 |
| Steinkohle | 949 |
| Erdgas | 428 |
| Photovoltaik (multikristallin) | 101 |
| Erdgas-Blockheizkraftwerk | 49 |
| Wasserkraft | 40 |
| Kernenergie (Uran Import-Mix) | 32 |
| Photovoltaik (Import Spanien) | 27 |
| Windkraft onshore | 24 |
| Windkraft offshore | 23 |
| Biogas-Blockheizkraftwerk | -409 |

Mit -409 g CO₂e/kWh_{el} schneidet das Biogas-Blockheizkraftwerk am besten ab. Die rechnerisch negativen Emissionen ergeben sich, weil die Gutschrift für die in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Wärme grösser ist als die Gesamtemissionen des Kraftwerkes, das CO₂-neutrales Biogas einsetzt. Im Unterschied zur Studie von Dones (2004a) schneidet die Windkraft etwas besser und die Wasserkraft etwas schlechter als die Kernenergie ab.

3.1.2. Klimarelevanz der Kernenergie

Die grosse Bandbreite der CO₂-Emissionen bei der Kernenergienutzung, die aus der Beobachtung mehrerer wissenschaftlicher Studien resultiert, führt nicht zu grundsätzlichen Problemen bei der Beurteilung der Klimarelevanz von Kernenergie. Zur signifikanten Reduktion der Problematik des Klimawandels muss nämlich der Einsatz fossiler Energieträger zunehmend verzichtet bzw. deren Emissionen mit neuen Technologien deutlich reduziert werden. Eine Reduktion des Einsatzes fossiler Energieträger kann neben der Steigerung der Energieeffizienz prinzipiell mit allen Alternativen, Kernenergie sowie erneuerbare Energien, gelingen.

Die Kernenergie machte 2007 rund 10% des Endenergieverbrauchs der Schweiz aus und leistete einen Beitrag von 40% an die Stromproduktion (Bundesamt für Energie BFE 2008a und 2008b). Im kernkraftwerkfreien Österreich beispielsweise wird rund ein Drittel des

Stroms aus Kohle, Erdöl und Erdgas erzeugt, in Deutschland rund 60%. In Dänemark werden mehr als zwei Drittel des Stroms fossil erzeugt, in Italien über 80%, und in Polen gar 98%. Anders als andere europäische Länder verfügt die Schweiz heute über einen klimafreundlichen Strommix (Nuklearforum Schweiz 2008a).²⁵

Zur Beurteilung der Klimarelevanz der Kernenergie stellt sich die Frage, inwieweit die Kernenergie auch in der Praxis, also insbesondere unter Berücksichtigung der technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen, einen wichtigen Beitrag zur Verminderung des Klimawandels leisten kann. Das Potenzial der Kernenergie muss im Vergleich mit den erneuerbaren Energieträgern beurteilt werden.

Das Öko-Institut e.V. hat 2007 die Treibhausgas-Vermeidungskosten für nukleare, fossile und erneuerbare Strombereitstellung quantifiziert. Nach Berechnungen der Autoren liegen die Vermeidungskosten von Kernenergie zwischen 15 und 30 Euro pro Tonne vermiedener CO₂-Äquivalente. Die Vermeidungskosten für mit Biogas betriebene Blockheizkraftwerke und für Stromeffizienz-Technologien liegen deutlich unter denen der Kernenergie, für Offshore-Windkraftanlagen sind sie in etwa im selben Bereich. Die Vermeidungskosten von Wasserkraftwerken, Onshore-Windkraftanlagen, Erdgas-Blockheizkraftwerken und Solarstrom betragen rund das Doppelte bis das Dreifache im Vergleich zur Kernenergie.

Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Massnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionen wurde auch von McKinsey & Company (2009) vorgelegt. Das jährliche Minderungspotential wird zu 2 Gt CO₂-Äquivalent bei Minderungskosten von ca. 10 EUR/t CO₂-Äquivalent angegeben. Damit hat die Kernenergie als Einzeltechnologie in dem dargestellten Kostenbereich bis 60 EUR/t CO₂-Äquivalent das grösste Einsparungspotential und liegt bei den Massnahmen zur CO₂-Senkung bei der Energieerzeugung mit den Minderungskosten im unteren Bereich (siehe Anhang 7).

Die Kernenergie kann das Klimaproblem insgesamt nicht lösen, sie kann jedoch einen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen leisten. Die Kernenergie kann in der Schweiz zu einer CO₂-Minderung von 0.3 Prozentpunkten pro Jahr beitragen (ETH-Globe 2007).²⁶

Die vorhandenen Potentiale sind insbesondere auch vor dem Hintergrund der dadurch ausgelösten Folgewirkungen zu beurteilen: Die Produktion von Grundlaststrom mit sehr hohen

²⁵ Gemäss Stefan Hirschberg ist deswegen auch die Berechnung der Vermeidungskosten in der Schweiz eine künstliche Diskussion, da die Möglichkeit zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in der schweizerischen Elektrizitätserzeugung nicht besteht. Eine weitgehend CO₂-freie Elektrizitätserzeugung wie die Kernenergie kann jedoch einen substanziellem Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasen leisten, weil Öl und Gas substituiert werden können (z.B. durch Wärmepumpen). Es wird im Zusammenhang mit einer hypothetischen Vermeidungskostenkurve auf die Bestrebungen des Energietrialogs zwischen Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft verwiesen.

²⁶ Durch Effizienzsteigerungen kann gemäss diesen Berechnungen hingegen ein jährliches Reduktionspotential von 1-2 Prozentpunkten erzielt werden.

Investitionskosten in Kernkraftwerken konkurrenzieren sowohl die Förderung von Stromeffizienz wie auch den Bau von ebenfalls hochinvestiven erneuerbaren Energiesystemen.²⁷ Einerseits kann der gleiche Franken nur einmal investiert werden, andererseits muss der Überschussstrom zu Offpeak-Zeiten Abnehmer finden, was zu neuen Stromanwendungen führt, die zu Vollkosten kein Marktpotential hätten (beispielsweise Elektroheizungen). Somit findet real keine Reduktion der Treibhausgasemissionen statt, da emissionsarme Technologien behindert bzw. verdrängt werden.²⁸ Gemäss Studien des Rocky Mountain Institutes ist ein Franken investiert in Energieeffizienzmassnahmen 3 bis 10-mal klimawirksamer als ein Franken investiert in ein neues Kernkraftwerk (Amory B. Lovins et al. 2008).

Gemäss der Energiestrategie der ETH kommen in den nächsten Jahrzehnten verschiedene Primärenergieträger gleichermassen zum Zuge (fossile mit CO₂-Abspaltung und – Sequestrierung, Wasser, Kernkraft, Wind, Sonne). Ab der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts wird dann die Photovoltaik weltweit eine besonders bedeutende Rolle übernehmen. Langfristig besitzt einzig die solar erzeugte Elektrizität das Mengenpotenzial, um den grössten Anteil des Energiebedarfs zu liefern. Dazu sind allerdings enorme technologische Fortschritte und massive Kostenreduktionen erforderlich. Auf jeden Fall kann nur der Wechsel zu kohlenstoffarmen, beziehungsweise –freien Primärenergieträgern den CO₂-Ausstoss wirksam senken (Energy Science Center ESC 2008). Es sei darauf verwiesen, dass die genannte Strategie des ESC die gegenwärtige Form der Kernenergie als eine notwendige Übergangstechnologie sieht. Die nukleare Stromerzeugung könne auch langfristig einen Anteil an die Versorgung leisten, wenn sie den Nachweis zur inhärenten Sicherheit, zur Minimierung der radioaktiven Abfälle und des Proliferationsrisikos bei deutlich besserer Ausnützung des Brennstoffs erbringen kann. Die Autoren der Studie prognostizieren, dass Kernkraftwerke gemeinsam mit fossilen Kraftwerken mit integrierter CO₂-Sequestrierung auch in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts eine unterstützende Funktion bei der CO₂-armen Energieerzeugung spielen werden.

3.2. Radioaktiver Abfall und geologische Tiefenlagerung

3.2.1. Anfallende Mengen radioaktiver Abfälle

Die Nagra führt ein zentrales Inventar der radioaktiven Abfälle und Materialien der Schweiz. Dieses umfasst alle Abfallgebinde, die im Zwischenlager in Würenlingen (ZWILAG), im Bundeszwischenlager (BZL) in Würenlingen und bei den Kernkraftwerken eingelagert sind.

²⁷ Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass die Investitionskosten in Relation zur produzierten Strommenge relativ tief liegen. Nach Gantner et al. (2001) werden die spezifischen Investitionskosten für die Installation von einem Kilowatt Leistung – selbst bei Berücksichtigung der Kostendegression bei den Erneuerbaren Energien bis 2020 – nur von der Windkraft und der Verstromung von Holz unterboten, wobei Holz lediglich geringe Potentiale aufweist. Berücksichtigt man die begrenzte Anzahl der Vollaststunden beim Wind so schneidet die Kernenergie vom Investitionsvolumen pro produzierter Kilowattstunde her am günstigsten ab. Die Feststellung, die Kernkraft benötige hohe spezifische Investitionsvolumen, gilt nur im Vergleich mit fossil gefeuerten Kraftwerken.

²⁸ Aussage von Patrick Hofstetter, Leiter Klimapolitik WWF Schweiz.

Es werden hochaktive Abfälle (HAA) und schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) unterschieden. Ein Bestandteil der mittelaktiven Abfälle sind die so genannten erhöht alphatoxischen Abfälle (ATA), welche einen erhöhten Gehalt an bestimmten radiotoxischen Nukliden (Alphastrahler) aufweisen. Für die geologische Tiefenlagerung werden nach Prognosen der Nagra bis Mitte dieses Jahrhunderts rund 100'000 m³ endlagergerecht verpackte radioaktive Abfälle erwartet. Die Tabelle 7 zeigt eine Übersicht der Volumina hochaktiver, schwach- und mittelaktiver und alphatoxischer radioaktiver Abfälle der Schweiz, gegliedert nach ihrer Herkunft. Zusätzlich gibt sie die Radioaktivität der einzelnen Kategorien an. Es zeigt sich, dass die HAA volumenmässig zwar nur 1.9% der Gesamtabfälle ausmachen, aber für 98.3% der Radioaktivität verantwortlich sind.

Tabelle 7 Volumina der hochaktiven, schwach- und mittelaktiven und alphatoxischen Abfälle der Schweiz gegliedert nach Herkunft und Radioaktivität (Stand: Mai 2008)(Nagra 2008).

| Herkunft der Abfälle | HAA (m ³) | | SMA (m ³) | | ATA (m ³) | |
|--|---|--------------|---|---------------|---|--------------|
| | un-verpackt | verpackt | kondi-tioniert | verpackt | kondi-tioniert | verpackt |
| Abfälle aus der Wiederaufbereitung | 115 | 730 | | | 200 | 1 320 |
| Verbrauchte Brennelemente | 1 135 | 6 595 | | | | |
| Betriebsabfälle | | | 7 260 | 24 400 | 10 | 40 |
| Reaktorabfälle | | | 340 | 1 560 | | |
| Stilllegungsabfälle | | | 28 265 | 28 265 | | |
| Betriebsabfälle ZWILAG | | | 45 | 140 | | |
| Stilllegungsabfälle ZWILAG | | | 620 | 655 | | |
| Medizinische Abfälle und Betriebsabfälle PSI | | | 4 270 | 9 170 | 325 | 920 |
| Stilllegungsabfälle PSI | | | 23 000 | 23 000 | | |
| Abfälle aus der späteren Anlage zur Verpackung hochaktiver Abfälle | | | 2 220 | 2 220 | | |
| Gesamtvolume aller Abfälle | 1 250 | 7 325 | 66 020 | 89 410 | 535 | 2 280 |
| Anteil | 1.9% | 7.4% | 97.3% | 90.3% | 0.8% | 2.3% |
| Aktivität der Abfälle | 3.0×10^{19} Bq | | 4.7×10^{17} Bq | | 3.4×10^{16} Bq | |
| Anteil | 98.3% | | 1.6% | | 0.1% | |

Abgebrannte Brennelemente, die einen wesentlichen Teil der HAA ausmachen, werden beim jährlichen Brennelementwechsel der Kernkraftwerke ersetzt. Die abgebrannten Brenn-elemente gelangen zuerst ins Brennelementlager des Kernkraftwerks. Dort kühlen sie für einige Jahre ab und werden anschliessend in speziellen Transport- und Lagerbehältern unter behördlicher Aufsicht in Zwischenlager transportiert.

Im Kernenergiegesetz ist vorgeschrieben, dass die weiter abgekühlten Brennelemente in einem geologischen Tiefenlager endgelagert werden müssen. Die Endlagerung in geologischen Formationen gilt nach dem heutigen Wissensstand international als das am besten geeignete Konzept. Die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) hat seit 1972 zusammen mit zahlreichen in- und ausländischen Experten und Institutionen mögliche Endlagerkonzepte entwickelt und verschiedene Gesteine untersucht (siehe Kapitel 3.2. bis 3.4.)

3.2.2. Entsorgungsnachweis für radioaktive Abfälle

Das am 1. Februar 2005 in Kraft gesetzte Kernenergiegesetz (KEG) fordert in Artikel 13 den Nachweis für die Entsorgung der aus einer Kernanlage anfallenden radioaktiven Abfälle als Voraussetzung für die Erteilung der Rahmenbewilligung. In den Übergangsbestimmungen (Artikel 106) wird zudem gefordert, dass die Eigentümer der bestehenden Kernkraftwerke den Entsorgungsnachweis innert zehn Jahren erbringen müssen, soweit der Bundesrat diesen Nachweis nicht bereits als erfüllt beurteilt hat.

Zur Erfüllung dieser gesetzlichen Auflage hat die Nagra im Dezember 2002 das Projekt Opalinuston eingereicht. Mit dem Projekt wird eine geologische Tiefenlagerung der hochradioaktiven Abfälle im Opalinuston des Zürcher Weinlands geprüft. Ziel des Projekts ist der Nachweis, dass die sichere und dauerhafte Entsorgung von abgebrannten Brennelementen, verglasten hochaktiven Abfällen und langlebigen mittelaktiven Abfällen in einem geologischen Tiefenlager möglich ist. Der Entsorgungsnachweis beinhaltet einen Sicherheitsnachweis (Langzeitsicherheit des Tiefenlagers), einen Standortnachweis (Vorhandensein eines genügend grossen Wirtgestein-Körpers mit den im Sicherheitsnachweis festgehaltenen Eigenschaften) und einen Machbarkeitsnachweis (Möglichkeit des Baus, des Betriebs und der langfristigen Verschliessbarkeit eines geologischen Tiefenlagers im gewählten Wirtgestein) (Nagra 2002).

Die HSK und die Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) haben den von der Nagra eingereichten Entsorgungsnachweis eingehend geprüft und kommen zum Schluss, dass der gesetzlich geforderte Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle erbracht worden ist. Am 28. Juni 2006 hat der Bundesrat den Entsorgungsnachweis für hochaktive Abfälle genehmigt²⁹.

²⁹ Der Entsorgungsnachweis für schwach- und mittelaktive Abfälle hat der Bundesrat bereits 1998 gutgeheissen. Die Nagra hat diesen Nachweis gestützt auf ein Lager im Mergel des Oberbauenstocks im Kanton Uri erbracht.

Kritik am Entsorgungsnachweis der Nagra

Die Schweizerische Energie-Stiftung (SES) hat Ende 2005 Stellung zum Entsorgungsnachweis der Nagra bezogen und hält fest: „Die Problematik der ungewöhnlich grossen Zeiträume (mehrere hunderttausend Jahre) ist in den vorliegenden Studien nicht abschliessend durchdacht worden. Wie sich die Menschen, die Gesteine, das Lagergut und die Natur insgesamt in diesen Zeiträumen verändern werden, kann nicht abschliessend vorausgesagt werden. Wichtig ist daher die Fähigkeit, alle Teile des Konzeptes jederzeit überdenken und allenfalls an neue Gegebenheiten und Erkenntnisse anpassen zu können. Dies bedingt eine Abkehr vom Konzept der „Endlagerung“ hin zu einem Konzept der „umfassenden kontrollierten geologischen Langzeitlagerung“. Das Lager muss demnach mit entsprechenden Massnahmen so lange beobachtet werden können, bis die eingelagerten radioaktiven Abfälle nur noch so schwach sind, dass sie unter den Grenzwerten der heutigen Strahlenschutzverordnung fallen.“ Zweifel an dem Lagerüberwachungskonzept der Nagra hegt nicht nur die SES.³⁰

3.2.3. Abschätzung der „radioaktiven Gefahr“ der Abfälle

Ein nützliches Mass zur Messung der potentiellen Gefahr von radioaktivem Material ist der Radiotoxizitätsindex (RTI). Im Entsorgungsnachweis der Nagra (2002) wird der RTI definiert als die hypothetische Dosis resultierend aus der Aufnahme (F_j = Aufnahmekoeffizient [Sv Bq⁻¹]) der Aktivität A_j [Bq] zum Zeitpunkt t, dividiert durch 10⁻⁴ Sv³¹:

$$RTI(t) = (\sum A_j(t) * F_j) / (10^{-4} \text{ Sv})$$

Die Abbildung 3 zeigt den RTI einer Tonne abgebrannter Brennelemente und des totalen Radionuklidinventars als Funktion der Zeit (Nagra 2002). Nach rund einer Million Jahren ist die Radiotoxizität der radioaktiven Abfälle unter diejenige des dem Endlagerungsvolumen entsprechenden Volumens an natürlichem Uran gefallen. Daraus kann interpretiert werden, dass die „radioaktive Gefahr“ nach rund einer Million Jahren auf ein „akzeptables“ Niveau gesunken sein wird. Dementsprechend muss gewährleistet werden, dass das Endlagersystem für diesen Zeitraum eine effektive Isolation der radioaktiven Abfälle vor der Umwelt leistet.

³⁰ Walter Wildi kritisiert die Umsetzung des Konzepts der Überwachung des Geologischen Tiefenlagers mit Hilfe eines Pilotlagers (gemäss KEG) durch die Nagra. Das Gesetz schreibt eine hydrogeologische Trennung zwischen Hauptlager und Tiefenlager vor; die Nagra legt die beiden Lager im selben Stollensystem an. Eine zweite Kritik betrifft die Abfallkonditionierung: Der hohe Anteil an organischen Stoffen in den heute konditionierten schwach- und mittelaktiven Abfällen kann zu starker Gasbildung durch mikrobielle Zersetzung und damit zu einer Beschädigung des Wirtgestein führen. Gas kann auch im Lager der hochaktiven Abfälle beim Kontakt zwischen Wasser und Stahlbehältern entstehen. Die beiden Abfallarten müssen deshalb anders konditioniert werden.

³¹ Der Grenzwert für die jährliche Individualdosis liegt in der Schweiz gemäss der HSK-Richtlinie HSK-R-21 bei 0.1mSv/a (Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK 1993c).

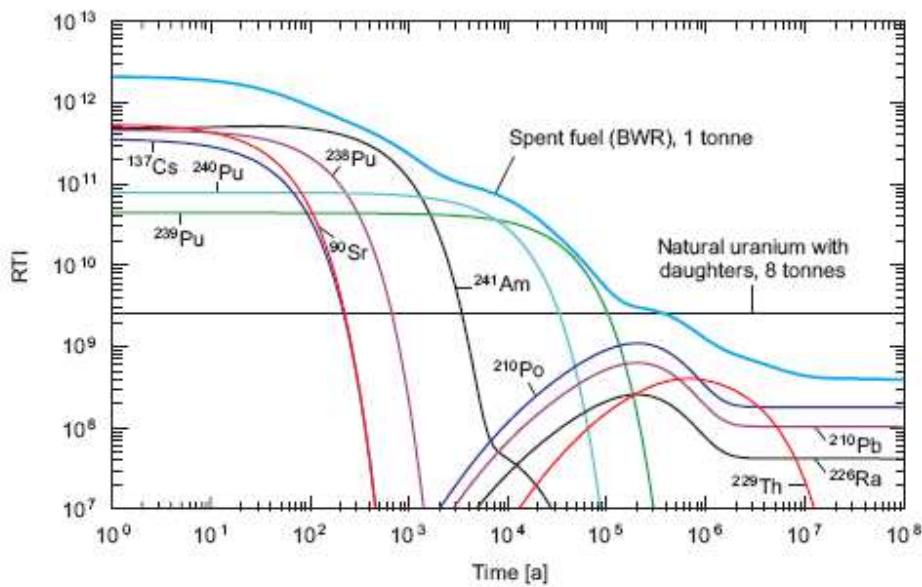


Abbildung 3 Radiotoxizitätsindex einer Tonne abgebrannter Brennelemente (spent fuel BWR) und des totalen Radionuklidinventars (Nagra 2002).

Abbildung 4 zeigt Dosisberechnungen für radioaktiven Abfall im geologischen Tiefenlager für abgebrannte Brennelemente, hochaktive radioaktive Abfälle und langlebige mittelaktive Abfälle. Gemäss den Berechnungen und probabilistischen Abschätzungen der Nagra gewährleistet die geologische Tiefenlagerung im Opalinuston zu jeder Zeit die Einhaltung des gesetzlich festgelegten Expositionsgrenzwertes von 0.1 mSv/a (Nagra 2002).

Basierend auf diesen Überlegungen ist der Entsorgungsnachweis der Nagra darauf ausgelegt, dass die radioaktiven Abfälle für eine Million Jahre sicher gelagert werden können.

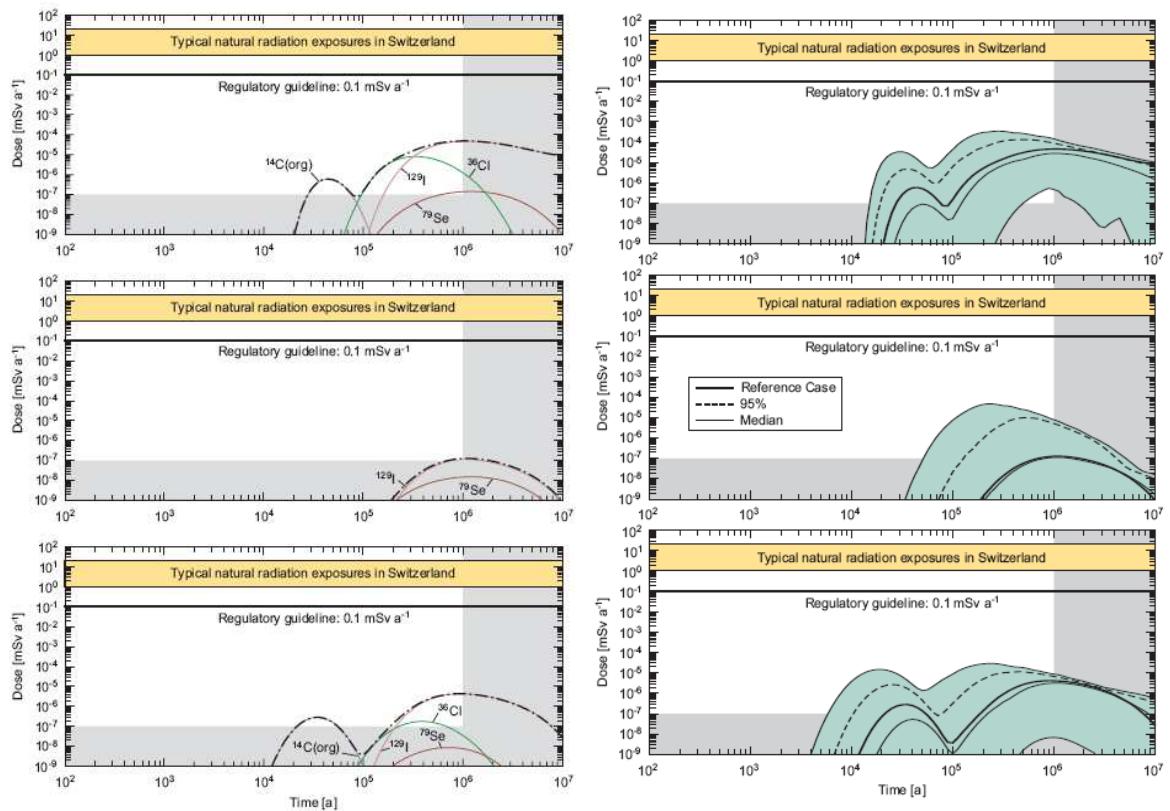


Abbildung 4 Dosisberechnungen für radioaktive Abfälle im geologischen Tiefenlager (oben: abgebrannte Brennelemente, Mitte: hochaktive radioaktive Abfälle, unten: langlebige mittelaktive Abfälle) in Funktion der Zeit (Nagra 2002)

Zusätzlich zum Referenzszenario der Dosisberechnungen für radioaktive Abfälle im geologischen Tiefenlager (Abbildung 4) hat die Nagra verschiedene Szenarien bzw. Störungen des Tiefenlagers untersucht (Nagra 2002). Die Szenarien können dabei in die folgenden Bereiche eingeteilt werden: Entweichung von flüchtigem ¹⁴C entlang von Gasdurchlässen, Entweichung von Radionukliden durch menschliche Aktivitäten, sogenannte „Was ist wenn?“-Fälle, Design- und Systemoptionen und Unsicherheiten bei der Abbildung der Biosphäre. Gemäss den Berechnungen der Nagra liegt die Dosis für alle Szenarien unter dem gesetzlich festgelegten Grenzwert von 0.1 mSv/a (Abbildung 5). Eine detaillierte Auflistung der verschiedenen Szenarien mit den entsprechenden Dosiswerten findet sich in Anhang 8.

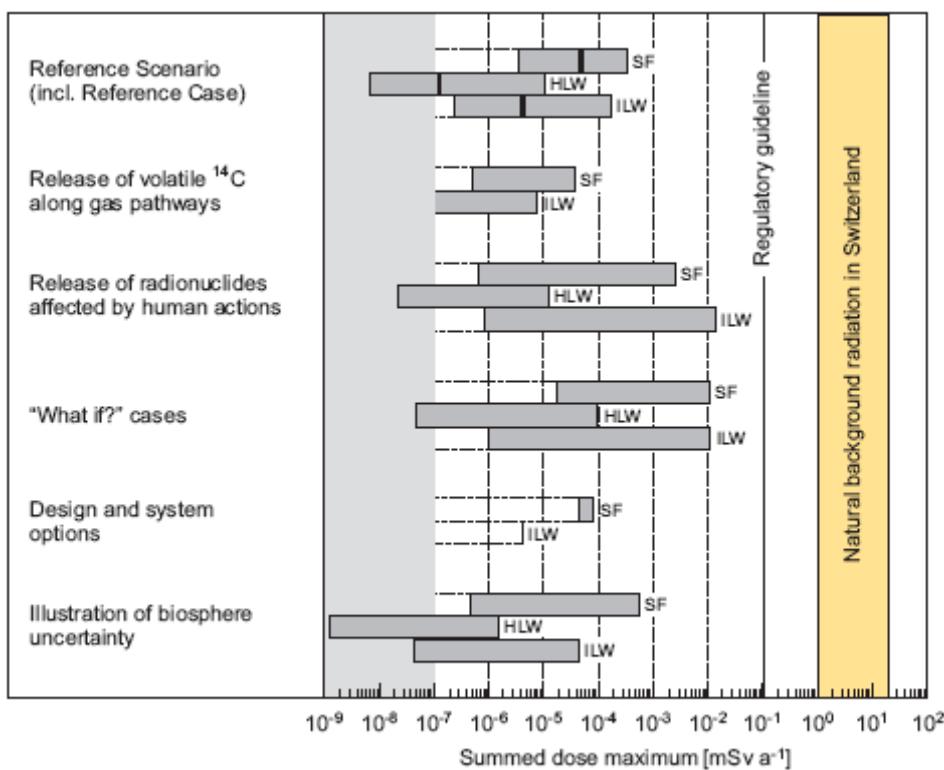


Abbildung 5 Bereich der Maximaldosis für abgebrannte Brennelemente (SF), verglaste hochaktive radioaktive Abfälle (HLW) und langlebige mittelaktive Abfälle für verschiedene Szenarien (Nagra 2002).

3.2.4. Standortsuche und Langzeitwissensübertragung

Die Auswahl eines geeigneten Standortes für die geologische Tiefenlagerung erweist sich nicht nur in der Schweiz, sondern in der ganzen Welt als äusserst schwierig. Aktuell gibt es weltweit nur wenige Standorte, an denen radioaktive Abfälle dauerhaft gelagert werden. In der Schweiz besteht Konsens darüber, dass der radioaktive Abfall nicht ins Ausland exportiert werden darf. Folglich muss in der Schweiz selbst ein geeigneter Standort gefunden und festgelegt werden.

Anfang November 2008 hat das Bundesamt für Energie die Standortregionen bekannt gegeben, die gemäss der Nagra aufgrund ihrer Geologie für den Bau von geologischen Tiefenlagern für radioaktive Abfälle grundsätzlich in Frage kommen. Es handelt sich um drei Standortregionen für hochradioaktive sowie sechs Standortregionen für schwach- und mitelradioaktive Abfälle (Bundesamt für Energie 2008d):

Geologisch geeignete Standortregionen für Lager für hochradioaktive Abfälle:

- Zürcher Weinland (Kantone ZH und TG)
- Nördlich Lägeren (Kantone ZH und AG)
- Bözberg (Kanton AG)

Geologisch geeignete Standortregionen für Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle:

- Südranden (Kanton SH)
- Zürcher Weinland (Kantone ZH und TG)
- Nördlich Lägeren (Kantone ZH und AG)
- Bözberg (Kanton AG)
- Jura-Südfuss (Kantone SO und AG)
- Wellenberg (Kantone NW und OW)

Im laufenden Auswahlverfahren werden diese Standortregionen eingehend geprüft und in Zusammenarbeit mit den betroffenen Regionen weiter eingeengt. Definitive Standortentscheide werden in rund 10 Jahren erwartet.

Der Vorschlag der Nagra ist kein Entscheid für einen oder mehrere Standorte, bildet aber die Grundlage für die weiteren Prüfungen und Untersuchungen, zu denen die Kantone, Gemeinden, Nachbarstaaten sowie die Bundesbehörden Stellung nehmen können (Bundesamt für Energie 2008d). Alle Regionen haben in den Medien umgehend ihre grundsätzliche Skepsis gegen ein geologisches Tiefenlager auf ihrem Gebiet mitgeteilt.³²

Neben der Frage, wie die radioaktiven Abfälle langfristig sicher gelagert werden können, stellt sich auch die Frage, wie ein geologisches Tiefenlager gekennzeichnet werden kann, damit es zu keiner Zeit Menschen und nachmenschliche Lebewesen gefährdet. In Artikel 40 Absatz 7 des Kernenergiegesetzes ist vorgeschrieben, dass der Bundesrat die dauerhafte Markierung des Endlagers vorschreibt. Zudem besagt Artikel 40 Absatz 6, dass der Bundesrat dafür sorgen soll, dass die Informationen über das Lager, die eingelagerten Abfälle und den Schutzbereich aufbewahrt werden und die Kenntnisse darüber erhalten bleiben. Zurzeit wird im Auftrag des BFE eine Studie zu Markierungsmöglichkeiten erarbeitet.

Zu der Frage der Langzeitwissensübertragung gibt es noch keine endgültige Lösung, in der Literatur finden sich aber verschiedene Ideen. Die Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in der Wüste von New Mexiko (USA) ist das weltweit erste für langlebige radioaktive Abfälle vorgesehene Endlager. Es soll in rund 25 Jahren in Betrieb genommen werden. Seit den 90er Jahren macht man sich beim „WIPP-Projekt“ Gedanken über eine mögliche Kennzeichnung des Endlagers. Dabei wird berücksichtigt, dass sich Sprache, Schrift und Symbole über die Zeit stark ändern. So konnte beispielsweise bis heute nur rund einem Viertel der Zeichen der Maya eine Bedeutung zugeordnet werden.

³² Beispielsweise Medienmitteilung des Aargauer Regierungsrates vom 6.Nov. 2008.

Das Projekt sieht vor, dass eine Grundfläche von sechs Quadratkilometern von einem dreißig Meter breiten und zehn Meter hohen Erdwall begrenzt wird, der mit einem Saum aus Steinsäulen bestückt ist. Diese Markierungen werden mit Warnungen und Informationen über den vergrabenen Abfall in sieben Sprachen versehen. In der Mitte der umgrenzten Fläche wird ein Informationszentrum gebaut, teils oberirdisch und teils unterirdisch. In Granit gemeisselt finden sich hier sämtliche Angaben über das Endlager wie Inhalt, Herkunft und Aufbau. Zudem werden kleine Markierungen aus Granit, Aluminiumoxid und Ton, zwei Meter unter dem Boden verteilt über die ganze Fläche vergraben, welche zusätzlich Warnhinweise enthalten. Verteilt über mehrere Archive weltweit soll zusätzlich das Wissen über das Endlager gespeichert werden (Waste Isolation Pilot Plant WIPP 2008).

3.2.5. Sozioökonomische Auswirkungen von Entsorgungsanlagen

Im Auftrag des BFE haben Rütter + Partner (2006) die sozioökonomischen Auswirkungen von Entsorgungsanlagen für radioaktive Abfälle untersucht. Die Studie basiert auf der Untersuchung von 5 Fallbeispielen: Zwilag in Würenlingen, Centre de l'Aube (Frankreich), Gorleben (Deutschland), Olkiluoto (Finnland) und Wellenberg (Schweiz). Gemäss der Studie haben die Entsorgungsanlagen die folgenden Auswirkungen:

- Wirtschaft: Entsorgungsanlagen haben positive Auswirkungen auf Umsätze, Wertschöpfung und Beschäftigung in der lokalen und regionalen Wirtschaft. In keiner der untersuchten Regionen wurden negative Auswirkungen auf die Landwirtschaft, den Tourismus oder die Boden- und Liegenschaftspreise festgestellt. Tourismus und Landwirtschaft sind jedoch sensible Sektoren, die durch die Realisierung von Entsorgungsanlagen wirtschaftliche Nachteile erleiden können.
- Öffentliche Finanzen: Je nach der aktuellen Finanzlage haben die Zahlungen der Betreiber erhebliche Wirkungen auf die Finanzen der Standortgemeinde.
- Gesellschaft: In keiner der untersuchten Regionen hat sich die Entsorgungsanlage negativ auf die Bevölkerungsentwicklung ausgewirkt. Ängste der Bevölkerung um Gesundheit, Umwelt und Image der Region können jedoch eine erhebliche Bedeutung haben.
- Umwelt: In keiner der untersuchten Regionen sind Einflüsse auf die Umwelt im Sinne der Verletzung von Grenzwerten festgestellt worden bzw. dokumentiert.

3.3. Weitere Umweltauswirkungen

Neben den Treibhausgasemissionen und der Endlagerung des radioaktiven Abfalls gibt es bei der Bereitstellung von Kernenergie weitere Umweltauswirkungen.

Die Umweltauswirkungen bei der Gewinnung von Uran beinhalten ähnliche bekannte Auswirkungen wie beispielsweise beim Abbau von Gold, Kupfer, Zink oder Blei. Zusätzlich sind jedoch die radiologischen Auswirkungen höher. Abhängig von der Deponierungs- und Abbaumethodik sind die Umweltauswirkungen verbunden mit der Abfallbewirtschaftung, dem

Wassermanagement und dem Chemikalieneintrag bzw. weiteren Emissionen bei der Uranaufbereitung (Mudd 2006). Anhang 9 fasst verschiedene Umweltauswirkungen der Urangewinnung und -aufbereitung zusammen.

3.3.1. Umweltauswirkungen beim Abbau von Uran

Bei offenen Minen entstehen grosse Mengen an Abraumgestein mit einem geringen Gehalt an Uran, dessen Gewinnung nicht wirtschaftlich ist. Zusätzlich enthält dieses Gestein häufig Schwefelminerale. Vielfach infiltriert Wasser und Sauerstoff in diesen Abraum und reagiert mit dem Gestein zu Schwefelsäure. Die Schwefelsäure löst Schwermetalle und Radionuklide im Abraum, welche in die Umwelt ausgewaschen werden. Diese Auswaschung (Acid Mine Drainage AMD) ist toxisch für aquatische Ökosysteme und verursacht bedeutende, langfristige Umweltauswirkungen (Mudd 2006). Vergleichbare Prozesse werden auch in anderen Sparten des Bergbaus beobachtet, wie z.B. dem Kupferbergbau oder dem Braunkohletagebau im Osten Deutschlands (Schultze et al. 1999). Rohstoffe, die bergbaulichen Ursprungs sind, werden aber in allen Energieumwandlungstechnologien benötigt, weshalb eine Einordnung der Umweltbelastung durch den Uranbergbau nur durch Gegenüberstellung mit den Alternativen im Rahmen von Lebenszyklusanalysen möglich ist (s. unten).

Mudd und Diesendorf (2008) haben für die wichtigsten Uranminen den Wasser- und Energiebedarf, der bei der Gewinnung von Uran benötigt wird, zusammengetragen. Die in der Studie zusammengefassten Daten repräsentieren die Urangewinnung von rund 80% der in Kernkraftwerken der westlichen Welt eingesetzten Menge an Uran (1.2 Mt U₃O₈ von 1.6 Mt U₃O₈). Der Energieverbrauch liegt im Mittel bei rund 200 GJ/t U₃O₈ (Tabelle 8). Der Energieverbrauch in der Mine resultiert aus dem direkten Treibstoffverbrauch, Diesel und/oder Elektrizität. Zusätzlicher Energieinput zur Bereitstellung von Reagenzien wie Lösungsmittel (Kerosin, Amine), Schwefelsäure, Oxidantien (Wasserstoffperoxid) oder Kalk ist bei den Berechnungen nicht einbezogen. Der Wasserverbrauch ist stark abhängig vom Urangehalt im gewonnenen Erz. In der Regel muss umso mehr Wasser zur Gewinnung aufgewendet werden, je kleiner der Urangehalt ist.

Tabelle 8 Wasser- und Energieverbrauch für Uranminen nach Mudd und Diesendorf (2008). (Mittelwert ± Standardabweichung, Anzahl Jahre in Klammer)

| Uranminen | Typischer Erzgehalt %U ₃ O ₈ | Jährliche Produktion t U ₃ O ₈ | Verbrauch | |
|----------------|--|--|---|--|
| | | | Wasser kL/t U ₃ O ₈ | Energie GJ/t U ₃ O ₈ |
| Ranger | 0.28-0.35 | 5000 | 46.2 ± 8.2 (7) | 181 ± 18 (9) |
| Olympic (100%) | 0.064-0.114 | 4300 | 2899 ± 503 (14) | 1389 ± 336 (14) |
| Olympic (20%) | | | 580 ± 101 (14) | 278 ± 67 (14) |
| Rössing | ~0.034-0.041 | ~3700 | 863 ± 117 (11) | 354 ± 35 (11) |
| Cluff Lake | 2.71 | (geschlossen) | 365 (1) | 194 (1) |
| McLean Lake | 1.45-2.29 | ~2750 | 257 ± 62 (4) | 202 ± 25 (4) |
| Beverley | ~0.18 | ~1000 | 7731 ± 802 (5) | 172 ± 29 (3) |
| Niger | ~0.2-0.5 | ~3100 | keine Daten | ~204 |
| Cameco | ~0.9-4.0 | ~8500 | keine Daten | ~178 |

Die Schweizer Kernkraftwerke brauchen pro Jahr rund 600 Tonnen Natururan (Nuklearforum Schweiz 2008b). Unter der Annahme eines mittleren Wasserverbrauchs von 580'000 Liter / t U₃O₈ (Median) ergibt sich für das in der Schweiz verwendete Uran ein Verbrauch von rund 350'000 m³ Wasser pro Jahr. Dies entspricht zwar nur einem Bruchteil (0.03%) des jährlichen Trinkwasserverbrauchs der Schweiz, das Wasser wird aber zum Teil in Regionen verbraucht in welchen Wasser ein knappes Gut ist (z.B. Niger, Namibia, Australien). Der Energieverbrauch verbunden mit dem Uranabbau liegt bei rund 121'000 GJ (Median multipliziert mit 600 Tonnen pro Jahr). Dies entspricht rund 33'700 MWh. 2007 betrug die Stromproduktion der Schweizer Kernkraftwerke rund 27 Mio. MWh (swissnuclear 2008c). Der Energieverbrauch für den Uranabbau entspricht also rund 0.1% der produzierten elektrischen Energie der Schweizer Kernkraftwerke.

3.3.2. Umweltauswirkungen bei der Uranaufbereitung

Bei der Uranerzaufbereitung, dem sogenannten „Milling“, wird das Erz zerkleinert, das Uran extrahiert und schliesslich zu gelbem Pulver, dem „Yellowcake“ gemahlen. Die Rückstände dieses Aufbereitungsprozesses, die sogenannten „Tailings“ sind Schlämme, die in Absetzbecken geleitet werden und dort verbleiben. Die produzierte Menge an Schlamm entspricht dabei praktisch der Menge an aufbereitetem Erz. Da langlebige Zerfallsprodukte wie Thorium-230 und Radium-226 bei der Aufbereitung nicht entnommen werden, beinhaltet der Schlamm noch rund 85% der anfänglichen Radioaktivität des Erzes. Weil aus technischen Gründen das im Erz enthaltene Uran nicht vollständig aufbereitet werden kann, enthält der Schlamm auch noch 5 bis 10% des vorher im Erz enthaltenen Urans. Zusätzlich enthalten die Schlämme Schwermetalle und andere Verunreinigungen wie Arsen und chemische Reagenzien welche für den Aufbereitungsprozess verwendet wurden (World Information Service on Energy WISE 2004).

Aus den Schlämmen entweicht Radon-222 als Gas, welches Lungenkrebs verursachen kann. In einer Studie der Internationalen Atomenergiebehörde (International Atomic Energy

Agency IAEA 1992) wurden die Radon-Konzentrationen über rund 30 Tailings bestimmt. Die Werte variieren zwischen 8 und 10'400 Bq/m³ mit einem Mittelwert von rund 1'000 Bq/m³. Zum Verständnis dieser Werte sei auf den Schweizer Grenzwert für Wohngebäude gemäss der Strahlenschutzverordnung verwiesen, der 1'000 Bq/m³ beträgt. Die Halbwertszeit von Radon-222 liegt zwar bei nur 3.8 Tagen, doch durch die kontinuierliche Produktion von Radon aus dem Zerfall von Radium-226³³ (Halbwertszeit 1600 Jahre), stellt die Radon-Belastung ein langfristiges Problem dar. Stark erhöhte Radonwerte werden auch in Gebieten mit Uranvorkommen vorgefunden, bevor diese bergbaulich erschlossen werden. Radonmessungen sind deshalb Bestandteil der Erkundung von Uranlagerstätten.

Der Problematik der ständigen Produktion von Radium-226 wird von Seiten der Bergbauunternehmen zunehmend Aufmerksamkeit geschenkt. In einigen Minen wird Radium bereits mit Bariumsulfat, Bariumchlorid oder Gips als Chlorid ausgefällt und entsorgt. Diese und weitere technologische Möglichkeiten, die teilweise bereits angewandt werden, sind in einer technischen Dokumentation der IAEA aufgeführt (International Atomic Energy Agency IAEA 2004c).

Eine jüngst erschienene Studie von Doka (2008) bewertet den Umwelteinfluss durch Emissionen aus den Absetzbecken des Uranbergbaus. Während des gesamten Lebenszyklus werden rund 0.009 kg Tailing pro kWh produzierte Energie produziert. Etwa 72% der Gesamtbelastung aus der nuklearen Energieumwandlungskette stammen aus der Uranmine, wobei etwa 12% auf die Radiotoxizität des emittierten Radons zurückzuführen sind. Bei dem Rest handelt es sich um chemisch-toxische Emissionen aus den Absetzbecken. Dies führt zu einer Neubewertung in Ökobilanzierungen, nach der die Kernenergie etwa um den Faktor 2,5 stärker umweltbelastend ist, als zuvor angenommen. Ein Vergleich der Ökoindikatoren zeigt jedoch, dass Wind-, Wasserkraft und Kernenergie nach wie vor gemeinsam die geringsten Umwelteinwirkungen der heute verfügbaren Energieumwandlungstechnologien ausweisen (siehe Kap. 3.4.1.)

Doka (2008) äussert die Vermutung, dass langfristig die Ökotoxizität der Uranminen auf Grund der abnehmenden Urankonzentration im Erz an Bedeutung gewinnen. Dem wirkt entgegen, dass die Energieeffizienz mit dem Einsatz neuer Reaktortypen tendenziell ansteigt und somit pro kWh weniger Natururan benötigt wird.

3.3.3. Umweltauswirkungen bei der Urananreicherung

Für die Anreicherung des Urans muss der „Yellowcake“ in Uranhexafluorid (UF₆) umgewandelt werden. Die Anreicherung ist nötig, da Natururan überwiegend aus nicht spaltbarem Uran-238 besteht und nur etwa 0,7% an spaltbarem Uran-235 enthält. Die meisten Atom-

³³ In Tailings ist ebenfalls das langlebige Thorium-230 mit einer Halbwertszeit von 80'000 Jahren vorhanden, welches in Radium-226 zerfällt.

kraftwerke benötigen aber Brennstoff mit einem Uran-235-Gehalt von 3 bis 5% (Umwelt-Institut München e.V. 2008).

Neben dem erwünschten Produkt mit dem erhöhten Anteil an Uran-235 entsteht bei der Anreicherung auch wieder Abfall („Tails“). Aus einer Tonne Uran-Hexafluorid-Isotopenmischung entstehen etwa 760 kg abgereichertes Uran mit einem Uran-235-Anteil von etwa 0,3% und etwa 240 kg angereichertes Uran mit einem Uran-Anteil von etwa 4% (Tschöp 2008).

3.4. Lebenszyklusbetrachtung und Multikriterienanalysen

3.4.1. Lebenszyklusbetrachtung

Auf der Basis von Ökobilanzinventaren (ecoinvent) haben Bauer et al. (2007) verschiedene Strombereitstellungstechnologien hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen miteinander verglichen. Die Abbildung 6 zeigt den Vergleich der Technologien für das Jahr 2030. Die Technologien wurden dabei mit der Methodik des Eco-Indicator 99³⁴ bewertet. Die Wasserkraft schneidet beim Vergleich am Besten ab, gefolgt von der Kernenergie und der Windkraft. Geothermie und Photovoltaik werden etwas schlechter bewertet. Die Elektrizitätserzeugung aus fossilen Energieträgern verursacht die stärksten Umweltauswirkungen.

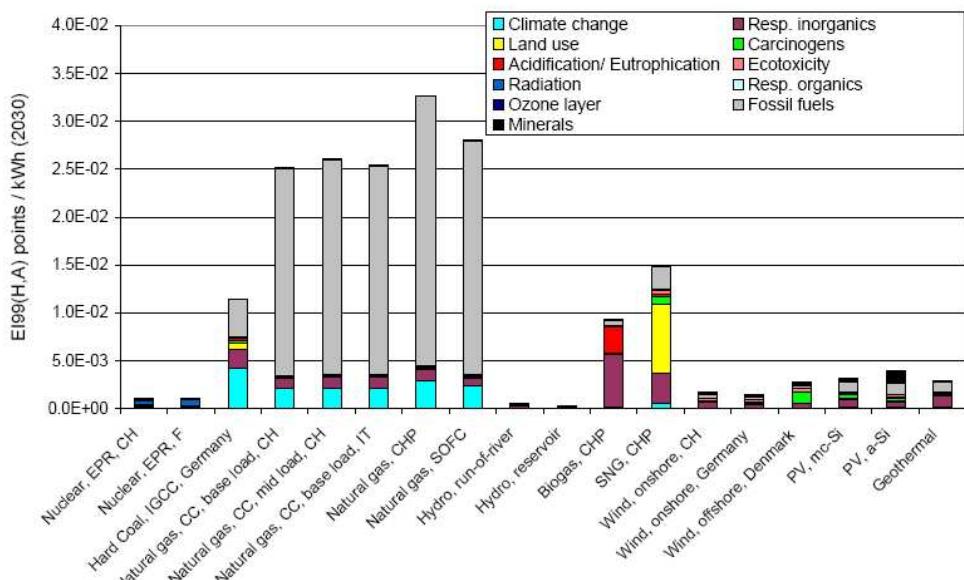


Abbildung 6 Ökobilanzresultate verschiedener Strombereitstellungstechnologien für das Jahr 2030 unter der Verwendung des Eco-Indicator 99 (Bauer et al. 2007).

Bezieht man die bereits in Kapitel 3.3.2 zitierten Ergebnisse der Studie von Doka (2008) in die Lebenszyklusbetrachtung mit ein, erhöht sich die Umweltbelastung der Kernenergie berechnet nach dem Eco-Indicator 99 um rund das 2.5fache. Definitive Ergebnisse liegen ge-

³⁴ Der Eco-Indicator 99 ist eine Ökobilanzierungsmethode die Schäden an mineralischen und fossilen Ressourcen, Schäden der Ökosystemqualität und Schäden der menschlichen Umwelt bewertet.

mäss Angaben des PSI zurzeit noch nicht vor. In der Studie von Doka (2008) werden erstmals auch die Umweltauswirkungen der Tailings berücksichtigt. Die Urangewinnung macht dabei etwa drei Viertel der gesamten Umweltbelastung aus. Da zunehmend Erze mit geringerer Urankonzentration abgebaut werden, wird sich die Umweltbilanz der Kernenergie in Zukunft gemäss Doka (2008) eher verschlechtern. Bei den meisten Ökobilanzberechnungen werden zudem Langzeitschäden und seltene Unfälle nicht oder nur ungenügend berücksichtigt.³⁵

3.4.2. Multikriterienanalysen

Roth et al. (2008) haben verschiedene Energiebereitstellungstechnologien mit Hilfe einer Multikriterienanalyse miteinander verglichen. Die Kriterien decken dabei sowohl Umweltaspekte als auch soziale und ökonomische Aspekte ab. In einer ersten Phase wurde die Analyse in einem Stakeholderprozess mit Mitarbeitern der Axpo AG durchgeführt. Diese Auswahl kann jedoch zu verzerrten Einschätzungen führen, die nicht die Gesamtheit der Bevölkerung wiedergeben. Später soll der Prozess daher auf eine umfassendere Stakeholdergruppe ausgeweitet werden. Je nach Gewichtung ergeben sich bei der Multikriterienanalyse unterschiedliche Gesamtresultate.³⁶

Die folgenden Abbildungen zeigen die Rangfolge der verschiedenen Technologien bewertet in Nachhaltigkeitspunkten mit unterschiedlichen Gewichtungskriterien.³⁷ Die in Abbildung 7 dargestellten Resultate (höhere Gewichtung auf Klima, menschliche Gesundheit, Bereitstellungskosten und Versorgungssicherheit) widerspiegeln nach Roth et al. (2008) eher die Sicht der Energiebranche, während die Resultate gemäss Abbildung 8 (höhere Gewichtung auf Ressourcenverbrauch, Sicherheit, politische Stabilität und Legitimation inkl. Proliferationsrisiken, Risikowahrnehmung und Konsequenzen schwerer Unfälle und direkte Arbeitsplatzeffekte) eher die Sichtweise von Nicht-Regierungsorganisationen zeigen. Im ersten Fall teilt sich die Kernenergie in der Schweiz mit Biogasanlagen den Platz vier hinter Wasserkraft (Speicher- und Laufkraftwerke) und der Geothermie. Beim zweiten Profil verbleiben die Wasserkraft, die Geothermie und Biogasanlagen an der Spitze der Rangfolge, gefolgt von der Gasgewinnung mit Holz (SNG) und der Windenergie. Die Kernenergie in der Schweiz fällt auf Platz 11 von 18 zurück.

³⁵ Aussage von Patrick Hofstetter, Leiter Klimapolitik WWF Schweiz.

³⁶ Die Definition der Indikatoren könnte jedoch gemäss Einschätzung von Stefan Hirschberg (Laboratory for Energy Systems Analysis, PSI Villigen) zu einem unbewussten Bias führen.

³⁷ Multikriterienanalysen haben gemäss Einschätzung von Stefan Hirschberg – gerade im Vergleich zu reinen Kostenbetrachtungen (siehe hierzu Kapitel 5) – den Vorteil, dass sie keine Monetarisierung der Risikoaversion erfordern. Vielmehr kann der Umgang der Risikoaversion der Freiheit der Stakeholders überlassen und durch entsprechende Gewichtung in der Gesamteinschätzung berücksichtigt werden.

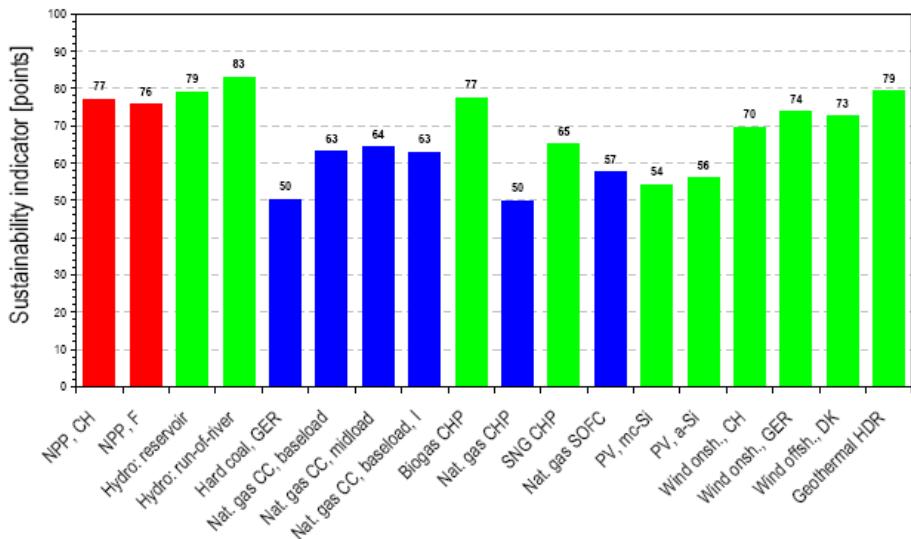


Abbildung 7 Rangfolge von Energiebereitstellungstechnologien mit höherer Gewichtung auf Klima, menschliche Gesundheit, Bereitstellungskosten und Versorgungssicherheit (Roth et al. 2008).

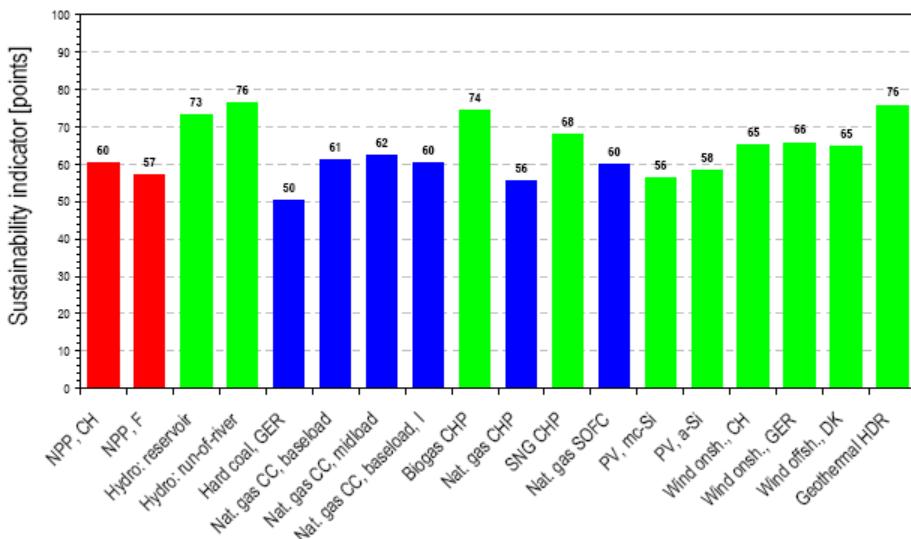


Abbildung 8 Rangfolge von Energiebereitstellungstechnologien mit höherer Gewichtung auf Ressourcenverbrauch, Sicherheit, politische Stabilität und Legitimation inkl. Proliferationsrisiken, Risikowahrnehmung und Konsequenzen schwerer Unfälle und direkte Arbeitsplatzeffekte (Roth et al. 2008).

Insgesamt schneidet die Kernenergie bei Multikriterienanalysen nicht so gut ab wie bei reinen Kostenbetrachtungen, da soziale Aspekte, die ein bedeutendes Problemfeld der Kernenergie darstellen, expliziter und umfassender berücksichtigt sind und je nach Präferenzen der Stakeholder ein stärkeres Gewicht haben können.³⁸

³⁸ Aussage von Stefan Hirschberg, Laboratory for Energy Systems Analysis, PSI Villigen.

4. Gesellschaftliche Akzeptanz, ethische Aspekte und gesundheitliche Auswirkungen

Kernenergie wird von Befürwortern und Gegnern kontrovers diskutiert. In diesem Kapitel werden die gesellschaftliche Akzeptanz, ethische Aspekte und gesundheitliche Auswirkungen des Betriebs von Kernkraftwerken näher betrachtet.

4.1. Akzeptanz und Risikowahrnehmung

Zahlreiche Studien zeigen, dass Risiken individuell unterschiedlich wahrgenommen werden. Erhebliche Divergenzen bestehen vor allem bei der Risikowahrnehmung von „Laien“ und „Experten“. Während Experten eher auf quantitative Attribute ansprechen, erscheinen für Laien qualitative Faktoren von grösserer Bedeutung (Earle 2002). Viele Befürworter der Kernenergie halten sie für ethisch geboten, weil sie ein hohes Mass an Nachhaltigkeit mit einer geringen spezifischen Beeinflussung der Umwelt als Lebensgrundlage der Menschen, einem niedrigen Unfallrisiko, einer langfristig gesicherten Rohstoffversorgung und einer guten Wirtschaftlichkeit vereint (Internationale Länderkommission Kerntechnik ILK 2004).

Die Risikowahrnehmungen von Laien dürfen jedoch nicht als irrational eingestuft werden, sondern sind mit Verhaltensmustern erklärbar, die Menschen im Alltag entwickeln, um mit Risiken umzugehen. Haben sich solche Muster in der Vergangenheit bewährt, werden sie oft auch auf neue Risiken übertragen (Renn et al. 2007).

Faktoren, die das Verhalten von Personen beeinflussen, lassen sich grob in zwei Muster einteilen, das risiko- und das situationsbezogene. Ein Muster bezieht sich auf die Risikoquelle (Renn et al. 2007):

- Gewöhnung an die Risikoquelle
- Katastrophenpotential der Risikoquelle
- Sicherheit fataler Folgen bei Gefahrenereignis
- Langfristigkeit der Schäden
- Sinnliche Wahrnehmbarkeit von Gefahren
- Umkehrbarkeit der Schäden

Ein weiteres Muster bezieht sich auf die Eigenschaften einer riskanten Situation (Renn et al. 2007):

- Steuerungs- und Kontrollmöglichkeiten
- Freiwilligkeit, mit der das Risiko eingegangen wird
- Gerechte Verteilung von Risiko und Nutzen
- Vertrauen in Instanzen, die das Risiko kontrollieren
- Erfahrung mit dem Risiko
- Eindeutigkeit der Information über das Risiko

Bezieht man dieses Muster auf die Risiken, die von Kernanlagen und Transporten radioaktiver Materialien ausgehen, zeigt sich, dass die Risikowahrnehmung durch verschiedene Faktoren verstärkt wird:

Das Katastrophenpotential von Kernkraftwerken ist sehr hoch und mit dem Unfall von Tschernobyl 1986 auch für viele Menschen in der Schweiz anschaulich geworden. Radioaktivität ist mit den menschlichen Sinnen nicht direkt wahrnehmbar und lässt sich dadurch für den einzelnen Menschen auch schlecht einschätzen und kontrollieren. Die Folgen schwerwiegender Unfälle in Kernkraftwerken sind langfristig, was auch durch die langen Einschlusszeiten, mit denen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle kalkuliert werden muss, unterstrichen wird. Die Langfristigkeit wird dadurch verschärft, dass sich Schäden an der Keimbahn auf kommende Generationen auswirken können. Schwere gesundheitliche Schäden bei Menschen oder Umweltschäden, die durch Radioaktivität verursacht wurden, sind zudem nicht oder kaum reversibel.

Direkte Steuerungs- und Kontrollmöglichkeiten stehen der weit überwiegenden Mehrheit der Bevölkerung nur insofern zur Verfügung, als sie sich im Fall eines sehr schweren Unfalls in einem Kernkraftwerk durch Aufsuchen von Schutzräumen und Einnahme von Jodtabletten schützen könnte. Viele Menschen empfinden zudem die Freiwilligkeit, mit der das Risiko eingegangen wird, als gering, obwohl die Möglichkeit besteht, sich im Rahmen demokratischer Verfahren zur Kernenergie zu äussern. Ein Grund dafür liegt darin, dass energiepolitische Weichenstellungen in der Regel ohne direkte Beteiligung der Bevölkerung zustande kommen. Bisher wurden dabei alle eidgenössischen Initiativen, die einen Ausstieg aus der Kernenergienutzung verlangten, abgelehnt, z.B. die Initiativen „Strom ohne Atom – Für eine Energiewende und die schrittweise Stilllegung der Atomkraftwerke“ und „MoratoriumPlus – Für die Verlängerung des Atomkraftwerk-Baustopps und die Begrenzung des Atomrisikos“, über die 2003 abgestimmt wurde.

Die politische Einstellung kann regional variieren. Am 30. November 2008 stimmten beispielsweise 76,4% des Stimmvolkes der Stadt Zürich für einen längerfristigen Ausstieg aus der Kernenergienutzung. In der Gemeindeordnung wird festgehalten, dass die Stadt sich nicht an Neubauten von Kernkraftwerken beteiligen und auf neue Bezugsrechte für Elektrizität aus Kernkraftwerken verzichtet wird. Zudem wird die Beteiligung am Kernkraftwerk Gösgen 2039 auslaufen.

Da die Nutzung der Kernenergie politisch stark umstritten ist, liegen der Bevölkerung keine eindeutigen Informationen über das Risiko vor. Das Spektrum der Meinungen, die von Betreibern, Umweltorganisationen, Behörden und anderen Akteuren vertreten werden und vielfach für sich beanspruchen, wissenschaftlich abgesichert zu sein, ist ausgesprochen breit.

Andere Faktoren tragen dazu bei, dass das Risiko teils mehr, teils weniger bedrohlich wahrgenommen wird. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass Personen, die im näheren Umfeld eines Kernkraftwerks leben, die Risiken der Kernenergienutzung als weniger bedrohlich einstufen als Personen, die weiter entfernt leben. Dieser Effekt lässt sich – unter anderem – mit einer gewissen Gewöhnung an die Risikoquelle erklären. Ein weiterer Grund für die geringer empfundene Bedrohung kann darin liegen, dass im näheren Umfeld eines Kernkraftwerks überdurchschnittlich viele Personen leben, die im Kernkraftwerk arbeiten oder mit Personen, die im Kernkraftwerk arbeiten, bekannt sind, was das Vertrauen in die Sicherheit eines Kernkraftwerks erhöht. Dagegen werden Menschen, die grundlegend an der Sicherheit von Kernkraftwerken zweifeln, eher dazu tendieren, deren nähere Umgebung zu verlassen oder nicht in die nähere Umgebung eines KKW zu ziehen. Insgesamt ist dieser Sachverhalt aber nur wenig untersucht und in der Literatur wenig oder gar nicht dokumentiert.

Schwerwiegende Folgen treten nur bei sehr schweren Unfällen ein. Geringere Strahlendosen dagegen bleiben vielfach ohne Auswirkungen auf Mensch und Umwelt oder wirken sich erst nach einer längeren Latenzzeit schädigend aus, indem sie beispielsweise zu Krebskrankungen beitragen. Der Betrieb der Schweizer Kernanlagen verläuft seit Jahren störungsarm. Direkte Erfahrungen mit schweren Unfällen im eigenen Land hat die schweizerische Bevölkerung nicht gemacht, wohl aber mit globalen Auswirkungen der Katastrophe in Tschernobyl 1986. Der Kernschmelzstörfall im Versuchsreaktor Lucens 1969 hat das Risiko von Kerntechnik für die Bevölkerung sichtbar gemacht, wobei der Störfall durch die vorhandenen Sicherheitsmassnahmen erfolgreich eingedämmt wurde. Meldungen über kleinere Zwischenfälle in den Medien wecken immer wieder Zweifel an der Sicherheit von Kernanlagen und den Transporten radioaktiver Materialien, welche die Risikowahrnehmung verstärken.

Insgesamt zeigt sich, dass typische Faktoren der Risikowahrnehmung eher dazu beitragen, dass das mit der Kernenergienutzung verbundene Risiko von Laien deutlich bedrohlicher als von Experten wahrgenommen wird.

Umfrageresultate zur Risikowahrnehmung und Akzeptanz

Risikowahrnehmung, Akzeptanz und Kommunikation sind derzeit wichtige Themen für die Bewilligungs- und Aufsichtsbehörden im Bereich der Kernanlagen. So hat beispielsweise die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen bei der Stiftung Risiko-Dialog eine Befragung in Auftrag gegeben, um Auskunft über den Bekanntheitsgrad der Sicherheitsbehörde und das Vertrauen der Bevölkerung in deren Arbeit zu erhalten. Umfassende Informationen zu Risikowahrnehmung und Akzeptanz liefern vor allem die Eurobarometer-Studien. Das Eurobarometer ist eine Meinungsumfrage in den Ländern der Europäischen Union (EU), die in regelmässigen Abständen von der Europäischen Kommission in Auftrag gegeben wird. Zur jüngsten Eurobarometer-Umfrage, deren Schwerpunkt bei der Entsorgung radioaktiver

Abfälle liegt, veranlasste das BFE eine analoge Untersuchung in der Schweiz. Zudem hat auch swissnuclear kürzlich eine Umfrage zur Akzeptanz der Kernenergienutzung durchführen lassen. Im Folgenden werden wichtige Einflussfaktoren auf Risikowahrnehmung und Akzeptanz dargestellt.

Wahrnehmung der Kernenergienutzung. Generell wird die Nutzung der Kernenergie von vielen Personen stark mit Risiken und Gefahren assoziiert. 53% der Einwohner und Einwohnerinnen der EU glauben, dass Kernenergieanlagen ein Risiko für sie und ihre Familien darstellen. Trotzdem geben ebenso viele Befragte an, dass sie der Meinung sind, die Risiken der Kernenergie seien geringer als ihr Nutzen (53% ja / 33% nein). Die meisten Befürchtungen bestehen hinsichtlich Terrorangriffen, dem missbräuchlichen Einsatz von radioaktiven Materialien und der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Hingegen vertrauen die meisten Befragten in den sicheren Betrieb der Anlagen, die rechtlichen Grundlagen sowie in die staatlichen Aufsichtsbehörden (Eurobarometer 2007).

Kernkraftwerke im eigenen Land. Dem Eurobarometer zufolge ist die Unterstützung für die Nutzung der Kernenergie in Ländern, in denen Kernkraftwerke betrieben werden, deutlich höher, als in Staaten, in denen keine KKW vorhanden sind (Eurobarometer 2008). Die Schweiz nimmt hier allerdings eine Ausnahmeposition ein. Nur 40% der Schweizerinnen und Schweizer unterstützen die Nutzung der Kernenergie, 52% sprechen sich gegen eine Nutzung aus (Bundesamt für Energie BFE 2008c). Vergleicht man den Anteil an Befürwortern der Kernenergie in der Schweiz mit jenen aus dem benachbarten Ausland, ergibt sich folgendes Bild. In Frankreich herrscht mit 53% die grösste Zustimmung, gefolgt von Deutschland mit 46% und Italien mit 43%. Klar unter der Schweizer Marke liegt Österreich, welches selber über keine Kernkraftwerke verfügt und nur einen Anteil von 14% in der Bevölkerung hat, welcher die Nutzung der Kernenergie befürwortet (Bundesamt für Energie BFE 2008c).

Geschlecht. Frauen schätzen Risiken generell höher ein als Männer (Sjöberg 1998). Entsprechend zeigen die Ergebnisse des Eurobarometers, dass Männer die Nutzung von Kernenergie deutlich stärker befürworten als Frauen (Eurobarometer 2008). Dies trifft auch auf die Schweiz zu. 57% der Frauen lehnen hierzulande die Kernenergie eher ab, womit sie sich signifikant von den Männern unterscheiden, die nur mit 47% gegen diese Form der Energiegewinnung eintreten (Bundesamt für Energie BFE 2008c).

Einstellungen, Wissensstand, sozioökonomischer Status. Allgemeine wissenschaftliche Studien zur Risikowahrnehmung ergaben, dass der soziökonomische Status sowie unterschiedliche Religionszugehörigkeiten keinen bestätigten Einfluss auf die Risikowahrnehmung ausüben (Sjöberg 1998). Das Eurobarometer zeigt, dass die Risikowahrnehmung mit dem Ausbildungsniveau und dem Wissensstand der Befragten über Kernenergie sowie der politischen Einstellung variiert. Personen, die sich politisch eher auf der rechten Seite einordnen, befürworten tendenziell die Nutzung der Kernenergie – ein Befund, der auch durch eine Studie der ETH Zürich bestätigt wird (Stauffacher et al. 2008). Befragte, die angeben, gut über

die Entsorgung von radioaktiven Abfällen informiert zu sein, sind der Kernenergienutzung gegenüber eher positiv eingestellt (Eurobarometer 2008 / Bundesamt für Energie BFE 2008c). Zudem scheinen die Auseinandersetzungen um ein Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle im Kanton Nidwalden den Einfluss negativer Emotionen eher vermindert und denjenigen der wahrgenommenen Chancen und Risiken eher verstärkt zu haben (Stauffacher et al 2008). Im Allgemeinen hat jedoch der Wissensstand einer Person einen geringeren Einfluss auf die Akzeptanz der Kernenergie als die Tatsache, ob in dem Land, in dem sie lebt, bereits Kernkraftwerke in Betrieb sind oder nicht (Eurobarometer 2008).

Landesregionen. Die Einwohner und Einwohnerinnen der Romandie sind der Nutzung der Kernenergie gegenüber negativer eingestellt als diejenigen der Deutschschweiz (swissnuclear 2008a, Stauffacher et al. 2008). Die Sprachregionen unterscheiden sich vorwiegend bei der Zustimmung zur Nutzung der Kernenergie (Romandie 36%, Deutschschweiz 42%, Tessin 33%). Bei der Ablehnung erscheinen die Unterschiede deutlich weniger markant (Romandie 53%, Deutschschweiz 52%, Tessin 54%). Die fehlenden Anteile gehen auf Personen zurück, die sich für keine der beiden Ansichten entscheiden konnten. Worauf die Unterschiede zwischen Romandie und Deutschschweiz zurückgehen, wurde bisher nicht eingehender untersucht. Unter Umständen lassen sich die Unterschiede im Bereich der Zustimmung damit erklären, dass sich alle Kernkraftwerke in der Deutschschweiz befinden und deshalb dort die Gewöhnung an Kernenergienutzung höher ist als in der Romandie, sowie mit Differenzen im politischen Meinungsspektrum der beiden Sprachregionen (Bundesamt für Energie BFE 2008c).

Aktuelle Entwicklungen. Die Ergebnisse der Eurobarometer-Umfragen weisen darauf hin, dass die Zustimmung zur Kernenergienutzung seit 2005 kontinuierlich zugenommen hat (Eurobarometer 2008). Ein deutlicher Anstieg der Zustimmung wurde in 17 von 25 Staaten festgestellt. Nur in zwei Ländern, Lettland und Zypern, war die Akzeptanz rückläufig (Eurobarometer 2008).

In der Schweiz hat gemäss einer wiederholt durchgeföhrten repräsentativen Bevölkerungsbefragung von swissnuclear das Vertrauen der Bevölkerung in die Kernenergie in den letzten Jahren zugenommen. Wäre zum Zeitpunkt der Umfrage (2008) über die Rahmenbewilligung für ein neues Kernkraftwerk an einem bestehenden Standort abgestimmt worden, wäre eine knappe Mehrheit für die Erteilung der Rahmenbewilligung zustande gekommen (swissnuclear 2008a).

Eine Studie des Bundesamtes für Energie hat die Einführung einer Stromkennzeichnung evaluiert. Dabei wurden rund 1000 Haushalte der Schweiz nach ihrem gewünschten Strommix befragt. Die Mehrheit der befragten Haushalte sprechen sich für den folgenden Strommix aus: 38% Wasserkraft, 40% Solar-, Wind- oder Biomassestrom, 5% Kernenergie, 5% Strom aus Abfällen, 2% fossile Energieträger und 10% andere (Bundesamt für Energie 2007).

Verschiedene Interessengruppen wenden sich gegen die Fortführung oder den Ausbau der Kernenergienutzung in der Schweiz. Wie hoch das politische Potenzial dieser Interessengruppen ist, lässt sich gegenwärtig noch nicht einschätzen. Nach Informationen der Neuen Zürcher Zeitung bezweifeln selbst altgediente Gegner der Kernenergienutzung, dass sich aus dem heutigen Widerstand eine Protestbewegung mit beträchtlichem Ausmass entwickeln könnte. Der Grund dafür wird in der im Vergleich zu früheren Jahren verbesserten Einbindung der Bevölkerung mittels Referendumsmöglichkeiten sowie der verbesserten und offeneren Kommunikation der Betreiber von Kernkraftwerken gesehen (Neue Zürcher Zeitung NZZ 2008).

Kommunikation und Mitwirkung. Sowohl in der Schweiz als auch in der EU messen die Befragten der Mitbestimmung grossen Wert bei. Die Mehrheit möchte demnach zu wichtigen Themen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle direkt befragt werden und am Entscheidungsprozess teilnehmen. Dieses Bedürfnis ist besonders ausgeprägt, wenn sich ein potenzieller Standort zurendlagerung radioaktiver Abfälle in der Nähe bewohnter Gebiete befindet (Eurobarometer 2008 / Bundesamt für Energie BFE 2008c). Inwiefern Mitwirkung bei der Standortwahl eines Kernkraftwerkes von Relevanz ist, wurde in den vorliegenden Studien nicht erhoben.

Des Weiteren spielt die Art von Informationsquellen eine wichtige Rolle für Vertrauen und Akzeptanz. Die meisten Einwohner der EU vertrauen auf Informationen, die aus unabhängigen Quellen stammen, wobei Wissenschaftler an vorderster Stelle stehen, gefolgt von Nicht-Regierungsorganisationen, internationalen Behörden, nationalen Behörden, eigener Regierung, Vertretern der EU-Verwaltung, Nuklearindustrie und Medien (Eurobarometer 2008). Gegner der Kernenergienutzung bevorzugen Informationen von Nicht-Regierungsorganisationen, während die Befürworter eher anderen Quellen Glauben schenken (Eurobarometer 2008). Eine nicht vernachlässigbare Gruppe von Personen schenkt keiner der genannten Informationsquellen Vertrauen (Eurobarometer 2008). Schweizerinnen und Schweizer schenken grösstenteils denselben Quellen Vertrauen wie die übrigen Europäer, ausser dass sie Nicht-Regierungsorganisationen (33%) den Wissenschaftern (32%) leicht vorziehen (Bundesamt für Energie BFE 2008c).

Rolle der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Für die Akzeptanz der Kernenergienutzung ist die Diskussion um die geologische Tiefenlagerung der Abfälle in der Schweiz derzeit möglicherweise bedeutender als der sichere Betrieb der Kernkraftwerke (Neue Zürcher Zeitung NZZ 2007). Diese Vermutung wird durch die Befragung des BFE bestätigt. Derzeit sind 97% der Schweizer und Schweizerinnen der Meinung, dass heute eine Lösung zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen gefunden werden sollte (Bundesamt für Energie BFE 2008c). Dabei erachten 46% der Befragten die geologische Tiefenlagerung als beste Entsorgungsmöglichkeit. Gleichzeitig sind im Durchschnitt 51% der Meinung, dass es keine wirklich sichere Möglichkeit zur Lagerung von hoch radioaktiven Abfällen gibt (Bundesamt für Energie BFE

2008c). Befürchtungen bestehen vor allem in Bezug auf Beeinträchtigungen von Umwelt und Gesundheit (Bundesamt für Energie BFE 2008c).

Ein Vergleich mit der Europäischen Union zeigt, dass von einem gewissen Konsens in Europa ausgegangen werden kann. Demzufolge wäre eine knappe Minderheit der Befragten bereit, ihre negative Einstellung gegenüber der Kernenergie zu ändern, wenn eine sichere Lösung zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen bereit stünde (Eurobarometer 2008). Zu einer solchen Einstellungsänderung tendieren unter den Gegnern der Kernenergienutzung vorwiegend junge Menschen und solche, welche eine besonders lange Ausbildung absolviert haben (Eurobarometer 2008). Des Weiteren vertreten 93% der Einwohner der EU die Ansicht, dass die Problematik der Entsorgung von radioaktiven Abfällen demnächst gelöst werden soll. 41% glauben jedoch überhaupt nicht an eine sichere Möglichkeit zur Endlagerung von hochaktiven Abfällen. Im Vergleich zwischen verschiedenen Entsorgungsvarianten wird die geologische Tiefenlagerung als sicherste Lösung wahrgenommen (Eurobarometer 2008). Skepsis, ob es möglich sei, die Abfälle sicher zu entsorgen, äussert sich auch darin, dass die Befragten durchschnittlich in hohem Masse von der grundsätzlichen Gefährlichkeit von radioaktiven Abfällen überzeugt sind (Eurobarometer 2008 / Bundesamt für Energie BFE 2008c).

In einer Fallstudie der ETH Zürich wurden 2006 (Scholz et al. 2007) die Entscheidungsprozesse zum geplanten Lagerstandort Wellenberg seit Ende der achtziger Jahre näher untersucht. Dabei zeigte sich – ergänzend zu den oben ausgeführten Erkenntnissen aus der Umfrage des BFE –, dass

- in den Medien Personen, die das Projekt ablehnten, häufiger präsent waren als Personen, die das Projekt befürworteten,
- in den Medien Argumente aus den Bereichen Sicherheit und Technik vor allem mit Befürwortenden verbunden waren,
- die betroffene Bevölkerung der Sicherheit oberste Priorität beimisst,
- die betroffene Bevölkerung erwartet, in Entscheidungsprozesse einbezogen zu werden,
- Befürworter und Gegner der Kernenergienutzung in Bezug auf die Entsorgung radioaktiver Abfälle keine homogenen Gruppen bilden, sondern sich ein differenziertes und vielschichtiges Meinungsspektrum ergibt

4.2. Ethische Aspekte

Gerechtigkeit zwischen Generationen. Dem Nachhaltigkeitsprinzip folgend soll die gegenwärtige Generation ihre Bedürfnisse so befriedigen, dass sie die Fähigkeit der zukünftigen Generation, ihre eigenen Bedürfnisse befriedigen zu können, nicht gefährdet. Dies bedeutet unter anderem, dass bei gesellschaftlichen Entscheidungen auch deren längerfristige Auswirkungen zu berücksichtigen sind.

Im Vordergrund ethischer Diskussionen steht im Allgemeinen die Entsorgung der radioaktiven Abfälle, die bei der Nutzung der Kernenergie entstehen. Die Erzeugung von Abfällen, die ein hohes, über lange Zeiträume anhaltendes Gefahrenpotenzial bergen, ist mit der Forderung nach Gerechtigkeit zwischen den Generationen nur dann vertretbar, wenn es gelingt, dieses Gefährdungspotenzial sicher von der Ökosphäre auszuschliessen. In der Schweiz werden die Kosten für die Entsorgung der Betriebsabfälle und der abgebrannten Brennelemente nach der Ausserbetriebnahme eines Kernkraftwerks durch den Stilllegungs- und Entsorgungsfonds gedeckt (Verordnung über Stilllegungs- und Entsorgungsfonds SEFV 2007). Zudem strebt der Bund mit dem Sachplanverfahren eine zügige Realisierung der geologischen Tiefenlagerung an, um kommende Generationen nicht mit dieser Aufgabe zu belasten. Nicht abschliessend gelöst ist jedoch die Frage, wie Menschen über historische Zeiträume hinweg und darüber hinaus durch Information vor dem Gefahrenpotenzial, das insbesondere die hochaktiven Abfälle beinhaltet, bewahrt werden können.

Die britische Sustainable Development Commission äussert sich dazu folgendermassen (Sustainable Development Commission SDC 2006): „Nuclear power, with its waste legacy, has clear inter-generational impacts as nuclear waste is expected to remain radioactive for tens of thousands of years. No civilisation foresees its own demise, but a brief look at history shows the cycle of civilisations developing to peak power and influence and declining to marginal influence, and sometimes disappearing. It is estimated that some elements of radioactive nuclear waste will continue to be toxic for hundreds of thousands of years. In view of historical evidence of the decline of civilisations, it would seem appropriate to take seriously the issues of leaving a radioactive legacy for many future generations, when knowledge of where and how that waste is stored could die away over time.“

Die Arbeitsgruppe Christen + Energie führte im 2008 eine Umfrage unter Deutschschweizer Seelsorgern und Kirchengemeinden (total 3917 Befragte) zu verschiedenen energiepolitischen Themen durch. Unter anderem wurde die Frage gestellt ob eine massvolle, friedliche Nutzung der Kernenergie ethisch vertretbar sei. 30% beantworteten die Frage mit einem Ja, 22% mit eher Ja, 19% mit eher Nein und 25% mit einem Nein. Damit hältte eine knappe Mehrheit der Befragten die Nutzung der Kernenergie für ethisch verantwortbar (Arbeitsgruppe Christen + Energie 2008).

Gerechtigkeit zwischen Regionen. Die Bevölkerung in der Umgebung von Kernanlagen trägt – vor allem aufgrund von Emissionen im Normalbetrieb und der Möglichkeit von Störfällen – ein erhöhtes Risiko. Von der durch Kernkraftwerke erzeugten Elektrizität profitieren jedoch weitere Regionen. Hier liegt also eine räumlich nicht homogene Risikoverteilung vor. Unbestritten ist, dass die Bevölkerung in der Umgebung von Kernanlagen durch diese Anlagen nur einem Risiko ausgesetzt werden darf, das im Vergleich zu alltäglichen Risiken sehr gering ist. Inwiefern Akkumulationen solcher Risiken, z.B. durch Kernanlagen, Nationalstrassen und Flughäfen, der Bevölkerung einer Region im allgemeinen Interesse zumutbar sind, wird derzeit unter anderem im Rahmen des Sachplans geologische Tiefenlager des Bundes diskutiert.

Gerechtigkeit zwischen Ländern bzw. Bevölkerungsgruppen. Das zur Elektrizitätsgewinnung benötigte Uran wird heute in verschiedenen Ländern abgebaut. Rund 70% der weltweiten Uranvorkommen befinden sich auf dem Land indigener Völker. Die grössten Reserven liegen dabei in Kanada und Australien. Weitere wichtige Produzenten von Uran sind Kasachstan, Niger, Russland, Namibia und Usbekistan. Indigene Völker sind den Umweltauswirkungen des Uranabbaus ausgesetzt, können häufig aber nicht vom Wert des Rohstoffs profitieren. Von Uranabbau betroffene indigene Bevölkerungsgruppen sind beispielsweise die kanadischen Cree und Dene, die Lakota in Süd Dakota (USA), die Navajo in New Mexiko (USA), die australischen Aborigines oder die Adivasi in Indien (Gesellschaft für bedrohte Völker GFBV 2007). In der Literatur stehen keine Informationen zu den Auswirkungen auf indigene Bevölkerungsgruppen insgesamt zur Verfügung, auf deren Grundlage eine abschliessende Bewertung der Folgen des Uranabbaus erfolgen könnte. Im Anhang 10 werden jedoch die Auswirkungen anhand von ausgewählten Beispielen dokumentiert.

4.3. Gesundheitliche Auswirkungen

4.3.1. Strahlenexposition

Die Tabelle 9 zeigt eine Übersicht der Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland gegliedert nach den Ursachen der Strahlendosis. Mit einem Mittelwert von 0.001 mSv/a ist der Beitrag der Kernenergie an der Gesamtdosis von rund 4 mSv/a nur gering (Informatiokskreis KernEnergie 2008). Die in den jährlichen Strahlenschutzberichten von ENSI publizierten Zahlen für die Schweiz liegen in denselben Grössenordnungen.

Tabelle 9 Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland (Informationskreis KernEnergie 2008).

| Ursache der Strahlendosis | Effektive Dosis in mSv/a | |
|---|---------------------------------------|--|
| | Mittelwert für die Bevölkerung | Wertebereich für Einzelpersonen |
| Natur | | |
| Kosmische Strahlung | 0.3 | 0.3 bis 0.5 |
| Terrestrische Strahlung | 0.4 | 0.2 bis 3 |
| Innere Bestrahlung | 1.4 | 0.5 bis 8 |
| Natur gesamt | 2.1 | 1 bis 10 |
| Zivilisation | | |
| Medizin | 1.9 | 0.01 bis 30 |
| Erhöhung der natürlichen Dosis durch industrielle Tätigkeit | 0.01 | 0.1 bis 2 |
| Tschernobyl-Unfall | 0.01 | 0.005 bis 0.04 |
| Kernwaffentests | 0.005 | 0.002 bis 0.01 |
| Flugreisen | 0.005 | 0.01 bis 5 |
| Industrieprodukte | 0.001 | 0.5 bis 5 |
| Fossile Energieträger | 0.001 | 0.001 bis 0.01 |
| Kernkraftwerke | 0.001 | 0.001 bis 0.01 |
| <i>Beruf</i> [*] | 0.3 | 0.1 bis 15 [*] |
| Zivilisation gesamt | 1.9 | - |
| Gesamt | 4 | - |

* Nur beruflich exponierte Personen

4.3.2. Kinderkrebsstudien

Das Mainzer Kinderkrebsregister hat 2007 im Auftrag des deutschen Bundesamtes für Strahlenschutz eine epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken durchgeführt (KiKK-Studie) (Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU 2007). Die Studie kommt zum Schluss, dass das Risiko für 0-4jährige Kinder an Leukämie zu erkranken zunimmt, je näher ihr Wohnort an einem Kernkraftwerkstandort liegt. Im 5-km-Umkreis um die Reaktoren wurde im Untersuchungszeitraum von 1980 bis 2003 festgestellt, dass die Erkrankungswahrscheinlichkeit um 60% bei allen Krebserkrankungen und um 120% bei Leukämien steigt. Um eventuelle Fehlinterpretationen der Studiendaten auszuschliessen, wurde zusätzlich untersucht, ob andere mögliche Risikofaktoren das Ergebnis der Studie signifikant beeinflusst haben könnten. Dabei konnte ein Einfluss der untersuchten Risikofaktoren ausgeschlossen werden. Ein eindeutiger kausaler Zusammenhang zwischen dem erhöhten Krebsrisiko und der Nähe zu Kernkraftwerken wurde mit der Studie nicht bewiesen. Im Anschluss an die im Dezember 2007 veröffentlichte KiKK-Studie beauftragte die deutsche Regierung ihre Strahlenschutzkommission, diese Untersuchung zu bewerten und vor allem die Frage zu beantworten, ob die von den Kernkraftwerken ausgehende Strahlung für das in der Studie beobachtete Ereignis verantwortlich sein kann. Eine Arbeitsgruppe von internationalen Experten kam zum Schluss, dass die Ur-

sache für die beobachtete Erhöhung der Leukämierate bei Kindern in der KiKK-Studie nicht klar ist und nicht kausal auf die radioaktiven Emissionen aus den Kernkraftwerken zurückgeführt werden kann.³⁹

Baker und Hoel (2007) haben in einer umfangreichen Meta-Studie Daten von 17 internationalen Studien zu Kinderleukämien um Kernkraftwerke untersucht. Die Analyse zeigt, dass bei Kindern in der Altersgruppe bis neun Jahren ein je nach Entfernung vom Kernkraftwerk um 14 bis 21% erhöhtes Risiko an Leukämie zu erkranken besteht. In der Altersgruppe unter 25 Jahren war die Erkrankungswahrscheinlichkeit um 7 bis 10% und die Sterberate um 2 bis 18% erhöht.

Ende 2007 hat die Krebsliga Schweiz und das Bundesamt für Gesundheit eine mit der deutschen Studie vergleichbare Studie in Auftrag gegeben um die Häufigkeit von Krebserkrankungen – insbesondere Leukämie – bei Kindern, die im näheren Umkreis eines der fünf Kernkraftwerke der Schweiz leben, zu bestimmen (CANUPIS-Studie). Die Studie betrachtet die Gesamtheit der zwischen 1985 und 2007 in der Schweiz geborenen Kinder. Die Ergebnisse der Studie sollen 2011 veröffentlicht werden. Die Studie ist flächendeckend, sie wird also nicht wie die bisherigen Studien nur im Umkreis der Kernkraftwerke durchgeführt (Krebsliga Schweiz & Bundesamt für Gesundheit BAG 2008). Dadurch sind statistisch besser abgesicherte Ergebnisse zu erwarten.

Neben der Kernenergie ist beispielsweise in der Umgebung von Kohlekraftwerken eine erhöhte radioaktive Exposition festzustellen. Eine vollständige Risikobewertung wurde hier bisher nicht vorgenommen (Jansen 2008). Bei der Gewinnung anderer Rohstoffe werden ebenfalls radioaktive Stoffe aus dem Erz und dem umgebenden Gestein freigesetzt. Als erläuterndes Beispiel sei Kupfer betrachtet. So haben Schlackesteine aus der Kupfergewinnung, die vor der Wende in Dresden zum Straßenbau eingesetzt wurden, eine, wenn auch geringe, zusätzliche Exposition der Bevölkerung bewirkt (Beleites 1992). Die anfallenden Schlackeströme werden im Normalfall auf Halde gefahren und können von dort aus über Ausbreitungspfade zur Exposition beitragen.

Da Kupfer als Ausgangsmaterial für die Errichtung von diversen Energieanlagen dient, so auch zum Beispiel zur Herstellung von Photovoltaikzellen, wird diesem Sachverhalt bei Lebenszyklusanalysen Rechnung getragen (siehe auch Kapitel 3.4.). Dies erklärt, warum selbst regenerative Energiequellen durch die Lebenszyklusanalyse mit radioaktiven Abfallströmen belastet werden.

³⁹ Nach derzeitigem wissenschaftlichem Kenntnisstand kann der beobachtete Anstieg der Erkrankungen nicht durch die Strahlenbelastung aus einem Atomkraftwerk erklärt werden. Die Strahlenbelastung der Bevölkerung müsste durch den Betrieb der Atomkraftwerke in Deutschland um mindestens das 1.000-Fache höher sein, um den beobachteten Anstieg des Krebsrisikos erklären zu können. Die statistische Untersuchung und bekannte Ursachen Zusammenhänge zwischen Krebsrisiko und Strahlung stehen damit nicht im Einklang miteinander (Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU 2008).

5. Kosten der Kernenergie

5.1. Internalisierte Kosten

In einem Postulat forderte Ständerätin Gisèle Ory, dass die Realkosten der Kernenergie für die Schweiz bestimmt werden. Ein Bericht des Bundesamtes für Energie vom Mai 2008 beantwortet diese Frage mit einer Auswertung der bestehenden Literatur. Die Studie kommt zum Schluss, dass eine seriöse Berechnung der „tatsächlichen“ Kosten der Kernenergie zurzeit nicht erfolgen kann, da verschiedene Kostenelemente nicht, nur vage oder nur mit entsprechenden Annahmen vorliegen. Externe Kosten werden in dieser Studie nicht berücksichtigt (siehe dazu Kapitel 5.2.).

Als Indikator der Gestehungskosten bestehender Kernkraftwerke wurden die letzten Geschäftsberichte der Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt herangezogen. Die Stromgestehungskosten der beiden Kraftwerke liegen demnach zwischen 3.6 und 5.1 Rp./kWh (Tabelle 10) (Prognos 2008). Diese Werte sind jedoch für die Zielstellung der vorliegenden Studie vorsichtig zu interpretieren, da die Geschäftsberichte naturgemäß nur die Kosten im laufenden Jahr und nicht die gesamten Kosten der Kernenergienutzung ausweisen.⁴⁰

Tabelle 10 Struktur der Jahreskosten der Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt jeweils in Prozent und Stromgestehungskosten (Prognos 2008).

| | KKW Gösgen | KKW Leibstadt |
|------------------------------|---------------------|---------------------|
| Betrieb | 49.7% | 29.2% |
| Kernbrennstoff | 14.6% | 7.7% |
| Nukleare Entsorgung | 14.8% | 18.6% |
| Stilllegung und Nachbetrieb | 8.5% | 4.7% |
| Abschreibungen Sachanlagen | 6.2% | 28.2% |
| Finanzerfolg und Gewinn | 6.2% | 11.6% |
| Jahreskosten | 297.3 Mio. CHF | 476.6 Mio. CHF |
| Stromgestehungskosten | 3.64 Rp./kWh | 5.09 Rp./kWh |

Ellipson (2008) beurteilte die Kernkraftwerke Leibstadt und Gösgen aus der Sicht der Finanzmärkte. Die Autoren kamen zum Schluss, dass das Transparenz- und Informationsniveau der finanziellen Berichterstattung allgemein tief und deshalb eine Interpretation der vorliegenden Zahlen ein heikles Thema sei. Die Kernkraftwerke Gösgen und Leibstadt decken der Studie zufolge ihre Kapitalkosten nicht: Beim KKW Leibstadt fehlen 4.2% (entspricht 101.8 Mio. CHF) und beim KKW Gösgen 3.9% (entspricht 38 Mio. CHF). Zudem gibt es beim KKW Leibstadt eine theoretische Eigenkapitallücke in der Höhe von 1894 Mio. CHF (Ellipson 2008).

⁴⁰ Aussage von Walter Wildi, Direktor des Instituts F.A. Forel, Universität Genf.

Abbildung 9 gibt eine Übersicht der relativen Zusammensetzung der Stromgestehungskosten für neue Kernkraftwerke. Die Kapitalkosten haben mit rund 43 Prozent den grössten Anteil an den Stromgestehungskosten. Die gesamten Brennstoffkosten machen einen Anteil von rund 30 Prozent aus; bei den Brennstoffkosten selbst bilden die Entsorgungskosten den grössten Kostenanteil. Der Anteil des Uranpreises an den Stromgestehungskosten insgesamt beträgt rund 5 Prozent (Prognos 2008).

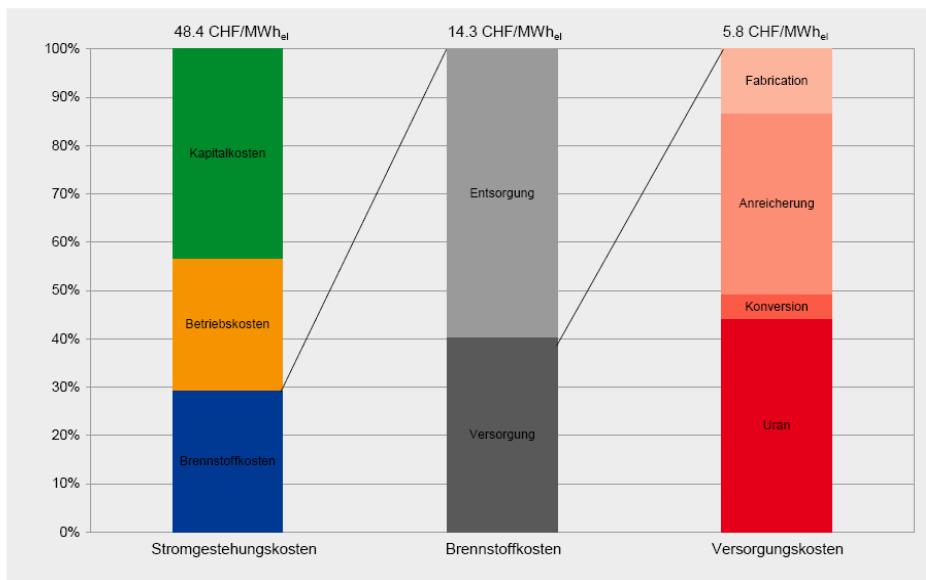


Abbildung 9 Relative Zusammensetzung der Stromgestehungskosten neuer Kernkraftwerke in CHF/MWh_{el} (Realer Zinssatz: 2.5%) (Prognos 2008).

Vergleich zu anderen Energieträgern

Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der Größenordnungen für Stromgestehungskosten weiterer Energieträger. Demnach schneidet die Kernenergie im Kostenvergleich sehr gut ab.

Tabelle 11 Stromgestehungskosten ausgewählter Energieträger (Prognos 2007 und Prognos 2008).

| Energieträger | Stromgestehungskosten [Rp. / kWh] |
|---|--------------------------------------|
| Photovoltaik | 27 – 67 |
| Windenergie | 16 – 21 |
| Geothermie | 7 – 14 |
| Biomasse Holz | 27 – 42 |
| Biogas | 13 – 35 |
| Wasserkraft | 7 – 16 |
| Energieimport | 6 – 9 |
| Erdgas-Kombikraftwerke | 6 – 9 |
| Kernenergie (laufende und neue Anlagen) | 4 – 5 |

5.2. Externe Kosten

Die externen Kosten treten innerhalb der gesamten Prozesskette der Kernenergienutzung von der Uranerzförderung bis zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen auf.⁴¹ In den Energieperspektiven 2035 wurde im Band 3 „Volkswirtschaftliche Auswirkungen“ die aktuelle Literatur zu den externen Kosten der Kernenergie zusammengetragen (Ecoplan 2007). Tabelle 12 gibt eine Übersicht der externen Kosten der Stromproduktion der Kernenergie. Die Bandbreite der externen Kosten ist mit zwischen 0 und 321.1 Rp./kWh sehr gross. Die Studien für die Schweiz weisen externe Kosten in einer Spannbreite von 0.20-35.67 Rp./kWh aus.

Wie das Ausmass der Bandbreiten zeigt, sind die Ergebnisse zu den externen Kosten mit sehr starken Unsicherheiten behaftet. Die Unsicherheiten liegen weit über denen anderer Modellschätzungen (beispielsweise zu den internalisierten Kosten oder zu den CO₂-Emissionen der Kernenergie). Die zusätzlichen Ungenauigkeiten bei der Berechnung der externen Kosten resultieren vor allem durch die Schwierigkeit, den externen Effekten einen monetären Wert beizumessen. Die angegebenen Werte bezüglich der externen Kosten sind daher mit grosser Vorsicht zu interpretieren.

⁴¹ Kosten werden als „extern“ bezeichnet, wenn sie nicht von denjenigen Marktteilnehmern bezahlt werden, die sie verursacht haben.

Die Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse sind in den getroffenen Modellannahmen und der Berechnungsmethodik zu sehen. Der Höchstwert von 321.1 Rp./kWh ist ein Wert, der die Absicherung seltener, grosser Schäden aus versicherungsmathematischen Überlegungen berücksichtigt.⁴² Genau diese Absicherung erklärt die extrem hohen externen Kosten. Der höchste für die Schweiz berechnete Wert liegt bei rund 35 Rp./kWh. Diesem Wert liegt ein Konzept der Risikoaversion zugrunde, d.h. einer überproportionalen Gewichtung grosser Schäden. Wird Risikoneutralität unterstellt erreichen die externen Kosten im gleichen Modell einen Wert von bis zu 0.85 Rp./kWh.

Tabelle 12 Externe Kosten der Stromproduktion mit Kernenergie in Rp./kWh (Ecoplan 2007).

| Studie | Region | Externe Kosten [Rp./kWh] |
|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Ecoplan (1997) | EU | 0.00 – 31 |
| Econcept, Infras (2005) | Schweiz, Risikoneutralität | 0.31 – 0.85 |
| Econcept, Infras (2005) | Schweiz, Risikoaversion | 1.31 – 35.67 |
| Infras / IWW (2004) | EU | 5.25 |
| Umweltbundesamt (2005) | Deutschland | 0.01 – 321.1 |
| Hirschberg / Jakob (1999) | Schweiz | 0.20 – 1.30 |
| European Commission (1999), S. 124 | Deutschland | 0.73 – 0.82 |
| European Commission (1999), S. 98 | Belgien | 0.65 – 0.72 |
| European Commission (1999), S. 413 | Niederlande | 1.15 |
| Krewitt (2002) | Deutschland | 0.32 |
| Suter et al. (2002) | EU | 2.5 |
| Hirschberg et al. (2004) | Deutschland | 0.16 |

Es stellt sich nun die Frage, ob und inwieweit die Risikoaversion in den Modellschätzungen berücksichtigt werden soll. Einerseits kann argumentiert werden, dass die Berechnung des Schadenserwartungswertes meist zu kurz greift, weil dabei die Risikoeinstellung der Bevölkerung nicht berücksichtigt wird (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft 2005). Dem widerspricht die Auffassung, wonach die Monetarisierung der Risikoaversion bei sehr hohen Risiken nicht sinnvoll ist.⁴³

⁴² Weil die Risikohaftpflicht einen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung der externen Kosten hat, werden Berechnungen zur Risikohaftpflicht separat in Kapitel 5.3. aufgezeigt.

⁴³ Stefan Hirschberg (Laboratory for Energy Systems Analysis, PSI Villigen) führt folgende Argumente an: Erstens handelt es sich bei Risikoaversion nicht um eine klassische Externalität. Zweitens macht es wenig Sinn, Risikoaversion mit einem (Punkt-)Wert darzustellen, da es betreffend grossen Unfällen viele Personen mit einer sehr hohen Aversion und viele Personen mit überhaupt keiner Aversion gibt. Drittens gibt es keine gesicherten Befragungen zur Risikoaversion bei nuklearen Unfällen. Die in den Berechnungen eingesetzten Koeffizienten sind daher willkürlich. Viertens existiert gemäss Referenden im In- und Ausland eine Paradoxon: Diejenigen Personen, die in der Nähe von Kernkraftwerken leben (die dem Risiko also am stärksten ausgesetzt sind) sind am wenigsten risikoavers, während diejenigen Personen, die in grosser Entfernung von Kernkraft-

Vergleich zu anderen Energieträgern

Tabelle 13 zeigt eine Übersicht der Grössenordnungen der externen Kosten weiterer Energieträger, wobei auch diese Werte aufgrund der grossen Unsicherheiten mit Vorsicht zu interpretieren sind. Insgesamt ist bei der Kernenergie (zumindest bei einer Monetarisierung der Risikoaversion oder gar dem Einschluss ungedeckter Risiken) von insgesamt höheren externen Kosten als bei den erneuerbaren Energien und von tieferen externen Kosten als bei der fossilen Elektrizitätserzeugung auszugehen.

Tabelle 13 Externe Kosten ausgewählter Energieträger (Ecoplan 2007).

| Energieträger | Externe Kosten [Rp. / kWh] |
|---------------|-------------------------------|
| Photovoltaik | -0.04 – 2.07 |
| Windenergie | 0.00 – 1.37 |
| Biomasse | 0.20 – 8.60 |
| Gas | 0.00 – 315 |
| Wasserkraft | 0.00 – 1.44 |
| Braunkohle | 1.36 – 975 |
| Steinkohle | 0.08 – 750 |
| Kernenergie | 0.00 – 321.1 |

5.3. Risikohaftpflicht

Gemäss dem Kernenergiehaftpflichtgesetz (KHG) haftet der Inhaber einer Kernanlage ohne betragsmässige Begrenzung für die Nuklearschäden, die durch Kernmaterialien in seiner Anlage verursacht werden (Art.3 Abs.1 KHG). Das Gesetz wurde revidiert und die obligatorische Versicherungssumme von 1 Mia. CHF auf 1.8 Mia. CHF erhöht. Dieser Versicherungssumme stehen mögliche monetarisierte Schäden bis zu einer Höhe von 4'300 Mia. Franken gegenüber (vgl. Tabelle 14).

werken leben (die dem Risiko also deutlich weniger ausgesetzt sind) die höchste Risikoaversion aufweisen. Fünftens verursacht die Monetarisierung der Risikoaversion sehr grosse und unkontrollierbare Unsicherheiten.

Tabelle 14 Monetäre Schäden eines schweren Unfalls mit einer Freisetzung grosser Mengen an Radioaktivität (Zweifel & Umbricht 2002).

| Indikator | Schaden |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Physisch Geschädigte | 100 – 200 Mia. CHF |
| Evakuierte (inkl. Flüchtlinge) | 10 Mia. CHF |
| Unterstützungsbedürftige | 1 – 10 Mia. CHF |
| Geschädigte Lebensgrundlagen | 4000 Mia. CHF |
| Sachschäden | 100 Mia. CHF |
| Total | 4200 – 4300 Mia. CHF |

Die Schätzung der Schäden eines Kernschmelzunfalls in Deutschland variiert zwischen 500 Mia. Euro bis 5 Billionen Euro (Umweltbundesamt 2007). Nach Greenpeace liegen die geschätzten Kosten bei einem mittelschweren KKW-Unfall zwischen 10 und 20 Mia. CHF, bei einem schweren KKW-Unfall zwischen 50 und 500 Mia. CHF und bei einem sehr schweren KKW-Unfall (vergleichbar mit Tschernobyl) bei über 4000 Mia. CHF (Greenpeace 2008a). Alle Studien kommen also zu einem ähnlichen Ergebnis, wonach von Maximalschäden in Höhe von ca. 4000 Mia. CHF ausgegangen werden muss.

Selbst die angepasste obligatorische Versicherungssumme von 1.8 Mia. CHF würde demnach weniger als ein halbes Promille der möglichen Schadenssumme decken. Nach dem Kernenergiehaftpflichtgesetz muss der Inhaber mit seinem Betriebsvermögen für die restlichen Schäden aufkommen. Im besten Fall (mit Rückgriff auf die Betreibergesellschaften, was im Gesetz nicht vorgesehen ist) können weitere 3.5 Promille der Schadenssumme gedeckt werden (Greenpeace 2008b). Reicht die Schadensdeckung nicht aus, springt nach Möglichkeit der Bund ein. Einen sehr schweren Schaden könnte und würde aber höchstwahrscheinlich auch der Bund nicht decken.⁴⁴ Der Schaden bleibt damit an den Geschädigten hängen.

Eine vom Bundesamt für Energie in Auftrag gegebene Studie fand heraus, dass die Bevölkerung bereit wäre, einen Mehrbetrag von 0.12 Rp./kWh zu bezahlen, damit die Haftpflichtdeckung erhöht werden kann. Dieser Betrag würde reichen, um eine Deckung von rund 4 Mia. CHF – also ein Promille der errechneten möglichen Schadensumme – zu gewährleisten (Zweifel & Schneider 2002).

⁴⁴ Auffassung von Walter Wildi, Direktor des Instituts F.A. Forel, Universität Genf.

5.4. Kostenentwicklung der Brennstoffe

Über die langfristige Verfügbarkeit von Uran werden intensive Diskussionen zwischen Kernkraftbefürwortern und -gegnern geführt. Dabei geht es insbesondere um die Frage, ob die Uranvorkommen für eine langfristige Kernenergienutzung oder sogar für eine weltweite Renaissance der Kernenergie mit massivem Ausbau der Kernkraftwerke ausreichen.

Die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) und die Nuclear Energy Agency (NEA) veröffentlichen jährlich die Statistiken über den weltweiten Abbau von Uran. Die Energy Watch Group hat Ende 2006 im Bericht „Uranium Resources and Nuclear Energy“ auf Basis dieser Daten einen kritischen Überblick der vorhandenen Uranressourcen erstellt.

Die IAEA teilt die gefundenen Uranvorräte in drei Kostenklassen⁴⁵ ein: <40\$/kg, <80\$/kg und <130\$/kg. In dieses Klassifizierungsschema werden alle bisher gefundenen Uranvorräte eingeordnet, so dass diese Kostenklassifizierung als ein Schema zur Unterteilung der insgesamt gefundenen Ressourcen dient. Die gefundenen Uranressourcen werden nochmals unterteilt in sogenannte „Reasonably Assured Resources“ (RAR) und „Inferred Resources“ (IR).

Abbildung 10 fasst die aktuelle Versorgungslage mit Uran zusammen (Energy Watch Group 2006). Die dunkle Fläche basiert auf den bestätigten Reserven (Reasonably Assured Resources <40\$/kg Uran), die etwas hellere Fläche darüber repräsentiert das mögliche Produktionsprofil, wenn Reasonably Assured Ressources (RAR) <130\$/kgU gewonnen werden können. Die oberste helle Fläche beinhaltet alle RAR plus die IR. Die schwarze Linie gibt die Urannachfrage der 439 kommerziell in Betrieb stehenden Reaktoren wieder. Sie beträgt zurzeit rund 67'000 Tonnen Uran pro Jahr. Ende 2007 lieferte die weltweite Uranproduktion mit rund 41'000 Tonnen ca. 60% dieses Bedarfs. Die Lücke zwischen Produktion und Bedarf wird durch sekundäre Quellen wie Lagerbestände, verdünntes Uran aus militärischen Beständen, der Wiederaufarbeitung von Brennelementen oder der erneuten Anreicherung von Uran-235 aus den Rückständen der Anreicherung gedeckt.

⁴⁵ Die Kosten sind als Gewinnungskosten zu verstehen und entsprechen dem Aufwand einschliesslich der Erschliessungskosten und nicht den Marktpreisen von Uran.

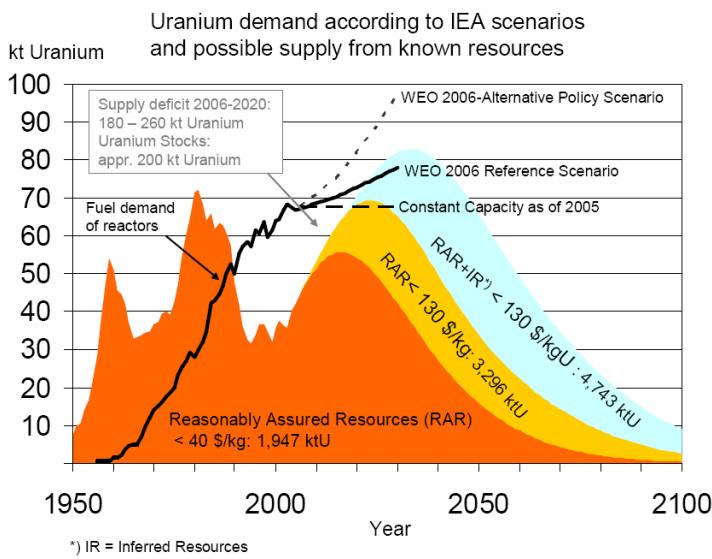


Abbildung 10 Geschicht und Vorhersage der Uran-Produktion basierend auf ausgewiesenen Resourcen (Energy Watch Group 2006).

Die Vorhersage zeigt die Urannachfrage bis 2030 basierend auf dem „World Energy Outlook 2006“ der Internationalen Energiebehörde (International Energy Agency IEA 2006). Ab der Periode 2015 bis 2030 entsteht zu den angenommenen Preisen ein Uranlieferungsengpass, wenn die heute bestehenden Lager zu Ende gehen und die Produktion (neue Quellen) nicht gesteigert werden kann. Die weltweite Uranförderkapazität müsste innerhalb von 10 Jahren um rund 50% (entsprechend rund 25'000 Tonnen Uran) ausgebaut werden.⁴⁶

Mittlerweile kann die neueste Ausgabe des OECD/NEA Red Book in die Betrachtungen einbezogen werden (OECD / Nuclear Energy Agency NEA 2008). Die Studie erfasst zum Stichtag 1. Januar 2007 den Status der Uranversorgung weltweit. Im Vergleich zur Ausgabe von 2005 wird bei den identifizierten Uranressourcen im Preisbereich bis 130 USD/kg Uran (RAR + IR) ein Zuwachs von 15% ausgewiesen. Die Reserven in diesem Preisbereich ergeben beim heutigen jährlichen Bedarf eine statistische Reichweite der identifizierten Ressourcen von rund 80 Jahren. Wendet man diese neuen Erkenntnisse auf die Grafik der Energy Watch Group an, ergibt sich eine Verschiebung der Kurvenmaxima um rund 13% nach oben. Das Red Book geht weiterhin von unentdeckten Ressourcen in Höhe von 10'500'000 t aus, auf deren Existenz ausgehend von geologischen Analogien geschlossen wird.

Die Recherchearbeiten von Mudd und Diesendorf (2008) zeigen, dass sich die bekannten Uranressourcen in den letzten 50 Jahren in etwa verfünfacht haben. Dabei ist eine Korrela-

⁴⁶ Die Vorlaufzeiten für eine Erhöhung der Kapazitäten sind lang. Ein wichtiges Projekt bildet die von der Firma Cameco initiierte Förderung der Mine „Cigar Lake“ in Kanada, die rund ein Viertel dieses notwendigen Ausbaus leisten soll. Im Oktober 2006 ereignete sich allerdings ein Wassereinbruch, der die Produktionssteigerung gefährdet (Energy Watch Group 2006). Bis heute konnte die Mine noch nicht weiter ausgebaut werden.

tion zwischen der Explorationstätigkeit und dem Zuwachs an bekannten Ressourcen festzustellen. Zu bedenken gilt es allerdings gemäss Mudd und Diesendorf, dass der Urangehalt des Erzes im Mittel stetig sinkt und das Erz in tiefer liegenden Erdschichten vorkommt, was einen erhöhten Energie- und Wasserbedarf bei der Förderung nach sich ziehen wird (Mudd & Diesendorf 2008).

In der Ressourcenökonomie wird davon ausgegangen, dass der Rohstoff nicht ausgeht, sondern früher oder später ein Preis für die Knappheit des Rohstoffes bezahlt werden muss. Steigende Preise für Uran wären die Folge, was wiederum die Anreize für die Suche und Erschließung bisher nicht genutzter Uranvorkommen steigert. Potentielle zusätzliche Uranquellen sind nach Herring (2004):

- Erzlagerstätten: Bisher unwirtschaftliche Lagerstätten könnten nutzbar gemacht werden.
- Phosphate oder Goldvorkommen: Uran entsteht als Nebenprodukt auch beim Abbau anderer Rohstoffe, wie beispielsweise bei Phosphaten. Bei einem erhöhten Preis wird dieser Abbau wirtschaftlich oder ist es zum Teil bereits heute.
- Abgereichertes Uran: Ab einem gewissen Marktpreis lohnt es sich, das früher bei der Anreicherung zurückgebliebene, sogenannte abgereicherte Uran erneut einem Anreicherungsprozess zu unterziehen, um den Restbestand an spaltbarem Uran zu nutzen (siehe Anhang 11).
- Gewinnung aus Meerwasser: Geht der Uranpreis deutlich nach oben, lohnt sich in Zukunft auch die Gewinnung von Uran aus Meerwasser.

Die Kosten für Uran an den gesamten Stromgestehungskosten der Kernkraft liegen heute bei ungefähr 5 Prozent (siehe Kapitel 5.1.). Selbst bei stark steigenden Preisen von Uran werden daher keine Kostenexplosionen bei den Stromgestehungskosten durch Kernenergie erwartet. Im Gegensatz dazu ist der Kostenanteil der fossilen Brennstoffe an der erzeugten Kilowattstunde sehr hoch. Bei langfristig steigenden Primärenergiepreisen dürfte sich daher die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der Kernenergie verbessern.

6. Übersicht der Argumente

Ziel der „Literaturübersicht Kernenergie“ war es, Argumente für und gegen die Nutzung von Kernenergie zu erheben. Dazu wurde Literatur ausgewertet und ergänzend wurden Expertengespräche geführt.

Die Literaturstudie Kernenergie zielt nicht darauf ab, die so erhobenen Argumente zu bewerten. Im Folgenden sind Argumente einander gegenübergestellt, die unterschiedlich abgesichert oder wissenschaftlich fundiert sind. Jeder Leserin und jedem Leser bleibt es vorbehalten, sich selbst eine Meinung zu den Literaturergebnissen zu bilden.

Die Auflistung der Ergebnisse erfolgt anhand der in Kapitel 1.1. genannten Diskussionspunkte. Dabei werden zu jedem Argument zunächst die Literaturergebnisse, mit denen die Meinung der Kernkraftbefürworter gestützt wird, dargestellt. Anschliessend werden die Literaturergebnisse gelistet, mit denen die Argumente der Kernkraftgegner untermauert werden. Die Wahl dieser Reihenfolge ist rein zufällig und soll nicht suggestiv wirken.

Da es sich um eine Übersicht handelt, können die Ergebnisse und die Hintergründe, die zu diesen Ergebnissen führen, nicht immer vollständig dargelegt werden. Eine detaillierte Be trachtung der entsprechenden Stellen im Bericht oder der Originalliteratur wird ausdrücklich empfohlen. Die Zusammenstellung beinhaltet hierfür jeweils einen Verweis auf die Literatur und das Berichtskapitel.

Einige Argumente beziehen sich auf den Vergleich mit anderen Formen der Elektrizitätsgewinnung. Dieser Vergleich wird nicht durchgehend gezogen, da dies den Rahmen der Studie deutlich gesprengt hätte. Es wird vorausgesetzt, dass der Leserin und dem Leser bekannt ist, dass auch Alternativen zur Kernenergienutzung mit teilweise ähnlichen Problemen konfrontiert sind.

1. Diskussionspunkt

Standpunkt der Befürworter: Kernkraftwerke sind ausreichend sicher

Die Schweizer Kernkraftwerke sind sehr sichere Anlagen – auch im internationalen Vergleich.

Die Probabilistischen Sicherheitsanalysen ergeben für die Schweizer Kernkraftwerke Eintretenswahrscheinlichkeiten von Kernschäden zwischen 10^{-5} und 10^{-6} pro Reaktorjahr. Nach Herstellerangaben liegen die Kernschadenswahrscheinlichkeiten für neue Reaktoren bei ca. 10^{-7} . Die Wahrscheinlichkeiten bewegen sich damit unter dem internationalen Richtwert der Internationalen Atomenergiebehörde von 10^{-4} pro Reaktorjahr (für Altanlagen; 10^{-5} für Neuanlagen).

HSK 1999 und 2007,
Herstellerinforma-
tionen (siehe Anhang
5), Kapitel 2.1.5

Sowohl laufende als auch neue Anlagen verfügen über Systeme und Prozeduren, um auch im unwahrscheinlichen Fall einer Kernschmelze noch eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen zu verhindern. Die Wahrscheinlichkeit einer Radioaktivitätsfreisetzung, die eine Evakuierung der Bevölkerung erforderlich machen würde, liegt dadurch ein bis zwei Größenordnungen unter der jeweiligen Kernschadenshäufigkeit. Bei Neuanlagen arbeiten diese Systeme selbsttätig, während bei den laufenden Werken Notfallstäbe sicherheitsgerichtete Aktionen einleiten müssen.

Durch laufende Investitionen in die Sicherheit werden die Schweizer Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der weltweiten Betriebserfahrung immer auf dem neusten Stand von Wissenschaft und Technik gehalten.

Die Kernanlagen in der Schweiz erfüllen strenge rechtliche Vorgaben bezüglich ihrer Sicherheit, und die Sicherheit wird durch eine starke, unabhängige Aufsichtsbehörde kontrolliert

Die rechtlich verankerten Anforderungen an die Sicherheit der Kernanlagen sind in der Schweiz im Vergleich zu den Anforderungen an andere technische Anlagen und Systeme ebenso wie im internationalen Vergleich hoch (vgl. oben). Beispielsweise unterliegt das Personal der Kernanlagen hohen, rechtlich verankerten Anforderungen an Qualifikation, Ausbildung und Eignung. Die Kraftwerksbetreiber ergreifen Massnahmen, wie z.B. regelmässige Schulungen, um die Wahrscheinlichkeit von Fehlern durch die Bedienmannschaft so klein wie möglich zu halten und um den richtigen Umgang mit sicherheitsrelevanten Situationen zu gewährleisten.

Die Sicherheit der Schweizer Kernanlagen wird vom Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) regelmässig überprüft und bei Bedarf werden konsequent Massnahmen angeordnet.

Durch die öffentliche Kommunikation der Ereignisse bei Abweichungen vom Normalbetrieb und Störfällen wird Transparenz über die Sicherheit von Kernanlagen gewährleistet.

Abweichungen vom Normalbetrieb und Störfälle unterliegen der Meldepflicht und werden vom ENSI veröffentlicht. Auf internationaler Ebene wird der Schweregrad von Vorkommnissen in Kernanlagen auf der International Nuclear Event Scale (INES) angegeben. Durch diese Skala wird die Bedeutung von Störfällen in eine international gemeinsame Perspektive gesetzt. Die Vor-

Gesetzliche Vorschriften (KEG, VAPK), Kapitel 2.1.2, Kapitel 2.1.8

HSK 2008a, IAEA 2008, Kapitel 2.1.4

kommissionen werden durch die Kernkraftwerksbetreiber und die nuklearen Aufsichtsbehörden im Detail analysiert. Wenn nötig werden Verbesserungsmassnahmen angeordnet.

Standpunkt der Gegner: Der Betrieb von Kernkraftwerken ist zu riskant

Die Risikoanalyse bei Kernkraftwerken ist mit vielen Unsicherheiten behaftet, und mit den neu geplanten Anlagentypen existiert weltweit erst wenig Betriebserfahrung

Trotz den grossen Sicherheitsvorkehrungen besteht ein Restrisiko (Risiken mit geringer Eintretenswahrscheinlichkeit und hohem Schadenspotential) für Umwelt und Bevölkerung ausserhalb der Kernkraftwerke. Die Probabilistischen Sicherheitsanalysen von Kernkraftwerken bilden die Realität nur unzureichend ab. Eine kompetente Kontrolle durch die Aufsichtsbehörden wird dadurch erschwert, dass zur Beurteilung der Sicherheit von Kernanlagen Detailwissen in einem breiten Spektrum von Fachgebieten erforderlich ist. Für neue Reaktoren ist aufgrund der geringen Betriebserfahrung mit grösseren Unsicherheiten bezüglich der Risiken zu rechnen.

Walter Wildi, Kapitel
2.1.6

Kernkraftwerke beinhalten ein Restrisiko. Es besteht ein Potential für grosse, teilweise irreversible Schäden

Das Restrisiko wird durch die Möglichkeit eines grösseren Erdbebens erhöht. Das maximale Schadenpotential eines grossen Unfalls ist in Kernkraftwerken sehr hoch. Im Vergleich zu anderen technischen Anlagen und Systemen sind bei Unfällen in Kernkraftwerken insbesondere Langzeitschäden von grosser Bedeutung. So wird durch einen sehr schweren Unfall in einer Kernanlage bis zu 25-mal mehr Fläche geschädigt als durch einen sehr schweren Unfall bei einer grösseren Stauanlage. Teile der betroffenen Flächen sind über mehrere Jahrhunderte nicht bewohnbar und nicht oder nur eingeschränkt nutzbar. Im Falle eines sehr schweren Unfalls ist bei den unmittelbar betroffenen Menschen von irreversiblen genetischen Schäden auszugehen.

BABS 2003, Kapitel
2.1.7

Die Bewertung des Einflusses des Faktors Mensch bei Sicherheitsanalysen ist mit grossen Unsicherheiten verbunden

Der Faktor Mensch spielt bei der Sicherheit von Kernanlagen eine wichtige Rolle. Die Angabe von Zahlenwerten für die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehlhandlungen in Kernkraftwerken ist nur mit grossen Unsicherheiten möglich. Der Ausschluss des

Öko-Institut e.V. 2002,
Kapitel 2.1.8

Faktors Mensch auf mögliche Schäden in einem Kernkraftwerk ist nicht möglich.

Die INES-Skala ist nicht geeignet, um sicherheitsrelevante Ereignisse in Kernkraftwerken zu bewerten

Viele sicherheitsrelevante Ereignisse finden jedes Jahr überall auf der Welt in allen Typen von Kernkraftwerken und Kernreaktoren statt. Die INES-Skala ist nicht genügend aussagekräftig, um die Ereignisse zu bewerten.

Kastchiev et al. 2007,
Kapitel 2.1.4

2. Diskussionspunkt

Standpunkt der Befürworter: Kernkraftwerke sind sicher gegen Sabotage, Terrorismus und Krieg

Die Schweizer Kernkraftwerke sind durch bauliche, technische und organisatorische Massnahmen gut vor Terrorangriffen geschützt

Analysen der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) zeigen eine geringe Wahrscheinlichkeit für die Freisetzung von Radioaktivität bei einem Absturz gängiger Flugzeugtypen auf ein Schweizer Kernkraftwerk. Die Wahrscheinlichkeiten für eine grössere Freisetzung nach erfolgtem Angriff liegen zwischen 10^{-2} (KKM, KKB) und 10^{-3} (KKG, KKL).

HSK 2003, Herstellerinformationen (siehe Anhang 5), Georg Schwarz, Kapitel 2.3

Neue Kernkraftwerke sind so ausgelegt, dass die Containments dem Absturz von Passagiermaschinen und Kampfjets standhalten.

Standpunkt der Gegner: Kernkraftwerke stellen bei Sabotage, Terrorismus und Krieg eine hohe Gefahr dar

Kernkraftwerke bergen ein sehr grosses Schadenpotential und stellen damit ein attraktives Ziel für Terroristen dar, dem kein ausreichender Schutz gegenübersteht

Gemäss einer deutschen Studie wären – insbesondere durch einen Flugzeugabsturz oder eine gezielte Attacke auf das Kernkraftwerk Biblis – von einer gravierenden Freisetzung von radioaktiven Stoffen auszugehen. Mangels Vorwarnzeit wäre mit enormen Schäden an Mensch und Umwelt zu rechnen. Anschliessende Evakuierungen und Umsiedlungen auf Flächen in der Grössenordnung von $10'000 \text{ km}^2$ würden notwendig.

Öko-Institut e.V. 2007,
Kapitel 2.3

3. Diskussionspunkt

Standpunkt der Befürworter: Das Proliferationsrisiko wird ausreichend beherrscht

Das Proliferationsrisiko wird in internationaler Zusammenarbeit wirksam beherrscht

Die 187 Unterzeichnerstaaten des Atomsperervertrags müssen ihre Anlagen in regelmässigen Abständen durch die IAEA daraufhin kontrollieren lassen, dass kein Nuklearmaterial missbraucht wird.

Labor Spiez 2008,
Kapitel 2.4

Der für klassische Atomwaffen notwendige Anteil von 97% des spaltbaren Plutoniumisotops Pu₂₃₉ wird bei abgebrannten Brennelementen von Leichtwasserreaktoren nicht erreicht. Der Anteil liegt bei nur etwa 50-60%. Die Verwendung von spaltbarem Material aus Kernbrennstoffen für Waffen mit verminderter Sprengkraft ist sehr unwahrscheinlich, da Aufwand und Ertrag stark im Ungleichgewicht sind. Die Wirkung von Waffen mit verminderter Sprengkraft kann viel günstiger erreicht werden.

Grawe et al. 2005,
Philipp Häggi, Kapitel
2.4

Die Schweiz leistet mit dem Wiederaufbereitungs-Moratorium einen Beitrag zur Verminderung des Proliferationsrisikos

Seit Juni 2006 ist in der Schweiz ein 10-jähriges Moratorium in Kraft, welches den Schweizer Kernkraftwerksbetreibern verbietet, abgebrannte Brennelemente in Wiederaufbereitungsanlagen rezyklieren zu lassen.

Art. 106 Abs. 4 KEG,
Kapitel 2.4

Standpunkt der Gegner: Das Proliferationsrisiko wird nicht ausreichend beherrscht

Weltweit kann keine ausreichende Kontrolle des Proliferationsrisikos sichergestellt werden

Weltweit werden zurzeit tausende Tonnen von Plutonium durch Wiederaufbereitungsanlagen und Mixed Fuel Produktionsanlagen (MOX) gehandhabt. Die Umwandlung von rund 0.1% der jährlich verarbeiteten Menge würde für den Bau einer Atombombe reichen.

WISE 2003, Kapitel
2.4

Auch mit Spaltstoff, der durch nicht thermisch spaltbare Nuklide verunreinigt ist, ist es möglich, Kernwaffen zu produzieren, wenngleich nur mit deutlich verminderter Sprengkraft.

Carson Mark 1990,
Kapitel 2.4

Die militärische und die zivile Nutzung der Kerntechnologie sind im Allgemeinen nicht trennbar, weil das notwendige Know-how

Sabine von Stockar,
Kapitel 2.4

bei beiden Nutzungsformen über weite Strecken gleich ist. Durch die zivile Nutzung der Kernenergie wird die Wissensübertragung der Technologie, die dann auch für die militärische Nutzung eingesetzt werden kann, vereinfacht. So betreut beispielsweise die französische Firma AREVA, von der Schweizer Kernkraftwerke ihre Uranbrennstäbe beziehen, neben den zivilen Aufträgen auch das französische Atombombenarsenal.

4. Diskussionspunkt

Standpunkt der Befürworter: Mit der Nutzung der Kernenergie wird dem Klimawandel entgegen gewirkt

Die Kernenergie erlaubt es, Elektrizität mit geringem CO₂-Ausstoss zu erzeugen

Die Kernenergie schneidet im Vergleich mit anderen Arten der Elektrizitätsgewinnung bezüglich der CO₂-Bilanz gut ab. Im Durchschnitt liegen die Treibhausgasemissionen der Kernenergie im Bereich der Stromerzeugung durch Wind- und Wasserkraft. Es fallen deutlich weniger Emissionen als bei der fossilen Elektrizitätserzeugung an. In der Zukunft werden die spezifischen CO₂-Emissionen abnehmen, da bei der Urananreicherung international ein Übergang von der energieintensiven Gasdiffusionstechnik zur weitaus günstigeren Ultrazentrifuge erfolgt.

Sovacool 2008, Dones
2004a, Öko-Institut
e.V. 2007b, Kapitel
3.1.1

Durch den erheblichen Anteil der Kernenergie an der Schweizer Elektrizitätserzeugung leistet Kernenergie einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz

Dank eines Strommixes aus 55% Wasserkraft und 40% Kernenergie erzeugt die Schweiz ihre Elektrizität mit geringem CO₂-Ausstoss. Der internationale Vergleich zeigt, dass in der Schweiz ohne die Nutzung der Kernenergie heute vermutlich ein stärkerer Einsatz von fossilen Energieträgern in der Stromproduktion notwendig wäre. Daher leistet die Kernenergie einen Beitrag zum Klimaschutz. In Zukunft wird der Anteil der Elektrizität am Gesamtenergieverbrauch voraussichtlich weiter ansteigen. Dadurch wächst die Bedeutung der Kernenergie für den Klimaschutz.

Nuklearforum Schweiz
2008a, Kapitel 3.1.2

Das weltweite CO₂-Reduktionspotential der Kernenergie wird auf ca. 2 Gt/a von insgesamt etwa 38 Gt/a geschätzt, wobei die CO₂-Minderungskosten mit 10 EUR/t CO₂ im unteren Bereich des Spektrums der Energieerzeugungstechnologien liegen.

Mc Kinsey & Company
2009, Kapitel 3.1.2

Standpunkt der Gegner: Die Nutzung der Kernenergie kann keinen wesentlichen Beitrag zur Verminderung des Klimawandels leisten

Kernenergie deckt weltweit weniger als 3% des Endenergieverbrauchs und trägt daher nicht wesentlich zum Klimaschutz bei

Die Kernenergie deckt weltweit knapp 17% des Strombedarfs und weniger als 3% des Endenergiebedarfs ab. Selbst um diesen bescheidenen Anteil zu behaupten, müsste die Kernkraft viel stärker ausgebaut werden als dies heute der Fall ist. Eine Vervielfachung des Beitrags wäre jedoch nötig, damit die Kernkraft einen relevanten Beitrag zur Lösung des Klimaproblems leisten könnte. Selbst Institutionen, die der Kernenergie nahe stehen, schätzen eine solche Vervielfachung der Stromproduktion aus Kernenergie als technisch, ökonomisch und politisch unrealistisch ein.

Patrick Hofstetter, Kapitel 3.1.2

Ein Wechsel zu erneuerbaren Energien und Energieeffizienzmassnahmen leistet einen wesentlicheren Beitrag zur Verminderung des Klimawandels als die Kernenergie

Es ist eine politische und ökonomische Frage, ob die künftige Stromversorgung der Schweiz ausschliesslich auf erneuerbaren Energien und hoher Energieeffizienz beruhen soll. Technisch ist dies möglich (Bundesamt für Energie, Energieperspektiven, Szenario IV E). Da es auch aus ökonomischen Gründen keinen Bedarf für Kernenergie gibt, muss auf diese Risikotechnologie verzichtet werden. Es stehen genügend andere klimaverträgliche Technologien zur Verfügung.

Patrick Hofstetter,
Öko-Institut e.V. 2007,
Kapitel 3.1.2

Ein Franken investiert in Energieeffizienzmassnahmen ist 3 bis 10-mal klimawirksamer als ein Franken investiert in ein neues Kernkraftwerk.

Die Produktion von Grundlaststrom mit sehr hohen Investitionskosten in Kernkraftwerken konkurriert sowohl die Förderung von Stromeffizienz wie auch den Bau von ebenfalls hochinvestiven erneuerbaren Energiesystemen. Einerseits kann der gleiche Franken nur einmal investiert werden, andererseits muss der Überschussstrom zu Offpeak-Zeiten Abnehmer finden, was zu neuen Stromanwendungen führt, die zu Vollkosten kein Marktpotential hätten (bspw. Elektroheizungen). Somit findet real keine Reduktion der Treibhausgasemissionen statt, da ebenfalls emissionsarme Technologien behindert bzw. verdrängt werden.

Amory B. Lovins et al
2008, Patrick Hofstetter, Kapitel 3.1.2

5. Diskussionspunkt

Standpunkt der Befürworter: Eine Lösung für die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist absehbar

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist technisch so lösbar, dass die rechtlich verankerten Grenzwerte eingehalten werden

Mit dem Entsorgungsnachweis wurde gezeigt, dass die sichere und dauerhafte Entsorgung radioaktiver Abfälle machbar ist. Der Entsorgungsnachweis wurde von der Nagra eingereicht, von der HSK sowie von weiteren unabhängigen schweizerischen und internationalen Gremien kritisch geprüft und vom Bundesrat genehmigt.

Nagra 2002, Kapitel 3.2.2

Mit dem Sachplanverfahren wurde in der Schweiz ein zielführender Weg zur Entsorgung begangen

Mit dem Sachplan geologische Tiefenlager wird in der Schweiz erfolgversprechend auf Standorte für geologische Tiefenlager hingearbeitet. Das Sachplanverfahren, das stark auf die Zusammenarbeit aller Betroffenen ausgerichtet ist, entspricht dem aktuellen Stand des Wissens und bezieht internationale Erfahrungen mit ein. Für die Standortwahl, die in drei Etappen erfolgt, ist ein klarer Zeitplan vorgegeben.

BFE 2008d, Kapitel 3.2.4

Standpunkt der Gegner: Eine Lösung für die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist nicht absehbar

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist nicht lösbar, da über die langen zu betrachtenden Zeiträume keine ausreichend sicheren Prognosen möglich sind

Die Lagerung radioaktiver Abfälle über Zeiträume bis zu einer Million Jahre ist mit Unsicherheiten verbunden, die sich nicht lösen lassen. Offen ist vor allem, wie menschliche oder nachmenschliche Lebensformen über derart lange Zeiträume daran gehindert werden können, in ein Lager einzudringen. Die Problematik der ungewöhnlich grossen Zeiträume ist in den vorliegenden Studien der Nagra nicht abschliessend durchdacht worden. Die Fähigkeit, alle Teile des Konzeptes jederzeit überdenken und allenfalls an neue Gegebenheiten und Erkenntnisse anpassen zu können, ist nicht gegeben.

SES 2005, Kapitel 3.2.2

Die im Kernenergiegesetz vorgeschriebene Erhaltung der Kenntnisse über den für lange Zeiträume gelagerten radioaktiven Abfall und die Kennzeichnung eines geologischen Tiefenlagers ist noch nicht geklärt.

Art. 40 Absatz 6 Kernenergiegesetz, Kapitel 3.2.4

Innerhalb der Gesellschaft bestehen unterschiedliche Meinungen, wie die Entsorgung radioaktiver Abfälle zu lösen ist. Eine Lösung, die auf breite Akzeptanz stösst und damit auch praktisch umsetzbar ist, zeichnet sich nicht ab

51% der Schweizer Bevölkerung sind der Meinung, dass es keine wirklich sichere Möglichkeit zur Lagerung von hochradioaktiven Abfällen gibt. Befürchtungen bestehen vor allem in Bezug auf Beeinträchtigungen von Umwelt und Gesundheit.

BFE 2008c, Kapitel 4.1

6. Diskussionspunkt

Standpunkt der Befürworter: Die Schweizer Bevölkerung hat sich für die Nutzung der Kernenergie entschieden

Die Nutzung der Kernenergie ist in der Schweiz demokratisch – durch mehrere Volksabstimmungen sogar direktdemokratisch – legitimiert.

Bisher wurden auf Bundesebene alle Initiativen, die einen Ausstieg aus der Kernenergienutzung verlangten, abgelehnt (unter anderem „Strom ohne Atom“ und „Moratorium Plus“).

Kapitel 4.1

Die Zustimmung für die Kernenergie wird durch Umfragen bestätigt

Die Ergebnisse der Eurobarometer-Umfragen weisen darauf hin, dass die Zustimmung zur Kernenergienutzung in Europa von 2005 bis 2008 kontinuierlich zugenommen hat. 2006 waren 53% der Befragten der Meinung, der Nutzen der Kernenergie sei grösser als die Risiken. Gemäss einer wiederholt durchgeföhrten repräsentativen Bevölkerungsbefragung von swissnuclear hat sich auch die allgemeine Stimmung in der Schweizer Bevölkerung gegenüber der Kernenergie positiv entwickelt.

Eurobarometer 2008,
swissnuclear 2008a,
Kapitel 4.1

Standpunkt der Gegner: Die Nutzung der Kernenergie spaltet die Gesellschaft

Die Bevölkerung einiger Regionen der Schweiz spricht sich explizit gegen die Kernenergie aus

Im Kanton Basel-Landschaft existiert seit 1979 ein Gesetz, dass die Behörden verpflichtet, mit allen ihnen zur Verfügung stehenden rechtlichen und politischen Mitteln darauf hinzuwirken, dass auf dem Kantonsgebiet oder in dessen Nachbarschaft keine Kernkraftwerke, Aufbereitungsanlagen oder Lagerstätten für mittel- und hochradioaktiven radioaktiven Abfall errichtet werden. Die Verfassung des Kantons Genf verpflichtet die Regierung dazu, Kernkraftwerke auf Kantonsgebiet und in der Nachbarschaft zu verhindern. Am 30. November 2008 stimmten 76,4 Prozent des Stimmvolkes der Stadt Zürich dafür, in der Gemeindeordnung festzuhalten, dass die Stadt sich an keinen Neubauten von Kernkraftwerken beteiligen darf und auf neue Bezugsrechte von Elektrizität aus Kernkraftwerken verzichtet.

Gesetz über den Schutz der Bevölkerung vor Atomkraftwerken, Constitution de la République et canton de Genève, Kapitel 4.1

Die Mehrheit der Bevölkerung lehnt die Nutzung der Kernenergie ab

Generell wird die Nutzung von Kernenergie von vielen Personen stark mit Risiken und Gefahren verbunden. Nur 40% der Schweizer unterstützen die Nutzung der Kernenergie explizit, 52% sprechen sich gegen die Nutzung der Kernenergie aus.

Eurobarometer 2007, BFE 2008c, Kapitel, 4.1

Befragt nach dem gewünschten Strommix spricht sich die Mehrheit der Schweizer Haushalte für den folgenden Strommix aus: 38% Wasserkraft, 40% Solar-, Wind- oder Biomassestrom, 5% Kernenergie, 5% Strom aus Abfällen, 2% fossile Energieträger und 10% andere.

BFE 2007, Kapitel 4.1

7. Diskussionspunkt

Zur ethischen Beurteilung der Kernenergienutzung liegen bisher nur wenige Untersuchungen vor. In der Ethik lassen sich zwei Grundpositionen unterscheiden: Der Deontologie zufolge hat jede Person ein moralisches Recht, nicht geschädigt zu werden. Dieses Recht gilt unabhängig von dem Nutzen, der anderen Menschen oder der Gesellschaft durch eine risikante Tätigkeit entsteht. Dem Utilitarismus zufolge ist die Richtigkeit einer Handlung ausschliesslich aufgrund ihrer Folgen zu beurteilen. Es muss die Handlungsmöglichkeit gewählt werden, die voraussichtlich die besten Folgen hat. Ein hoher Nutzen rechtfertigt es demnach, auch höhere Risiken einzugehen. Die schweizerische Rechtsordnung spiegelt beide Grundpositionen wider. Viele Befürworter der Kernenergienutzung neigen eher zu einer utilitaristischen, viele Gegner eher zu einer deontologischen Position.

Standpunkt der Befürworter: Die Nutzung der Kernenergie ist ethisch begründet

Die Kernenergie bietet ein hohes Mass an Nachhaltigkeit. Bei der Nutzung der Kernenergie ist intergenerationale Gerechtigkeit zudem durch finanziellen Ausgleich für kommende Generationen gewährleistet

Die Nutzung der Kernenergie ist im Vergleich zu anderen Energieträgern nachhaltig, weil sie eine geringe spezifische Beeinflussung der Umwelt, ein niedriges Unfallrisiko, eine langfristig gesicherte Rohstoffversorgung und eine gute Wirtschaftlichkeit vereint.

Internationale Länderkommission Kerntechnik ILK 2004

Die rechtlichen Vorgaben (z.B. in der Kernenergie- und Strahlenschutzgesetzgebung sowie daraus abgeleiteten Richtlinien oder aus internationalen Abkommen) und deren Umsetzung (z.B. Kontrollen durch eine starke und unabhängige Aufsichtsbehörde oder das Einholen von Zweitmeinungen als Grundlage für wichtige Entscheidungen) gewährleisten eine nachhaltige Nutzung der Kernenergie in der Schweiz.

Kernenergie- und Strahlenschutzgesetz

In der Schweiz werden die Kosten für die Entsorgung aller radioaktiven Abfälle, die bei der Nutzung der Kernenergie anfallen, durch den Stilllegungs- und Entsorgungsfonds gedeckt. Es werden keine finanziellen Lasten auf kommende Generationen übertragen.

Verordnung über den Stilllegungs- und Entsorgungsfonds für Kernanlagen (SEFV) 2007, Kapitel 4.2

Standpunkt der Gegner: Die Nutzung der Kernenergie ist ethisch nicht begründbar

Die Nutzung der Kernenergie ist wegen des hohen und langwährenden Gefahrenpotentials der radioaktiven Abfälle und wegen der Ausbeutung indigener Bevölkerungsgruppen ethisch nicht begründbar

Die Nutzung der Kernenergie ist nicht nachhaltig, weil sie die Umwelt belastet, den sozialen Frieden gefährdet und ökonomisch nicht gerechtfertigt ist. Insbesondere ist die Erzeugung von Abfällen, die ein hohes, über lange Zeiträume anhaltendes Gefahrenpotenzial bergen, mit der Forderung nach Gerechtigkeit zwischen den Generationen nicht vereinbar.

SDC 2006, Kapitel 4.2

Rund 70% der weltweiten Uranvorkommen befinden sich auf dem Land indigener Bevölkerungsgruppen. Der Abbau von Uran hat für diese Völker zum Teil negative gesundheitliche, wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen.

Gesellschaft für bedrohte Völker 2007, Kapitel 4.2 und Anhang 10

8. Diskussionspunkt

Standpunkt der Befürworter: Kernanlagen sind im Normalbetrieb unbedenklich für Mensch und Umwelt

In der Schweiz sind die rechtlichen Anforderungen an die Sicherheit von Kernanlagen im Normalbetrieb streng und werden eingehalten. Es ist wissenschaftlich belegt, dass der Normalbetrieb von Kernanlagen Mensch und Umwelt nicht schädigt

Der Normalbetrieb von Kernanlagen wirkt sich – wie in zahlreichen Untersuchungen gezeigt wurde – nicht nachteilig auf Mensch und Umwelt in der Umgebung der Anlagen aus. Die Strahlendosen, welche Menschen im Umfeld von Kernanlagen erhalten, sind weit geringer als die natürliche und von anderen Bereichen des Alltags ausgehende Strahlenbelastung.

Informationskreis
KernEnergie 2008,
BMU 2007, Kapitel
4.3.1

Eine Arbeitsgruppe von internationalen Experten kommt zum Schluss, dass bisherige Studien zur Untersuchung der Leukämierate in der Umgebung von Kernkraftwerken wenig repräsentativ sind bzw. der kausale Zusammenhang zwischen Strahlenexposition und Leukämieerkrankungen nicht nachgewiesen werden kann (z.B. deutsche Kinderkrebsstudie KiKK). Es ist eine Vielzahl von Einflussfaktoren möglich, welche die beobachteten Ereignisse solcher Studien bewirkt haben könnten.

BMU 2008, Kapitel
4.3.2

Bei Lebenszyklusbetrachtungen schneidet der Normalbetrieb von Kernkraftwerken im Vergleich zu anderen Energieträgern gut ab

Die Kernenergie schneidet bei der Bewertung mit Hilfe von Ökobilanzen im Vergleich mit anderen Stromerzeugungs-technologien gut ab. Neue Technologien und weltweit steigende Umweltstandards werden die Belastung für Mensch und Umwelt in Zukunft verringern.

Bauer et al. 2007, Kapitel 3.4.3

Standpunkt der Gegner: Kernanlagen schaden im Normalbetrieb Mensch und Umwelt

Es ist wissenschaftlich belegt, dass Kernanlagen Mensch und Umwelt im Normalbetrieb schädigen

Mit wissenschaftlichen Studien wurde ein erhöhtes Krebsrisiko in der Nähe von Kernkraftwerken gezeigt. Eine Meta-Studie über 17 internationale Studien zeigt, dass bei Kindern in der Altersgruppe bis neun Jahre ein je nach Entfernung vom Kernkraft-

BMU 2007, Baker und Hoel 2008, BMU 2008, Kapitel 4.3.2

werk um 14 bis 21% erhöhtes Risiko, an Leukämie zu erkranken, besteht.

Bei der Nutzung der Kernenergie fallen Belastungen der Umwelt durch den Uranabbau an, die bisher unterbewertet wurden

Beim Einbezug der Umweltauswirkungen des Uranabbaus erhöht sich die Umweltbelastung durch Kernenergie in Lebenszyklusanalysen um rund den Faktor 2.5. Bei Berücksichtigung dieses Sachverhaltes in Lebenszyklusanalysen liegen die Umweltauswirkungen der Kernenergie im Bereich der Windkraft. Die Umweltbelastung bei der Urangewinnung wird in Zukunft aufgrund der Abnahme der Urankonzentration im Erz tendenziell zunehmen. Zudem werden in den Ökobilanzberechnungen Langzeitschäden ungenügend und seltene Unfälle nicht berücksichtigt.

Doka 2008, Patrick Hofstetter, Kapitel 3.4.3

9. Diskussionspunkt

Standpunkt der Befürworter: Die Nutzung der Kernenergie ist volkswirtschaftlich sinnvoll

Kernkraftwerke liefern Elektrizität zu konkurrenzfähigen Preisen

Die Kernkraft hat mit 3-5 Rp./kWh im Vergleich zu anderen Stromerzeugungstechnologien tiefe Stromgestehungskosten, in denen bereits auch die Kosten für die Entsorgung und Stilllegung enthalten sind (die Kostenschätzungen für die Entsorgung und Stilllegung erfolgt periodisch und unterliegen der staatlichen Aufsicht).

Prognos 2007 und Prognos 2008, Kapitel 5.1

Die Kapitalkosten haben einen Anteil von 43%, die Brennstoffkosten von rund 30%. Der Anteil des Uranpreises an den Stromgestehungskosten beträgt rund 5%, d.h. auch bei steigenden Rohstoffpreisen bleibt die Kernenergie konkurrenzfähig.

Die externen Kosten der Kernenergie sind relativ gering

Die externen Kosten der Kernenergie liegen unter den externen Kosten der fossilen Stromerzeugung und im Bereich der Kosten erneuerbarer Energien. Die unteren Grenzen der Bandbreiten von Modellschätzungen zeigen generell keine hohen externen Kosten.

Ecoplan 2007, Kapitel 5.2

Durch die Haftpflicht werden die volkswirtschaftlichen Kosten der Risiken abgebildet

Der Inhaber einer Kernanlage haftet ohne betragsmässige Begrenzung für die Nuklearschäden, die durch Kernmaterialien in seiner Anlage verursacht werden. Daher spiegeln sich bereits in den heutigen Preisen die Kosten der Risiken der Kernenergie wider.

Kernenergiehaftpflichtgesetz, Kapitel 5.3

Standpunkt der Gegner: Die Nutzung der Kernenergie ist volkswirtschaftlich unsinnig

Die langfristigen Kosten der Kernenergie werden unterschätzt

Die langfristigen Kosten der Kernenergie, insbesondere die Kosten für die Stilllegung von Kernkraftwerken und die Entsorgung von radioaktiven Abfällen, sind heute weitgehend unbekannt. Aus den bisherigen Erfahrungen mit der Entsorgung muss von einer systematischen Unterschätzung der Stilllegungs- und Entsorgungskosten ausgegangen werden. Zudem wird in den Kostenschätzungen die kritische Annahme getroffen, dass die Entsorgung der Abfälle (für den Entsorgungsfonds) nur mit Kosten in den ersten 50 Jahren verbunden ist.

Sabine von Stockar
Kapitel 5.1

Die Nutzung der Kernenergie ist mit hohen externen Kosten verbunden

Die externen Kosten der Kernenergie sind höher als diejenigen der erneuerbaren Energien. Die externen mit einem Risikoaversionsfaktor gewichteten Kosten der Kernenergie liegen gemäss Modellschätzungen für die Schweiz bei bis zu 35.67 Rp./kWh. Internationale Studien kommen zu Ergebnissen, die diesen Wert um ein Zigfaches übersteigen

Ecoplan 2007, Kapitel 5.2

Das Risiko sehr schwerer Schäden ist bei Kernkraftwerken finanziell nicht gedeckt

Gemäss dem Kernenergiehaftpflichtgesetz muss der Inhaber von Kernanlagen mit seinem Betriebsvermögen für Schäden haften, welche über dem durch die Haftpflicht gedeckten Schaden liegen (1.8 Mia. CHF). Für einen grossen Schadenfall können die Kosten auf über 4000 Mia. CHF steigen. Der Schaden bliebe somit mit Sicherheit am Staat resp. an den Geschädigten hängen.

Greenpeace 2008b,
Zweifel und Umbricht
2002, Kernenergiehaftpflichtgesetz, Kapitel 5.3

10. Diskussionspunkt

Standpunkt der Befürworter: Die Nutzung von Kernenergie ist durch hohe Brennstoffverfügbarkeit auch in Zukunft gesichert

Uran ist in der Natur weit verbreitet und der Preis des Kernbrennstoffs beeinflusst den Preis der mit Kernenergie gewonnenen Elektrizität nur unwesentlich

Uran ist in der Natur weit verbreitet und weltweit in vielen geografischen Regionen in konzentrierter Form zu finden. Die zur Verfügung stehende Uranmenge ist vom Preis abhängig, den Betreiber von Kernkraftwerken für Kernbrennstoff zu zahlen bereit sind. Die für die Erzeugung einer Kilowattstunde benötigte Menge Uran hängt von der Nutzungsart ab. In den heute in Entwicklung befindlichen Reaktortypen kann der Brennstoff 20-100 Mal besser ausgenutzt werden.

Prognos 2008,
OECD/NEA 2008, Georg Schwarz, Kapitel 5.4

Da die Kosten für Kernbrennstoff den Preis der mit Kernenergie erzeugten Elektrizität nur geringfügig – heute zu etwa 5% – beeinflussen, ist damit zu rechnen, dass künftig auch Lagerstätten mit geringem Urangehalt gewinnbringend abgebaut werden können.

Standpunkt der Gegner: Die Brennstoffverfügbarkeit für die Nutzung von Kernenergie ist gering

Die Uranreserven neigen sich dem Ende zu

Offizielle Schätzungen zeigen in den Preiskategorien bis 130 US\$/kgU einen Versorgungsgangpass mit Uran ab dem Jahr 2030. Die gefundenen Uranressourcen („Reasonably Assured Resources“ und „Inferred Resources“) reichen beim heutigen jährlichen Bedarf rund 80 Jahre.

Energy Watch Group
2006, OECD/NEA
2008, Kapitel 5.4

Literaturverzeichnis

- Amory B. Lovins, Imran Sheikh, Alex Markevich (2008). Forget Nuclear. Rocky Mountain Institute.
- Anseta, S., Thompson, M.J., Jarell, J.P., Pendergast, D.R., (1998). CANDU reactors and greenhouse gas emissions. In: Proceedings of the 19th Annual Conference, Canadian Nuclear Society, Toronto, Ontario, Canada, October 18-21, 1998.
- Arbeitsgruppe Christen + Energie (2008). Christen und Energie 2008. Energiepolitische Umfrage unter Seelsorgern und Kirchgemeinden der Deutschschweiz. November 2008.
- Areva (2005). EPR. Paris la Défense Cedex. France. March 2005.
- Areva (2006). EPR, The first-built Gen III reactor, March 2006.
- Baker P.J., Hoel d.G. (2007), Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities. European Journal of Cancer Care 16, 355-363.
- Barnaby, F., Kemp, J. (2007). Secure Energy? Civil Nuclear Power, Security and Global Warming, Oxford Research Group, Oxford March 2007.
- Bauer, C., Dones, R., Heck, T., Hirschberg, S. (2007). Comparative environmental assessment of current and future electricity supply technologies for Switzerland". Proceedings available on CD. 3rd International Conference on Life Cycle Management, 27-29 August 2007, Zurich, Switzerland.
- Bauer, C., Dones, R., Heck, T., Hirschberg, S. (2008), Environmental assessment of current and future Swiss electricity supply options. International Conference on the Physics of Reactors "Nuclear Power: A Sustainable Resource". Casino-Kursaal Conference Center, Interlaken, Switzerland, September 14-19, 2008.
- Beleites, M. (1992), Altlast Wismut – Ausnahmezustand, Umweltkatastrophe und das Sanierungsproblem im deutschen Uranbergbau, Brandes & Aspel Verlag GmbH, Frankfurt (Main).
- Bieder, C., Le Bot, P., Desmares, E., Cara, F. Bonnet, J.L. (1998). "MERMOS: EDF's New Advanced HRA Method" Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM4, New York, USA, September 13-18, 1998.
- Brettschuh, W., SWR 1000: Sicherheit, Technik und Wirtschaftlichkeit, Vortrag, SGK Herbst-Seminar, Oktober 2007.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS (2003). KATARISK – Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine Risikobeurteilung aus der Sicht des Bevölkerungsschutzes.
- Bundesamt für Energie BFE (2007). Evaluation Einführung der Stromkennzeichnung. Dezember 2007.
- Bundesamt für Energie BFE (2008a). Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2007. Bern.

Bundesamt für Energie BFE (2008b). Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2007. Bern.

Bundesamt für Energie BFE (2008c). Attitudes towards radioactive waste in Switzerland. Report. Bern.

Bundesamt für Energie BFE (2008d). Vorschläge für geologisch geeignete Standortregionen zur Lagerung der radioaktiven Abfälle liegen vor. Medienmitteilung vom 6.11.2008.

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (2008). Mehr Rechenpunkte für genauere Prognosen. Medienmitteilung vom 26.02.2008. In: <http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/meteoschweiz/medienmitteilungen/COSMO-2.html> (17.04.2009)

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (heute BAFU) (2005). Umwelt-Materialien Nr. 201. Konsequente Umsetzung des Verursacherprinzips.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (2007). Epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie). Umweltforschungsplan des Bundesumweltministeriums (UFOPLAN). Reaktorsicherheit und Strahlenschutz.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (2008). Bewertung der epidemiologischen Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie) – Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Heft 57 (2008).

Burgherr, P., Hirschberg, S. (2008). A Comparative Analysis of Accident Risks in Fossil, Hydro, and Nuclear Energy Chains. In: Human and Ecological Risk Assessment, 14: 947-973, 2008.

Carson Mark, J. (1990). Reactor-Grade Plutonium's Explosive Properties. Nuclear Control Institute. August 1990.

Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité CRIIRAD (2005). Impact de l'exploitation de l'uranium par les filiales de COGEMA-AREVA au Niger. Bilan des analyses effectuées de la CRIIRAD en 2004 et début 2005.

Diehl, P. (1999). Depleted Uranium, a Post-War Disaster for Environment and Health. Laka Foundation. May 1999.

Diehl, P. (2007). Re-enrichment of depleted uranium tails in Gaseous Diffusion Plants. In: <http://www.wise-uranium.org/pdf/reengdp.pdf> (14.1.2009).

Doka, G. (2008). Non-radiological emissions from uranium tailings: A generic, global model for Life Cycle Inventory Data. Zürich, November 2008.

Dones, R., Bauer, C., Heck, T. (2003). LCA of Current Coal, Gas and Nuclear Electricity Systems and Electricity Mix in the USA. Paul Scherrer Institut, Villigen.

- Dones, R., Heck, T., Hirschberg, S. (2004a). Greenhouse Gas Emissions from Energy Systems: Comparison and Overview. In: Encyclopedia of Energy (Ed. Cleveland C.). Vol. 3, pp. 77-95. Academic Press/Elsevier, San Diego, USA.
- Dones, R., Zhou, X., Tian, C. (2004b). Lifecycle assessment of Chinese energy chains for Shandong electricity scenarios. International Journal of Global Energy Issues 22 (2/3), 199-224.
- Dones, R., Heck, T., Emmenegger, M.F., Jungbluth, N. (2005). Lifecycle inventories for the nuclear and natural gas energy systems, and examples of uncertainty analysis. International Journal of Lifecycle Assessment 10 (1), 10-23.
- Earle, T. C. (2002). From Risk Perception to Social Trust: An Outline of Recent Contributions of Psychology to Risk Management. In: AEN, NEA (Hrsg.): Better Integration of Radiation Protection in Modern Society. Workshop Proceeding Villigen. Switzerland. 23-25 January 2001. Paris.
- Econcept, Infras (2005). Konsequente Umsetzung des Verursacherprinzips. Studie im Auftrag des BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Umwelt-Materialien Nr. 201. Bern.
- Ecoplan (1997). Review of Studies: Method for integrated evaluation of benefits, costs, and effects of programmes for promoting energy conservation. Studie im 4. Rahmenforschungsprogramm Nicht-nukleare Energien der EU.
- Ecoplan (2007). Die Energieperspektiven 2035 – Band 3. Volkswirtschaftliche Auswirkungen. Ergebnisse des dynamischen Gleichgewichtsmodells, mit Anhang über die externen Kosten des Energiesektors. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE..
- Ellipson (2008). Risk and Return von Kernkraftwerken – Eine Beurteilung aus Sicht der Finanzmärkte am Beispiel der Kernkraftwerke Leibstadt und Gösgen. Kaspar Müller. September, 2008.
- Energy Science Center ESC (2008). Energiestrategie für die ETH Zürich. Zürich, Februar 2008.
- Energy Watch Group (2006). Uranium Resources and Nuclear Energy. Ottobrunn/Aachen. December 2006.
- ETH Globe (2007). Zukunft Energie. Das Magazin der ETH Zürich, Nr.1/Februar 2007.
- Eurobarometer (2007). Europeans and nuclear safety. Fieldwork October – November 2006. Publication February 2007. Report. Special Eurobarometer 271.
- Eurobarometer (2008). "Einstellung zu radioaktiven Abfällen". Befragung: Februar – März 2008. Veröffentlichung Juni 2008. Bericht. Spezial Eurobarometer 297.
- European Commission, Directorate-General XII, Science, Research and Development (1998) ExternE: Externalities of Energy.. Power generation and the environment - a UK perspective. ExternE-UK AEAT 3776, vol.1, June 1998. In: <http://externe.jrc.es/uk.pdf> (25.7.2008).

European Commission, Directorate-General XII, Science, Research and Development (1999). ExternE: Externalities of Energy. Vol XX: National Implementation. Prepared by CIEMAT, ES. Online im Internet: <http://www.externe.info/> (28.8.2008).

Fischer, M. (2004). The severe accident mitigation concept and the design measures for core melt retention of the European Pressurized Reactor (EPR). In: Nuclear Engineering and Design 230 (2004) 169-180.

Fokus Anti-Atom (2008). Bedrohliches Wachstum der Mühlberg-Risse. In: http://www.fokusantiatom.ch/Dokumente/2008_02_25_Risse007.pdf (17.9.2008).

Fritsche, U. R., Lim, S.-S. (2006). Comparison of Greenhouse-Gas Emissions and Abatement Cost of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life-Cycle Perspective. Öko Institute, Darmstadt, Germany.

Fthenakis, V., Kim, H.C. (2007). Greenhouse-Gas emissions from solar electric- and nuclear power: a life-cycle study. Energy Policy 35, 2549-2557.

Gantner, U., Jakob, M. und Hirschberg S. (2001). Perspektiven der zukünftigen Strom- & Wärmeversorgung für die Schweiz – Ökologische und ökonomische Betrachtungen. Projekt GaBE: Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen. Villigen PSI.

Gertman D., Blackman H., Marble J., Byers J., Smith C. (2005). The SPAR-H Human Reliability Analysis Method. NUREG/CR-6883. Washington DC, USA, Idaho National Laboratory for the U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Gesellschaft für bedrohte Völker GFBV (2007). Urankreislauf zu Lasten indigener Völker. Atomkraft ist keine Alternative. Göttingen. Dezember 2007.

Grawe, J., Kessler, G. (2005). Was geschieht zur Verhinderung der Verbreitung von Atomwaffen? (Proliferation). In: <http://www.energie-fakten.de/pdf/proliferation.pdf> (27.8.2008).

Greenpeace (2008a). Atomrisiko-Versicherung – wie hoch soll sie sein? In: <http://www.greenpeace.ch/de/themen/atom/atompolitik/hintergrund-atomhaftpflicht/> (28.8.2008).

Greenpeace (2008b). Dürfen sich Atomkraftwerk-Aktionäre und Eigentümer-Kantone weiterhin durch die Hintertür aus der Verantwortung stehlen? In: http://www.greenpeace.ch/fileadmin/user_upload/Downloads/de/Atom/2008_HG_HaftpflichtAktionaere.pdf (28.8.2008).

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (1993a). Anlageinterne Massnahmen gegen die Folgen schwerer Unfälle. HSK-R-103/d. November 1989. Neudruck: Januar 1993.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (1993b). Auswahl, Ausbildung, und Prüfung des lizenzierten Betriebspersonals von Kernkraftwerken. HSK-R-27/d. Mai 1992. Neudruck: Januar 1993.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (1993c). Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Richtlinie für schweizerische Kernanlagen. HSK-R-21. November 1993.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (1993d). Aufsichtsverfahren beim Bau und Betrieb von Kernanlagen. HSK-R-30/d. Juli 1992. Neudruck: Januar 1993.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (1993e). Gefilterte Druckentlastung für den Sicherheitsbehälter von Leichtwasserreaktoren, Anforderungen für die Auslegung. HSK-R-40/d. März 1993.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (1999). Periodische Sicherheitsüberprüfung für das Kernkraftwerk Gösgen-Däniken. Zusammenfassung, Ergebnisse und Bewertung. Würenlingen, November 1999.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (2001). Periodische Sicherheitsüberprüfung von Kernkraftwerken. HSK-R-48/d. November 2001.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (2003). Stellungnahme der HSK zur Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz. Würenlingen.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (2004). Nachweis ausreichender Vorsorge gegen Störfälle in Kernkraftwerken (Störfall-Richtlinie). HSK-R-100/d. Dezember 2004.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (2007). Neubestimmung der Erdbebengefährdung an Kernkraftwerkstandorten in der Schweiz (Projekt PEGASOS). Würenlingen.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (2008a). Aufsichtsbericht 2007 zur nuklearen Sicherheit in den schweizerischen Kernanlagen. April 2008.

Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK (2008b). Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Anwendungen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Mai 2008.

Herring, J. S. (2004). Uranium and Thorium Resource Assessment. Encyclopedia of Energy, Volume 6.

Hirschberg, S., Spiekerman, G., Dones, R. (1998). Severe Accidents in the Energy Sector. First Edition. PSI-Bericht Nr. 98-16. November 1998.

Hirschberg, S., Jakob M. (1999). Cost Structure of the Swiss Electricity Generation under Consideration of External Costs. SAEE Seminar "Strompreise zwischen Markt und Kosten: Führt der freie Strommarkt zum Kostenwahrheit?", Tagungsband, 11 June 1999, Bern. In: http://manhaz.cyf.gov.pl/manhaz/Warsztaty_10_2004/wp4/psi_materials/SAEE_Paper_Hirschberg_Jakob_1999.pdf (28.8.2008).

Hirschberg, S., Dones, R., Heck, T., Burgherr, P., Schenler, W., Bauer, C. (2004). Sustainability of Electricity Supply Technologies under German Conditions: A Comparative Evaluation. Comprehensive Assessment of Energy Systems. Studie im Auftrag des International Committee on NuclearTechnology. PSI-Bericht 04-15. Villigen. In: http://gabe.web.psi.ch/pdfs/PSI_Report/ILK%20-%20PSI%20Report%2004-15.pdf (28.08.2008).

Hirschberg, S., Bauer, C., Burgherr, P., Biollaz, S., Durisch, W., Foskolos, K., Hardegger, P., Meier, A., Schenler, W., Schulz, T., Stucki, S., Vogel, F. (2005). Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen (GaBE). Neuer erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten. PSI-Bericht Nr. 05-04. Mai 2005.

- Hondo, H. (2005). Lifecycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. Energy 30 (2005) 2042-2056.
- Infras / IWW (2004). External Costs of Transport; Studie im Auftrag der UIC; Paris.
- Integrated Sustainability Analysis ISA (2006). Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia. University of Sydney, Sydney.
- International Atomic Energy Agency IAEA (1980). The Convention on the Physical Protection of Nuclear Material. Wien.
- International Atomic Energy Agency IAEA (1991). Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants. IAEA-TECDOC-626. September 1991.
- International Atomic Energy Agency IAEA (1992). Measurement and Calculation of Radon Releases from Uranium Mill Tailings. Technical Reports Series No°333 . June 1992.
- International Atomic Energy Agency IAEA (1996). Defence in Depth in Nuclear Safety. INSAG-10. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienna 1996.
- International Atomic Energy Agency IAEA (2004a). Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standard Series.
- International Atomic Energy Agency IAEA (2004b). Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standard Series.
- International Atomic Energy Agency IAEA (2004c). Treatment of liquid effluent from uranium mines and mills Report of a co-ordinated research project 1996–2000.
- International Atomic Energy Agency IAEA (2005). Description of natural circulation and passive safety systems in water cooled nuclear power plants. CRP on Natural Circulation Phenomena, Modelling and Reliability of Passive Systems that Utilize Natural Circulation.
- International Atomic Energy Agency IAEA (2006). Promoting Safety in Nuclear Installations. In: <http://www.iaea.org/Publications/Factsheets/English/safetynuclinstall.pdf> (13.10.2008).
- International Atomic Energy Agency IAEA (2007). Proliferation-resistance and safeguardability of innovative nuclear fuel cycles.
- International Atomic Energy Agency IAEA (2008). INES the International Nuclear and Radiological Event Scale. In: <http://www.iaea.org/Publications/Factsheets/ English/ines.pdf> (3.11.2008).
- International Energy Agency IEA (2002). Environmental and Health Impacts of Electricity Generation: A Comparison of the Environmental Impacts of Hydropower with those of Other Generation Technologies. IEA Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programs, Ontario.

International Energy Agency IEA (2006). World Energy Outlook 2006. Paris.

Internationale Länderkommission Kerntechnik ILK (2004). ILK-16 - Bewertung der Nachhaltigkeit der Kernenergie und anderer Technologien zur Stromerzeugung. StAnz. Nr. 17 vom 26.04.2004, S. 1622.

Informationskreis KernEnergie (2008). Radioaktivität, Strahlenexposition, Strahlenwirkung.

Jansen, D. (2008). Radioaktivität aus Kohlekraftwerken. In: Bund Hintergrund November 2008. http://www.bund-nrw.de/fileadmin/bundgruppen/bcmslvnrw/PDF_Dateien/Themen_und_Projekte/Energie_und_Klima/Kohlekraftwerke/BUNDhintergrund_Radioaktivitaet_aus_Kohlekraftwerken_11_2008.pdf (14.1.2009).

Kastchiev, G., Kromp, W., Kurth, S., Lochbaum, D., Lyman, E., Sailer, M., Schneider, M. (2007). Residual Risk. An Account of Events in Nuclear Power Plants Since the Chernobyl Accident in 1986. The Greens – European Free Alliance in the European Parliament. May 2007.

Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003.

Kessler, G., Höbel, W., Goel, B., Seifritz W. (2008). Potential nuclear explosive yield of reactor-grade plutonium using the disassembly theory of early reactor safety analysis. In: Nuclear Engineering and Design 238 (2008) 3475-3499.

Kirwan B., Gibson H., Kennedy R., Edmunds J., Cooksley G., Umbers I. (2004). Nuclear Action Reliability Assessment (NARA): A Data-Based HRA Tool. 7th Int. Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 7 – ESREL '04). C. Spitzer, U. Schmocke and V. N. Dang. Berlin, Springer-Verlag.

Krebsliga Schweiz & Bundesamt für Gesundheit BAG (2008). Medienmitteilung vom 9.9.2008: CANUPIS-Studie zu Kinderkrebs um Kernkraftwerke gestartet. In: http://www.swisscancer.ch/fileadmin/swisscancer/uber_uns/files/presse_neu/Medien_20080909_D.pdf (10.9.2008).

Krewitt, W. (2002). Externe Kosten der Stromerzeugung. Zur Veröffentlichung vorgesehen in: Rebhan, E. (Hrsg.): Energie – Handbuch für Wissenschaftler, Ingenieure und Entscheidungsträger. Springer Verlag, 2002. Int: http://www.dlr.de/tt/Portadata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Externe_Kosten_der_Stromerzeugung.pdf (28.08.2008).

Kröger, W., Sang-Lung Chang (2006). Reflexions on Current and Future Nuclear Safety. atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie. 51 Jg. (2006) Heft 7 – Juli.

Labor Spiez (2008). Fact-Sheet Atomwaffensperrvertrag. In: www.labor-spiez.ch/de/dok/po/pdf/Atomwaffen-sperrvertrag.pdf (14.10.2008).

Leurs, B.A. & Wit, R.C.N. (2003). Environmentally harmful support measures in EU member states. Report for DG Environment of the European Commission. CE Delft. Solutions for environment, economy and technology. Delft, January 2003.

- Lindemann, I., Wippel, G. (2008). Uranboom im afrikanischen Niger – verseuchtes Wasser, verstrahlter Sand. In: http://www.incomindios.ch/arbeitsgruppen/uran/uran_niger.PDF (1.9.2008).
- Lois E., Dang V.N., Forester J., Broberg H., Massaiu S., Hildebrandt M., Braarud P.O., Parry G., Julius J., Boring R.L., Männistö I., Bye A. (2008). "International HRA Empirical Study – Description of Overall Approach and First Pilot Results from Comparing HRA Methods to Simulator Data, Halden Work Report HWR-844, Rev. 1, May 2008.
- McKinsey & Company. Pathways to a Low-Carbon Economy. 2009.
- Medienmitteilung des Aargauer Regierungsrates „Starker Fokus auf den Aargau“ vom 6.Nov. 2008.
- Mudd, G. (2006). Uranium Mining: Australia and Globally. In: <http://www.energyscience.org.au/FS06%20Uranium%20Mining.pdf> (27.10.2008).
- Mudd, G. M., Diesendorf, M. (2008). Sustainability of Uranium Mining and Milling: Toward Quantifying Resources and Eco-Efficiency. *Environmental Science and Technology* 2008, 42, 2624-2630.
- Nagra (2002). Technical Report 02-05. Project Opalinuston Clay. Safety Report. Demonstration of feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). December 2002.
- Nagra (2008). Fakten. Mengen und Herkunft radioaktiver Abfälle. Wettingen.
- Neue Zürcher Zeitung NZZ (2007). Kernenergie soll in Europa ihre Rolle behalten. Strategieplan des Weltenergiertes gegen Klimaerwärmung. Neue Zürcher Zeitung. In: http://www.nzz.ch/magazin/dossiers/energieversorgung/parteien_und_fachleute_unter_strom/articlef4mwb_1.148603.html (17.08.08).
- Neue Zürcher Zeitung NZZ (2008). "Jede Windturbine ist ein Anti-AKW-Plakat". Die Atomenergie-Gegner formieren sich für den Referendumskampf. In: Neue Zürcher Zeitung, (18.08.08).
- Nordostschweizerische Kraftwerke NOK (2008). Umweltdeklaration KKW Beznau.
- Nuclear Regulatory Commission (2007). CRS Report for Congress. Nuclear Power Plants: Vulnerability to Terrorist Attack. In: <http://fas.org/sgp/crs/terror/RS21131.pdf>.
- Nuklearforum Schweiz (2008a). Kernenergie für die Schweiz. Quellenmaterial mit Texten, Bildern und Grafiken für Präsentationen zur Kernenergiediskussion. 2. aktualisierte Auflage. August 2008.
- Nuklearforum Schweiz (2008b). Faktenblatt. Uran - Ressource mit Zukunft. Januar 2008. http://www.nuklearforum.ch/_upl/files/Faktenblatt_Uran_d.pdf.
- OECD / Nuclear Energy Agency NEA (2004a). Nuclear Regulatory Challenges Related to Human Performance.

OECD / Nuclear Energy Agency NEA (2004b). CSNI Technical Opinion Papers. No. 4 Human Reliability Analysis in Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants.

OECD / Nuclear Energy Agency NEA (2008). Uranium 2007: Resources, Production and Demand.

Öko-Institut e.V. (2002). Einfluss des „Faktors Mensch“ auf die Sicherheit von Kernkraftwerken. Darmstadt.

Öko-Institut e.V. (2005). Risiko Kernenergie. Es gibt Alternativen. Darmstadt. Juni 2005.

Öko-Institut e.V.: (2007a). Analyse des Bedrohungspotenzials “gezielter Flugzeugabsturz” am Beispiel der Anlage Biblis-A. Öko-Institut e.V. Büro Darmstadt.

Öko-Institut e.V. (2007b). Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung. Darmstadt. März 2007.

Perspektive Schweiz (2009). Umfrageergebnisse 2008. Perspektive Schweiz – Die Online-Abstimmung. In: <http://www.perspektive-schweiz.ch>.

Prasser, H.-M. (2008). Geht uns bald das Uran aus? Langfristige Konzepte zur Kernbrennstoffversorgung. BWK – Das Energie-Fachmagazin 11-2008, Seite 54-59.

Prognos (2007). Die Energieperspektiven 2035 – Band 5. Analyse und Bewertung des Elektrizitätsangebotes. Juni 2007.

Prognos (2008). Kosten neuer Kernkraftwerke. Aufdatierung der Kostendaten der Energieperspektiven Schweiz 2035. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE. Mai 2008.

Rashad, S.M., Hammad, F.H. (2000). Nuclear power and the environment: comparative assessment of environmental and health impacts of electricity generating systems. Applied Energy 65, 211–229.

Renn, O., Schweizer, P.-J., Dreyer, M., Klinke, A. (2007). Risiko. Über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit. München.

Responsible Miner (2008). Sustainable Uranium Mining: Grappling with the Realities. In: <http://www.responsibleminer.com/48/sustainable-uranium-mining-grappling-with-the-new-realities.html> (14.10.2008).

Roth, S., Hirschberg, S., Bauer, C., Burgherr, P., Dones, R., Heck, T., Schenler, W. (2008). Sustainability of electricity supply technology portfolio. International Conference on the Physics of Reactors “Nuclear Power: A Sustainable Resource”. Casino-Kursaal Conference Center, Interlaken, Switzerland, September 14-19, 2008.

Rütter + Partner (2006). Nukleare Entsorgung in der Schweiz. Untersuchung der sozio-ökonomischen Auswirkungen von Entsorgungsanlagen. Im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE. Rüschlikon / Lausanne, Mai 2006.

- Schmocke, U., Meyer, P. (1999). Nationalfonds-Projekt Risk Based Regulation. Teil I: Risikoorientierte Aufsicht über die Schweizer Kernanlagen.
- Schultze, M., Friese, K., Frömmichen, R., Geller, W., Klapper, H., Wendt-Potthoff, K, (1999). Tagebaurestseen – schon bei der Entstehung ein Sanierungsfall. In: Gaia. Ecological Perspectives in Science, Humanities, and Economics. Gaia 8 (1999) No.1.
- Schweizerische Energie-Stiftung SES (2005). Stellungnahme der Schweizerischen Energie-Stiftung zum Entsorgungsnachweis. 8.12.2005.
- Sjöberg, L. (1998). Perceived Risk and Public Confidence. In: AEN, NEA/OECD (Hg.): The Societal Aspects of Decision Making in Complex Radiological Situations. Paris.
- Sovacool, B. K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. Energy Policy 36 (2008) 2940-2953.
- Stauffacher, M., Krüti, P., Scholz, R.W (2008). Gesellschaft und radioaktive Abfälle. Ergebnisse einer schweizweiten Befragung. Rüegger Verlag. Zürich/Chur.
- Storm van Leeuwen, J.W., Smith, P. (2005). Nuclear Power: The Energy Balance (Netherlands), <http://www.stormsmith.nls>.
- Storm van Leeuwen, J.W. (2006). Nuclear Power and Global Warming, Brussels.
- Storm van Leeuwen, J.W., Smith, P. (2007). Nuclear Power: The Energy Balance - October 2007 (Netherlands), <http://www.stormsmith.nls>.
- Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 22. Juni 1994 (Stand am 1. Januar 2009).
- Sustainable Development Commission SDC (2006). The role of nuclear power in a low carbon economy. SDC position paper. March 2006.
- Suter, S., Sommer, H., Marti, M., Wickart, M., Schreyer, C., Peter, M., Gehrig, S., Maibach, M., Wüthrich, P., Bickel, P., Schmid, S. (2002). The Pilote Accounts of Switzerland. UNITE (UNIfication of accounts and marginal costs for Transport Efficiency). Deliverable 5, Appendix 2. Funded by 5th Framework RTD Programme. ITS, University of Leeds, Leeds.
- Swain, A. D., & Guttmann, H. E. (1983). Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications.. NUREG/CR-1278. Washington D.C.
- Swissnuclear (2008a). Eckwertstudie 2007. Ergebnisse der 8. Eckerwertstudie. Olten.
- Swissnuclear (2008b). Sicherheit im Atomkraftwerk. In: <http://www.kernenergie.ch/de/sicherheit.html> (25.8.2008).

- Swissnuclear (2008c). Kennzahlen der Kernenergie. In: <http://www.atomenergie.ch/de/kennzahlen-technik.html> (2.9.2008).
- The Pembina Institute (2006). Nuclear Power in Canada: An Examination of Risks, Impacts and Sustainability.
- Tokimatsu, K., Kosugi, T., Asami, T., Williams, E., Kaya, Y. (2006). Evaluation of lifecycle CO₂ emissions from the Japanese electric power sector in the 21st century under various nuclear scenarios. Energy Policy 34, 833–852.
- Tschöp, E. (2008). Uranabbau und Uranexport – ein Kreislauf mit Nebenwirkungen. In: http://www.castor-stoppen.de/wp-content/uploads/manuskript_teil1.pdf (1.9.2008).
- Umweltbundesamt (2005). Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten. Dessau. April 2007.
- Umweltbundesamt (2007). Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten.
- Umwelt-Institut München e.V. (2008). Uranabbau und seine Umweltauswirkungen. In: http://umweltinstitut.org/download/6_uranabbau_de.pdf (1.9.2008).
- United States Nuclear Regulatory Commission (1995). Evaluation of potential severe accidents during low power and shutdown operations at Surry, unit 1. NUREG/CR-6144.
- United States Nuclear Regulatory Commission (2000). Technical Basis and Implementation Guidelines for A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA). NUREG-1624, Rev. 1. Washington, DC, USA.
- United States Nuclear Regulatory Commission (2003). Fact Sheet. Dirty Bombs. March 2003.
- United States Nuclear Regulatory Commission (2005). Good Practices for Implementing Human Reliability Analysis (HRA). Final Report. NUREG-1792. Washington D.C.
- US Department of Energy DOE (2008). How much depleted uranium hexafluoride is stored in the United States. In: <http://web.ead.anl.gov/uranium/faq/storage/faq16.cfm> (14.1.2009).
- Verordnung über den Stilllegungs- und Entsorgungsfonds für Kernanlagen (SEFV) vom 7. Dezember 2007 (Stand am 1. Februar 2008).
- Verordnung über die Anforderungen an das Personal von Kernanlagen (VAPK) vom 9. Juni 2006.
- Vorspools, K.R., Brouwers, E.A., D'Haeseleer, William D. (2000). Energy content and indirect greenhouse gas emissions embedded in 'emission-free' power plants: results for the low countries. Applied Energy 67, 307–330.
- Waste Isolation Pilot Plant WIPP (2008). How will future Generations be Warned? <http://www.wipp.energy.gov/fctshts/PICs.pdf>.

White, S. W., Kulcinski, G. L. (2000). Birth to death analysis of the energy payback ratio and CO₂ gas emission rates from coal, fission, wind, and DT-fusion electrical power plants. *Fusion Engineering and Design* 48 (248), 473–481.

World Information Service on Energy WISE (2003). The Unbearable Risk. Proliferation, terrorists threats and the plutonium industry. Paris.

World Information Service on Energy WISE (2004). Uranium Mining and Milling Wastes: An Introduction. By Peter Diehl. www.wise-uranium.org/uwai.html.

World Nuclear Association WNA (2008). Nuclear Power Plants and Earthquakes. <http://www.world-nuclear.org/info/inf18.html>

World Nuclear Association WNA (2009). Uranium Enrichment. <http://www.world-nuclear.org/info/inf28.html>.

Zweifel, P., Schneider, Y. (2002). Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE.

Zweifel, P., Umbrecht R. (2002). Verbesserte Deckung des Nuklearrisikos. Zu welchen Bedingungen? Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE. Mai 2002.

Anhang 1: Aufsichtliche Massnahmen und periodische Sicherheitsüberprüfungen

Der Betreiber einer Kernanlage ist dafür verantwortlich, dass

- die Anlage dem Stand von Wissenschaft, Technik und Erfahrung entspricht und dass die einschlägigen Regelwerke sowie die behördlichen Auflagen und Forderungen erfüllt sind,
- die Anlagenteile eine den Anforderungen entsprechende Qualität aufweisen,
- die Anlage sachkundig und sicherheitsbewusst betrieben und instand gehalten und gegebenenfalls an neue Erkenntnisse angepasst wird und
- der effektive Zustand aller sicherheitsrelevanten Anlageteile umfassend dokumentiert ist.

Die Aufsichtsbehörde achtet darauf, dass die geltenden Gesetze, Verordnungen und Regelwerke sowie die Bedingungen und Auflagen der Verfügungen eingehalten werden. Die Grundsätze der Aufsichtstätigkeit sind in der HSK-Richtlinie zu Aufsichtsverfahren beim Bau und Betrieb von Kernanlagen mit Verweis auf eine Reihe weiterer Richtlinien niedergelegt (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen 1993d).

Ein wichtiges Element der Aufsichtstätigkeit sind periodische Sicherheitsüberprüfungen (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen 2001). Gefordert ist hierbei eine ganzheitliche sicherheitstechnische Beurteilung des Kernkraftwerks. Dies beinhaltet die Überprüfung aller Sicherheitsebenen, für die durch technische, organisatorische und personelle Massnahmen die Erreichung der Schutzziele nachzuweisen ist (zuverlässiger Normalbetrieb (Sicherheitsebene 1), Massnahmen zur Verhinderung von Betriebsstörungen (Sicherheitsebene 2), zur Beherrschung von Zwischenfällen und Unfällen (Sicherheitsebene 3) sowie Massnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen schwerer Unfälle (Sicherheitsebene 4)). Daraus leiten sich folgende Teilbereiche der periodischen Sicherheitsüberprüfung ab:

- Darstellung des Sicherheitskonzepts,
- Bewertung der Betriebsführung und des Betriebsverhaltens,
- Deterministische Sicherheitsstatusanalyse,
- Probabilistische Sicherheitsanalyse.

Alle Nachweise des Sicherheitsberichts, welcher für eine Bewilligung des Betriebs einer Kernanlage gefordert werden, sind bei den periodischen Sicherheitsüberprüfungen erneut vollumfänglich zu erbringen. Die Ergebnisse werden im Hinblick auf die in der Störfallrichtlinie definierten Schutzziele

- Kontrolle der Reaktivität,

- Kühlung der Brennelemente,
- Einschluss der radioaktiven Stoffe,
- Begrenzung der Strahlenexposition

interpretiert, wobei der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik zugrunde gelegt wird.

Anhang 2: INES-Skala

Tabelle 15 Die International Nuclear and Radiological Event Scale (INES-Skala) (International Atom Energy Agency IAEA (2008)).



THE INTERNATIONAL NUCLEAR AND RADILOGICAL EVENT SCALE

| GENERAL DESCRIPTION OF INES LEVELS | | | |
|--|---|--|--|
| INES Level | People and Environment | Radiological Barriers and Control | Defence-in-Depth |
| Major Accident Level 7 | • Major release of radioactive material with widespread health and environmental effects requiring implementation of planned and extended countermeasures. | | |
| Serious Accident Level 6 | • Significant release of radioactive material likely to require implementation of planned countermeasures. | | |
| Accident with Wider Consequences Level 5 | • Limited release of radioactive material likely to require implementation of some planned countermeasures. • Several deaths from radiation. | • Severe damage to reactor core. • Release of large quantities of radioactive material within an installation with a high probability of significant public exposure. This could arise from a major criticality accident or fire. | |
| Accident with Local Consequences Level 4 | • Minor release of radioactive material unlikely to result in implementation of planned countermeasures other than local food controls. • At least one death from radiation. | • Fuel melt or damage to fuel resulting in more than 0.1% release of core inventory. • Release of significant quantities of radioactive material within an installation with a high probability of significant public exposure. | |
| Serious Incident Level 3 | • Exposure in excess of ten times the statutory annual limit for workers. • Non-lethal deterministic health effect (e.g., burn) from radiation. | • Exposure rates of more than 1 Sv/h in an operating area. • Severe contamination in an area not expected by design, with a low probability of significant public exposure. | • Near accident at a nuclear power plant with no safety provisions remaining. • Lost or stolen highly radioactive sealed source. • Mislabeled highly radioactive sealed source without adequate procedures in place to handle it. |
| Incident Level 2 | • Exposure of a member of the public in excess of 10 mSv. • Exposure of a worker in excess of the statutory annual limits. | • Radiation levels in an operating area of more than 50 mSv/h. • Significant contamination within the facility into an area not expected by design. | • Significant failures in safety provisions but with no actual consequences. • Found highly radioactive sealed orphan source, device or transport package with safety provisions intact. • Inadequate packaging of a highly radioactive sealed source. |
| Anomaly Level 1 | | | • Overexposure of a member of the public in excess of statutory annual limits. • Minor problems with safety components with significant defence-in-depth remaining. • Low activity lost or stolen radioactive source, device or transport package. |
| NO SAFETY SIGNIFICANCE (Below Scale/Level 0) | | | |
| Photo Credits: Chilean Nuclear Energy Commission, Genkai Nuclear Power Plant, Genkai, Japan/Kyushu Electric Power Co., J. Mairi/IAEA | | International Atomic Energy Agency Information Series / Division of Public Information 08-26941 / E | |

Anhang 3: Ausgewählte Störfallereignisse

Im Folgenden werden sechzehn ausgewählte Störfallereignisse in Kernkraftwerken kurz beschrieben (übernommen in Originalversion aus Kastchiev (2007) – Residual Risk).

The Residual Risk Project Team has selected 16 events from nine countries that illustrate that nuclear reactor safety remains far from perfect. This is not a ranking of the most significant events but rather a selection of known significant events that also reflect the specific knowledge and experience of the members of the Residual Risk Project Team. The selected events are presented in more detail in chapter 9. They were classified into nine categories (for easy reference, the respective chapter numbers are indicated in brackets).

Advanced Material Degradation (before break)

3 April 1991 Shearon Harris (USA)

On 3 April 1991 workers at the Shearon Harris pressurized water reactor in New Hill, North Carolina discovered damaged piping and valves within the alternate minimum flow system provided for the pumps in the emergency core cooling system. The piping and valve damage was serious, had an accident occurred the water needed to cool the reactor core would have instead poured out onto the floor through the ends of broken components. The NRC calculated the severe core damage risk from this event to be 6×10^{-3} or 0.6% per reactor year. The event was not rated on the IAEA INES scale.

6 March 2002 Davis Besse (USA)

On 6 March 2002, workers discovered a pineapple-sized hole in the carbon steel reactor vessel head at the Davis-Besse pressurized water reactor in Oak Harbor, Ohio. The boric acid of the primary coolant had completely eaten through the 6-inch (15 cm) thick carbon steel wall to expose the 5 mm thin stainless steel liner. A government study estimated that the hole would have widened to the point where the liner ruptured in another 2 to 11 months of operation. Because Davis-Besse ran 18 months between refueling outages, had the damage been missed during the 2002 outage, it seems likely that a loss of coolant accident would have occurred. The NRC calculated the severe core damage risk from this event to be 6×10^{-3} or 0.6% per reactor year and rated it INES level 3.

Significant Primary Coolant Leaks

18 June 1988, Tihange-1 (Belgium)

On 18 June 1988, while the pressurized water reactor was operating, a sudden leak occurred in a short, unisolable section of emergency core cooling system (ECCS) piping. The leak rate was in the order of 1,300 liters per hour. The source of leakage was a crack – 9 cm long on the inside surface of the pipe and 4.5 cm long on the outside surface – extending

through the wall of the piping. The risk of a pipe rupture in the emergency core cooling system is considerable if the emergency safety injection system is activated as large quantities of cooling water are injected in case of a loss of coolant accident in an already degraded safety situation.

12 May 1998, Civaux-1 (France)

The Civaux-1 pressurized water reactor was shut down for five days, when, during startup tests, a 25 cm diameter pipe of the main residual heat removal system cracked open and a large leak (30,000 liters per hour) occurred in the primary cooling circuit. The reactor core needs to be cooled permanently, even when it is shut down, in order to evacuate the significant amount of residual heat of the fuel. It took nine hours to isolate the leak and reach a stable situation. An 18 cm long crack on a weld was identified and 300 m³ of primary coolant had leaked into the reactor building. The unit had been operating for only six months at 50% power level maximum prior to the event. The operator, EDF, suggested rating this event at level 1 on the INES scale, but the safety authorities decided on level 2.

9 February 1991 Mihama-2 (Japan)

A steam generator tube rupture occurred at Mihama-2 pressurized water reactor. This was the first such incident in Japan where the emergency core cooling system was actuated. The utility investigated the rupture and found that it was a complete circumferential tube failure. The utility found that the failure due to high cycle fatigue caused by vibration. By design, all tubes in specific locations in the steam generator are supposed to be supported by anti-vibration bars. However, the subject tube was found not to be supported appropriately because of a reported "incorrect insertion" of the adjacent anti-vibration bars.

Reactivity Risks

12 August 2001, Philipsburg (Germany)

A deviation from the specified boron concentration – a neutron absorber needed to slow down or stop the nuclear reaction – in several flooding storage tanks during the restart of the plant was reported to the authorities. In addition, the liquid level had not reached the required value fixed in the operational instructions for the start-up and was only implemented with a delay. The emergency core cooling system will only work effectively if it is operated according to the design basis conditions. Subsequent investigations revealed that significant deviations from start-up requirements and violations from related instructions seemed to be common probably for several years and took place in other German nuclear plants.

1 March 2005 Kozloduy-5 (Bulgaria)

In the process of power reduction at the Russian designed pressurized water reactor (WWER) the operators identified that three control rod assemblies remained in the upper end position. The follow-up movement tests of the remaining control rod assemblies identi-

fied that 22 out of 61 could not be moved with the driving mechanisms. The exact number of control rod assemblies unable to scram (to drop due to the gravity only) remains unknown but it is thought to be between 22 and 55. The WWER-1000 scram system is designed to put the reactor in safe shutdown if one control rod assembly at the most is jammed in the upper position. The operator had originally rated the incident INES level 0, but the safety authorities finally admitted to a level 2 rating.

Fuel Degradation (outside reactor core)

Paks (Hungary) 2003

Design deficiencies of a chemical system built to clean 30 partially irradiated fuel assemblies from magnetic deposits in a special tank (outside of the vessel of the pressurized water reactor) caused insufficient cooling of all assemblies, which were heavily damaged. A subsequent IAEA investigation identified eight separate design errors. The system was developed, manufactured and delivered by AREVA NP. During the accident radioactive releases were about four times the noble gases and almost 200 times the Iodine-131 and aerosols released by all 58 French pressurized water reactors during the whole of 2003. The event was reclassified as Level 3 on the INES scale after an initial Level 2 rating.

Fires and Explosions

14 December 2001, Brunsbüttel (Germany)

A hydrogen explosion caused a high degree of damage to the spray system piping of the boiling water reactor. The head spray line is used for cooling the inner surface of the reactor pressure vessel head and the flange area upon plant shutdown. Some parts of the 5.6 mm diameter pipes were ruptured. An approximately 2.7 m long piping section had burst and was completely destroyed. Some sections of the piping were missing. Prior to this event the possibility of severe explosions caused by radiolysis gas during normal operation was nearly excluded.

Station Blackout

18 March 2001 Maanshan (Taiwan)

The pressurized water reactor was affected by a total loss of external and internal power supply. Power supply is crucial to evacuate residual heat from the reactor core. The plant is situated near the sea. Salt deposit on insulators due to foggy weather caused instability of the high voltage grid. During a switch to the grid a short circuit in a power switch of the emergency power line occurred and caused a cable fire. A breaker and switchgear was totally destroyed by the fire and the diesel generators could not be started up manually because of heavy smoke. It took about two hours to restore power supply.

25 July 2006, Forsmark, Sweden

A short circuit in an outdoor switching station of the grid nearby the boiling water reactors caused the emergency shutdown (scram) of unit 1 and, in a complex scenario, led to a number of subsequent failures at the plant. Due to a design error, the disconnection of the plant from the grid and the switch to house load operation – where the power plant uses its own power to operate essential auxiliaries – did not function as planned. An inappropriate converter adjustment led to the failure of the attempt to connect safety related equipment to the emergency power supply. The start up of two of the four emergency diesel generators was aborted, which lead to a partial blackout even in the main control room. Due to the lack of information about the important parameters for a period of time the exact state of the plant and the consequences of potential actions to perform were unclear. The shift team decided nevertheless to try to reconnect the plant to the grid, which was performed successfully.

Generic Issues – Reactor Sump Plugging

28 July 1992, Barseback-2 (Sweden)

A leaking pilot valve in the boiling water reactor in Barseback initiated automatically safety functions like reactor scram, high-pressure safety injection, core spray and containment spray systems. The steam jet from an open safety valve was impinging on thermally insulated equipment. Insulating material was washed into the suppression pool and affected the emergency core cooling system, which is essential for heat removal in case of a leak the reactor coolant. Similar incidents occurred in several countries and the problem turned out to apply to many, if not most, of the light water reactors in the world.

Natural Events

27 December 1999, Blayais-2 (France)

The Blayais nuclear power plant site was flooded after heavy storms resulting in certain key safety equipments of the plant being under over 100,000 m³ of water, for example safety injection pumps and the containment spray systems of units 1 and 2. The electrical system was also affected. Power supply was interrupted. Flying objects and debris rendered any intervention dangerous. All four units on the site were shut down. For the first time, the national level of the internal emergency plan (PUI) was triggered. The event was given an INES Level 2 rating.

Security Events and Malicious Act

7 February 1993, Three Mile Island (USA)

An unauthorized vehicle entered the owner-controlled area (OCA) of the Three Mile Island (TMI) nuclear power plant. No physical barriers were present to delay access. The vehicle continued to the protected area (PA of the nuclear plant, smashed one of the entry gates,

before crashing through a corrugated metal door and entering the turbine building of the Unit 1 reactor, which was operating at full power. The vehicle stopped 19 meters inside the turbine building, striking and damaging the insulation on an auxiliary steam line. A Site Area Emergency, the second highest emergency classification level, was declared. This was the second time this had occurred at the TMI plant (the first being the TMI Unit 2 meltdown in 1979). The intruder was not apprehended until four hours after he entered the site.

July 2000, Farley (USA)

During an “Operational Safeguards Response Evaluation,” or OSRE – war-game-type exercise to evaluate whether nuclear power plant security forces could effectively defend against an adversary team – the security force at Farley could not prevent the mock adversary team from simulating the destruction of entire target sets in two out of four exercises (and therefore simulating a core meltdown); and simulating the destruction of “significant plant equipment” in a third exercise.

29 August 2002, 17 TEPCO Reactors (Japan)

The Tokyo Electric Power Company (TEPCO) operates 17 boiling water reactors and was also one of the most respected large companies in Japan. On 29 August 2002 the Japanese Nuclear Industrial Safety Agency (NISA), shocked the nation with the public revelation of a massive data falsification scandal at TEPCO. At that point 29 cases of “malpractice” had been identified, including the falsification of the operator’s self-imposed inspection records at its nuclear power plants over many years. In the follow-up, all of the 17 TEPCO units had to be shut down for inspection and repair. It was reported later that these practices had gone on for as long as 25 years and the total number of events is put at nearly 200 so far. However, revelations of cover-ups and malpractice have extended to all major nuclear operators in Japan and continue to date. In the latest case, in early April 2007 Hokuriku Electric has admitted to a criticality incident at its Shika-1 boiling water reactor. The event had been covered up for almost eight years.

Anhang 4: Severe Accident Management Guidelines (SAMG)

Die SAMG umfassen Massnahmen

1. zur manuellen Druckentlastung des Reaktors für den Fall, dass die Anlage in einen Hochdruck-Kernschmelzepfad zu laufen droht,
2. zur Wasserstoffbeherrschung durch Installation von katalytischen Rekombinatoren oder sogenannten Spark-Ignitern im Containment, die durch eine Zirkonium-Wasser-Reaktion gebildeten Wasserstoff abbauen, bevor detonationsfähige Gemische gebildet werden können,
3. zur zusätzlichen Notkühlwasserquellen und Methoden zu ihrer Einspeisung in den Reaktor oder die Reaktorgrube, um einen geschmolzenen Kern zu lokalisieren,
4. zur Begrenzung des Dampfdrucks im Containment durch entsprechende zusätzliche Kühlmaßnahmen (z.B. Containment-Sprühsysteme),
5. zur gezielten kontrollierten Druckentlastung desContainments über speziell hierfür nachgerüstete Aerosol- und Jodfilter. Letzterer ist eine Massnahme zur Begrenzung der Freisetzung radioaktiver Stoffe für den Fall, dass alle anderen Massnahmen versagt haben sollten. Es werden dann fast ausschliesslich radioaktive Edelgase freigesetzt, die keine Folgedosis hervorrufen (Strahlenschutzverordnung StSV). Evakuierungen der Bevölkerung werden notwendig wegen der auftretenden Wolkendosis. Die Auswirkungen werden dabei so weit gemildert, dass Gebiete mit langfristiger Geländekontamination vermieden oder eng begrenzt werden können. (Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen 1993e).

Anhang 5: Sicherheitszuwachs verschiedener Reaktortypen der Generation III und III+

Sicherheitszuwachs Generation III und III+

| Technology | ABWR | ESBWR | SWR-1000 | AP1000/ AP600 | APWR | EPR | V-392 |
|---------------------------------|---|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|---|---|---|
| Reactor type | BWR | BWR | BWR | PWR | PWR | PWR | PWR |
| Safety level achieved | Meets US, Japan and Taiwan regulatory requirements | Meets US requirements | Meets German and EUR requirements | Meets US requirements | Meet the Japanese requirements | Meets German, French and EUR requirements | Meets Russian requirements. Assessed against EUR |
| Operator action after accidents | 72 hours | 72 hours | 72 hours | 72 hours | No information | 12 hours | 24 hours |
| Components nature | Active + passive (containment overpressure protection, lower drywell flooder, basaltic concrete spreading area for core melt) | Passive | Passive | Passive | Active, passive, inherent (advanced accumulator tank, core catcher, passive hydrogen removal) | Active + passive (accumulators, core catcher and core melt cooling) | Active + passive (accumulators, core heat removal system, quick core boron injection, passive hydrogen removal, core catcher) |
| Core melt frequency/year | $<1.6 \times 10^{-7}$ | $<3 \times 10^{-8}$ | $<8.4 \times 10^{-8}$ | $3.6 \cdot 10^{-7}$ | $<10^{-7}$ | $<5.8 \cdot 10^{-7}$ | $<5.5 \times 10^{-8}$ |

Vergleich: DWR und SRW der 2. Generation

ursprünglich: $10^{-3} \dots 10^{-4}$ 1/a

mit Nachrüstungen: $10^{-5} \dots 10^{-6}$ 1/a

Datenquellen:

- <http://www.ne.doe.gov/np2010/neNP2010esbwrTrainingSession.html>
- <http://www.ne.doe.gov/np2010/neNP2010eprtraingingSessionb.html>
- http://www.areva-np.com/common/liblocal/docs/Brochure/NEW_EPR4volets_09_08.pdf
- [http://www.tvo.fi/uploads/File/OL3perustiedot-ENG\(1\).pdf](http://www.tvo.fi/uploads/File/OL3perustiedot-ENG(1).pdf)
- <http://www.ne.doe.gov/pdfFiles/eprTtsUSEPRSvereAccFeatures.pdf>
- <http://www.ieee.org/organizations/pes/meetings/gm2008/slides/NPII-AREVA.pdf>
- <http://www.hse.gov.uk/newreactors/reports/eprpsa.pdf>
- <http://www.ne.doe.gov/np2010/neNP2010AP1000TechnicalTrainingSession.html>
- http://www.ne.doe.gov/pdfFiles/AP1000_Design082506_Presentation.pdf
- <http://www.ne.doe.gov/np2010/neNP2010abwrTrainingSession.html>
- <http://www.ne.doe.gov/np2010/pdfs/ABWROverview.pdf>
- <http://www.ne.doe.gov/np2010/pdfs/ABWRSafety.pdf>

Anhang 6: Human Reliability Analysis (HRA)

Das Feld der HRA wird bestimmt durch eine fest gefügte Basis von Richtlinien, die von Seiten internationaler Organisationen harmonisiert und von nationalen Genehmigungsbehörden herausgegeben werden. Die Bewertung des Einflusses des Faktors Mensch ist weiterhin ein fester Bestandteil des Sicherheitsberichtes für jede Kernanlage. Die wichtigste Grundlage bildet die Methode zur Vorhersage der menschlichen Fehlerrate (THERP = Technique for Human Error Rate Prediction, (Swain & Gutmann 1983)) sowie die Methodologie des Erfolgswahrscheinlichkeits-Indizes (SLIM = Success Likelihood Index Methodology (United States Nuclear Regulatory Commission 1995), eine Methode zur Strukturierung von Expertenschätzungen. Zur Bewertung des Faktors Mensch existieren "Best Practice Guidelines", veröffentlicht im Bericht der US-NRC NUREG-1792 Kernschadenshäufigkeiten. Diese beinhalten die durch menschliches Versagen hervorgerufenen Störfallpfade (United States Nuclear Regulatory Commission 2005).

Die existierende Datenbasis für die Fehlerwahrscheinlichkeiten stützt sich auf die Auswertung der vorliegenden Betriebserfahrung (Ereignisberichte, Berichte zu Beinahe-Fehlern, Berichte zu Regelverstößen, Instandhaltungsberichte, Betriebstagebücher, Interviews des Personals, HRA Handbücher, Expertenbewertungen, Simulatorexperimente). Da nur wenige relevante Störfallsequenzen für eine Auswertung zur Verfügung stehen, muss ein grosser Teil der Datenbasis durch die Bewertung von Expertenbefragungen gewonnen werden. Der Einfluss der Unsicherheiten der Datenbasis wird durch Sensibilitätsstudien ermittelt, die es erlauben, die Ergebnisse der PSA mit Fehlerbanden zu versehen. Weiterhin ist der Ansatz von grossen Konservativitäten hinsichtlich der Fehlerwahrscheinlichkeiten üblich. In einem NEA Report über die Herausforderungen hinsichtlich der Genehmigungs- und Aufsichtspraxis wird empfohlen, vorhandene Betriebserfahrungen, eine systematische Auswertung von Fehlern bei der Simulatorausbildung und Erfahrungen aus Instandhaltungsdatenbanken zu nutzen, um die Datenbasis zu verbessern. (OECD / Nuclear Energy Agency NEA 2004a).

Der aktuelle Stand von HRA wird in dem CSNI Technical Opinion Paper No. 4 "Human Reliability in Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants" zusammenfassend diskutiert (OECD / Nuclear Energy Agency NEA 2004b). Die Herausforderungen bestehen hiernach in

- der Harmonisierung der unterschiedlichen im Einsatz befindlichen Methoden,
- der Validierung von Bewertungsmethoden für seltene Ereignisse ("rare event studies"), wobei Grenzen in einer rein wahrscheinlichkeitsorientierten Beschreibung von menschlichem Verhalten gesehen werden,

- einer verbesserten Behandlung entscheidungsbasierter Fehler durch Methoden, die auf der Analyse von Betriebserfahrung, auf Auswertung von Simulatorexperimenten und auf der Kognitionstheorie beruhen,
- einer systematischen Behandlung der sogenannten "Errors of Commission (EoC)". Die Betrachtung von Fehlreaktionen auf Anforderung werden als sogenannte "Errors of Omission" bezeichnet und sind derzeit weit besser beschrieben als Fehler, die auf eine Initiative des Betriebspersonals ohne äussere Anforderung als Auslöser begangen werden. Dies ist eine wesentliche Richtung zukünftiger Forschung im Gebiet der HRA.
- Eine weitere Linie ist die Berücksichtigung von Aspekten der Organisation und des Managements der Betreiberfirmen. Momentan besteht hierzu jedoch noch kein Konsens über die Vorgehensweise.

Gegenwärtig wird die Forschung zur Gewinnung der Fehlerhäufigkeiten auf die Auswertung von Simulatorübungen ausgedehnt (Lois et al. 2008). Auch methodisch wird an der HRA weiter gearbeitet. Wichtige Ansätze sind MERMOS (Bieder et al. 1998), ATHEANA (United States Nuclear Regulatory Commission 2000), SPAR-H (Gertmann et al. 2005) und NARA (Kirwan et al. 2004).

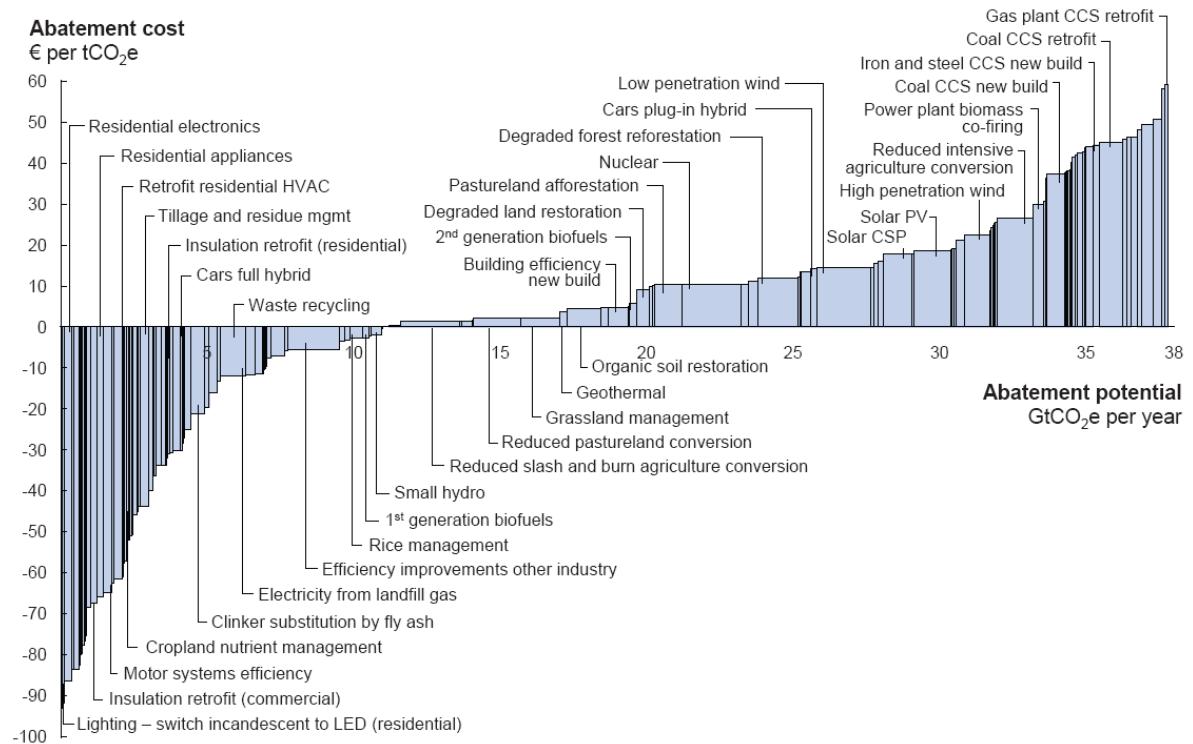
In der HRA wird der Erkenntnis Rechnung getragen, dass die Wahrscheinlichkeit für eine falsche Operateurentscheidung im Zeitbereich zwischen 10 bis 30 Minuten nach Anforderung deutlich abnimmt. Dies ist bei der leittechnischen Nachrüstung heutiger Kernkraftwerke im Hinblick auf die Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle eingeflossen. Moderne Leittechnik erfordert es nicht, dass die Operateure in den ersten 30 Minuten nach dem auslösenden Ereignis eines Störfalls in den Ablauf der Aktionen des Sicherheitssystems eingreifen. Zudem werden sie daran gehindert, eine sicherheitsgerichtete Aktion des Schutzsystems zurückzunehmen. Man spricht hier von Karenzzeit. Zusätzliche sicherheitsgerichtete Handlungen, also z.B. eine zusätzliche Handauslösung der Reaktorschnellabschaltung oder der Versuch, ausgefallene Stromversorgungsschienen wieder mit Spannung zu beaufschlagen, sind jedoch stets möglich.

Der hohen Bedeutung der Karenzzeit für die Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Fehlhandlungen des Personals wird bei der Auslegung von Reaktoren der Generationen III und III+ dadurch Rechnung getragen, dass die Karenzzeiten auf mehrere Stunden bis Tage verlängert werden. Die Sicherheitssysteme beherrschen die Störfälle ohne sicherheitsgerichtetes Eingreifen des Personals für Zeiträume zwischen 12 und 72 Stunden, ehe wieder ein aktives Eingreifen durch das Personal erforderlich wird (siehe Abbildung in Anhang 5).

Anhang 7: Vermeidungskosten von Treibhausgasemissionen

Abbildung 11 Globale Vermeidungskostenkurve (Mc Kinsey & Company 2009)

Global GHG abatement cost curve beyond business-as-usual – 2030



Note: The curve presents an estimate of the maximum potential of all technical GHG abatement measures below €60 per tCO₂e if each lever was pursued aggressively. It is not a forecast of what role different abatement measures and technologies will play.
Source: Global GHG Abatement Cost Curve v2.0

Anhang 8: Dosismaxima für verschiedene Szenarien

Tabelle 16 Zusammenfassung der summierten Dosismaxima in mSv/a für verschiedene Szenarien.

| Scenario | Conceptualisation | Parameter variation | Summed dose maximum [mSv a ⁻¹] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|--|--|----------------------|---|---|--|----------------------|---|---|---|----------------------|---|---|---------------------------|----------------------|---|---|---|----------------------|---|---|---|----------------------|---|---|--|----------------------|---|---|---------------------|---|-----------------------|---|-------------------|---|-----------------------|---|
| | | | SF | HLW | ILW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Reference Scenario Release of dissolved radionuclides | 1.1 Reference Conceptualisation | 1.1a Reference Case (RC) | 4.8×10^{-5} | 1.3×10^{-7} | 4.3×10^{-6} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1.1b Variability in canister inventory ¹ | <table> <tr><td>9 BWR UO₂-48²</td><td>2.8×10^{-8}</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>4 PWR UO₂-48²</td><td>1.6×10^{-8}</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>3 PWR UO₂-48 + 1 PWR MOX-48²</td><td>2.5×10^{-8}</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>4 PWR UO₂-55</td><td>3.6×10^{-8}</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>3 PWR UO₂-55 + 1 PWR UO₂-65</td><td>4.4×10^{-8}</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>3 PWR UO₂-55 + 1 PWR UO₂-75</td><td>5.2×10^{-8}</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>3 PWR UO₂-48 + 1 PWR MOX-65</td><td>3.3×10^{-8}</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>COGEMA²</td><td>-</td><td>1.6×10^{-10}</td><td>-</td></tr> <tr><td>BNFL²</td><td>-</td><td>2.1×10^{-10}</td><td>-</td></tr> </table> | 9 BWR UO ₂ -48 ² | 2.8×10^{-8} | - | - | 4 PWR UO ₂ -48 ² | 1.6×10^{-8} | - | - | 3 PWR UO ₂ -48 + 1 PWR MOX-48 ² | 2.5×10^{-8} | - | - | 4 PWR UO ₂ -55 | 3.6×10^{-8} | - | - | 3 PWR UO ₂ -55 + 1 PWR UO ₂ -65 | 4.4×10^{-8} | - | - | 3 PWR UO ₂ -55 + 1 PWR UO ₂ -75 | 5.2×10^{-8} | - | - | 3 PWR UO ₂ -48 + 1 PWR MOX-65 | 3.3×10^{-8} | - | - | COGEMA ² | - | 1.6×10^{-10} | - | BNFL ² | - | 2.1×10^{-10} | - |
| 9 BWR UO ₂ -48 ² | 2.8×10^{-8} | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 PWR UO ₂ -48 ² | 1.6×10^{-8} | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 PWR UO ₂ -48 + 1 PWR MOX-48 ² | 2.5×10^{-8} | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 PWR UO ₂ -55 | 3.6×10^{-8} | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 PWR UO ₂ -55 + 1 PWR UO ₂ -65 | 4.4×10^{-8} | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 PWR UO ₂ -55 + 1 PWR UO ₂ -75 | 5.2×10^{-8} | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 PWR UO ₂ -48 + 1 PWR MOX-65 | 3.3×10^{-8} | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COGEMA ² | - | 1.6×10^{-10} | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| BNFL ² | - | 2.1×10^{-10} | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1c Reduced canister lifetime | 5.2×10^{-5} | 1.3×10^{-7} | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1d Pessimistic near field geochemical dataset | 5.1×10^{-5} | 9.9×10^{-6} | 4.3×10^{-6} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1e Increased glass dissolution rate in HLW | - | 1.3×10^{-7} | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1f Increased water flow rate in geosphere (10-fold increase) | 1.9×10^{-4} | 4.3×10^{-7} | 1.8×10^{-5} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1g Decreased water flow rate in geosphere (10-fold decrease) | 3.7×10^{-5} | 1.0×10^{-7} | 3.3×10^{-6} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1h Pessimistic geosphere sorption constants | 9.4×10^{-5} | 2.3×10^{-7} | 8.7×10^{-6} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1i Pessimistic near field and geosphere geochemical dataset | 1.0×10^{-4} | 1.0×10^{-5} | 8.7×10^{-6} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1j Pessimistic geosphere diffusion constants | 3.5×10^{-4} | 2.8×10^{-7} | 1.7×10^{-4} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1k Pessimistic treatment of ¹⁴ C (organic) in SF | 4.8×10^{-5} | - | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.2 Solubility-limited dissolution of SF | 1.2a Base Case only | 3.7×10^{-5} | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.3 Bentonite thermal alteration | 1.3a Base Case only | 4.9×10^{-5} | 1.5×10^{-7} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.4 Glacially-induced flow in the Opalinus Clay | 1.4a Base Case only | 7.7×10^{-5} | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.5 Additional barrier provided by confining units | 1.5a Vertical transport through confining units | 2.3×10^{-5} | 5.3×10^{-8} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1.5b Horizontal transport in local aquifers | 3.6×10^{-6} | 6.9×10^{-9} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.6 Radionuclide release affected by ramp / shaft | 1.6a Base Case | 4.7×10^{-5} | 1.3×10^{-7} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1.6b Increased hydraulic conductivity of EDZ (100-fold increase) | 4.6×10^{-5} | 1.2×10^{-7} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.7 Convergence-induced release affected by ramp (ILW) | 1.7a Steady-state hydraulics | - | 4.3×10^{-6} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1.7b Water pulse | - | 3.2×10^{-6} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.8 Gas-induced release of dissolved radionuclides affected by ramp / shaft ³ | 1.8a Base Case (ILW: 50 %, $0.05 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$) | 4.0×10^{-6} | 4.2×10^{-6} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1.8b Increased water flow rate in ILW (100 %, $0.3 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$) | - | 4.6×10^{-5} | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabelle 16 Zusammenfassung der summierten Dosismaxima in mSv/a für verschiedene Szenarien.(Forts.)

| Scenario | Conceptualisation | Parameter variation | Summed dose maximum [mSv a ⁻¹] | | | |
|---|---|--|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | | SF | HLW | ILW | |
| 2. Alternative Scenario 1 Release of volatile radionuclides along gas pathways | 2.1 Release of ¹⁴ C from SF and ILW as volatile species in the gas phase not affected by ramp / shaft ("tight seals") ³ | Gas permeability [m ²] | 2.1a 10 ⁻²³ | 5.8 × 10 ⁻⁷ | - | 1.0 × 10 ⁻⁷ |
| | | | 2.1b 10 ⁻²² | 3.4 × 10 ⁻⁶ | - | 4.3 × 10 ⁻⁷ |
| | | | 2.1c 0 | 5.2 × 10 ⁻⁷ | - | 1.0 × 10 ⁻⁷ |
| | 2.2 Release of ¹⁴ C from SF and ILW as volatile species in the gas phase affected by ramp / shaft ("leaky seals") ³ | Gas permeability [m ²] | 2.2a 10 ⁻²³ | 3.7 × 10 ⁻⁵ | - | 7.2 × 10 ⁻⁶ |
| | | | 2.2b 10 ⁻²² | 3.6 × 10 ⁻⁵ | - | 6.7 × 10 ⁻⁶ |
| | | | 2.2c 0 | 3.7 × 10 ⁻⁵ | - | 7.2 × 10 ⁻⁶ |
| 3. Alternative Scenario 2 Release of radionuclides affected by human actions | 3.1 Borehole penetration ³ | 3.1a Near hit, 2 canisters / 1 ILW-1 tunnel affected | 3.3 × 10 ⁻⁵ | 5.3 × 10 ⁻⁶ | 1.6 × 10 ⁻⁴ | |
| | | | 3.1b Near hit, 4 canisters affected | 4.4 × 10 ⁻⁵ | 1.1 × 10 ⁻⁵ | - |
| | | | 3.1c Near hit, 2 canisters / 1 ILW-1 tunnel affected, increased water flow rate | 7.6 × 10 ⁻⁵ | 1.3 × 10 ⁻⁵ | 1.4 × 10 ⁻² |
| | | | 3.1d Near hit, 2 canisters / 1 ILW-1 tunnel affected, decreased water flow rate | 7.0 × 10 ⁻⁷ | 2.0 × 10 ⁻⁷ | 1.6 × 10 ⁻⁶ |
| | | | 3.1e Direct hit ³ | 1.6 × 10 ⁻³ | - | - |
| | | | 3.1f Direct hit ³ , increased water flow rate | 2.5 × 10 ⁻³ | - | - |
| | | | 3.1g Direct hit ³ , decreased water flow rate | 1.3 × 10 ⁻⁴ | - | - |
| | 3.2 Deep groundwater extraction from Malm aquifer (production of well as dilution) ³ | Plume capture efficiency | 3.2a 10 % | 9.6 × 10 ⁻⁶ | 2.4 × 10 ⁻⁸ | 8.6 × 10 ⁻⁷ |
| | | | 3.2b 100 % | 9.6 × 10 ⁻⁵ | 2.4 × 10 ⁻⁷ | 8.6 × 10 ⁻⁶ |
| | 3.3 Abandoned repository | 3.3a Base Case only | | 4.7 × 10 ⁻⁵ | 1.3 × 10 ⁻⁷ | 3.6 × 10 ⁻⁶ |
| 4. "What if?" cases to investigate robustness of the disposal system | 4.1 High water flow rate in geosphere | 4.1a Increased water flow rate in geosphere (100-fold increase) | | 1.9 × 10 ⁻³ | 2.2 × 10 ⁻⁶ | 1.5 × 10 ⁻⁴ |
| | | | | 1.3 × 10 ⁻⁴ | 1.3 × 10 ⁻⁷ | 1.4 × 10 ⁻⁴ |
| | | | | 5.3 × 10 ⁻⁴ | 1.3 × 10 ⁻⁷ | - |
| | | | | 6.5 × 10 ⁻⁴ | 4.0 × 10 ⁻⁶ | 1.1 × 10 ⁻² |
| | | | | 2.7 × 10 ⁻³ | 1.6 × 10 ⁻⁵ | - |
| | 4.2 Transport along transmissive discontinuities | 4.2a/e 1 discontinuity ($T = 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) affecting 27 SF/HLW canisters and entire ILW repository | | 1.9 × 10 ⁻⁴ | - | - |
| | | | | 5.3 × 10 ⁻⁴ | 1.3 × 10 ⁻⁷ | - |
| | 4.3 SF: Increased fuel dissolution rate | 4.3a 10-fold increase | | 1.9 × 10 ⁻⁴ | - | - |
| | | | | 5.0 × 10 ⁻⁴ | - | - |
| | | | | 1.9 × 10 ⁻⁴ | - | 4.3 × 10 ⁻⁶ |
| | 4.4 Redox front (SF/ILW compacted hulls) | 4.4a Base Case only | | - | - | - |
| | | | | - | - | - |
| | 4.5 ILW: Gas-induced release of dissolved radionuclides through the ramp only ³ | Water flow rate | 4.5a 50 %, 0.05 m ³ a ⁻¹ | - | - | 1.1 × 10 ⁻⁵ |
| | | | 4.5b 100 %, 0.3 m ³ a ⁻¹ | - | - | 3.4 × 10 ⁻⁴ |
| | | Gas permeability [m ²] | 4.6a 10 ⁻²³ | 4.9 × 10 ⁻⁵ | - | 9.7 × 10 ⁻⁶ |
| | | | 4.6b 10 ⁻²² | 4.7 × 10 ⁻⁵ | - | 9.0 × 10 ⁻⁶ |
| | | | 4.6c 0 | 4.9 × 10 ⁻⁵ | - | 9.7 × 10 ⁻⁶ |

Tabelle 16 Zusammenfassung der summierten Dosismaxima in mSv/a für verschiedene Szenarien.(Forts.)

| Scenario | Conceptualisation | Parameter variation | Summed dose maximum [mSv a ⁻¹] | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | SF | HLW | ILW | |
| 4. "What if?" cases to investigate robustness of the disposal system | 4.7 Poor near field and pessimistic near field/geosphere geochemical dataset | Water flow rate in geosphere | 4.7a RC flow rate | 4.3×10^{-4} | 1.1×10^{-5} | 8.7×10^{-6} |
| | | | 4.7b 10-fold increase | 1.5×10^{-3} | 4.4×10^{-5} | 3.5×10^{-6} |
| | | | 4.7c 100-fold increase | 1.0×10^{-2} | 9.6×10^{-5} | 2.6×10^{-4} |
| | 4.8 No advection in geosphere (diffusive transport only) | 4.8a Base Case only | | 1.8×10^{-5} | 4.8×10^{-6} | 1.1×10^{-6} |
| | 4.9 SF: Increased cladding corrosion rate | 4.9a Base Case only | | 4.8×10^{-5} | - | - |
| | 4.10 Kd(l) for NF and geosphere = 0 | 4.10a Base Case only | | 1.1×10^{-4} | 2.5×10^{-7} | 9.7×10^{-6} |
| 5. Design and System Options | 4.11 Decreased transport distance in Opalinus Clay (0 m) | 4.11a Base Case only | | 8.1×10^{-5} | 2.1×10^{-7} | 7.3×10^{-6} |
| | 5.1 Increased waste arisings (300 GWa(e)) | 5.1a Base Case only | | 8.1×10^{-5} | - | - |
| | 5.2 ILW high force compacted waste option | 5.2a Base Case only | | - | - | 4.3×10^{-6} |
| | 5.3 SF canister with Cu shell ¹ | 5.3a Canister breaching at 10^5 a | | 4.4×10^{-5} | - | - |
| | | 5.3b Initial defect (small initial pinhole, full breaching at 10^5 a) ² | | 1.5×10^{-9} | - | - |
| | | 5.3c Initial defect (Large initial pinhole, full breaching at 10^5 a) ² | | 4.9×10^{-9} | - | - |
| 6. Illustration of effects of biosphere uncertainty | 6.1 Reference and alternative geomorphology | 6.1a Reference area (RC) | | 4.8×10^{-5} | 1.3×10^{-7} | 4.3×10^{-6} |
| | | 6.1b Sedimentation area | | 2.3×10^{-5} | 6.0×10^{-8} | 2.0×10^{-6} |
| | | 6.1c Wetland | | 4.4×10^{-6} | 1.2×10^{-8} | 3.9×10^{-7} |
| | | 6.1d Exfiltration to spring located at valley side ³ | | 4.9×10^{-5} | 1.2×10^{-7} | 4.4×10^{-6} |
| | 6.2 Reference and alternative climates | 6.2a Present-day climate (RC) | | 4.8×10^{-5} | 1.3×10^{-7} | 4.3×10^{-6} |
| | | 6.2b Drier/warmer than present-day climate | | 5.3×10^{-4} | 1.6×10^{-6} | 4.6×10^{-5} |
| | | 6.2c Wetter/warmer than present-day climate | | 1.6×10^{-5} | 4.3×10^{-8} | 1.4×10^{-6} |
| | | 6.2d Periglacial climate | | 4.8×10^{-7} to 4.8×10^{-5} | 1.3×10^{-9} to 1.3×10^{-7} | 4.3×10^{-6} to 4.3×10^{-6} |

¹ Summed dose maximum for a single canister

² Reference canister loadings

³ Summed dose maxima include only the contributions from the release paths that characterise the case under consideration

Anhang 9: Auswirkungen von Uranabbau und Weiterverarbeitung

Tabelle 17 Übersicht der Auswirkungen von Uranabbau und Weiterverarbeitung (The Pembina Institute 2006)

| Abfallproduktion | Freisetzungen in die Atmosphäre | Wasserbelastung | Auswirkungen auf Landschaft und Ökosysteme |
|--|---|--|--|
| <p>Abraum</p> <ul style="list-style-type: none"> – Grosse Volumina – Kann radioaktive und gefährliche Schadstoffe enthalten – Auswaschung von Säure (Acid Mine Drainage AMD) führt zu Versauerung von Oberflächen- und Grundwasser – Belastung durch Staub kontaminiert mit Radionukliden, Schwermetallen und Feinstaub – Radonbelastung durch Abfallgestein <p>Tailings</p> <ul style="list-style-type: none"> – Grosse Volumina – Beinhaltet Radionuklide und gefährliche Schadstoffe – Auswaschung von Säuren – Risiko der Kontamination von Grundwasser und Oberflächenwasser – Freisetzung von mit Radionukliden, Schwermetallen und Feinstaub belasteten Stäuben – Risiko des Ausflusses von Tailings | <ul style="list-style-type: none"> – Radonaustritt aus dem Untergrund der Minen durch Lüftung – Radonaustritt durch Abbau an der Oberfläche – VOCs, Radionuklide, Feinstaub, NOx und SOx Emissionen durch Zerkleinerung des Uranerzes – Treibhausgas, Feinstaub, NOx und SOx Emissionen durch Arbeitsgeräte und Fahrzeuge – Feinstaub, Schwermetalle und Radionuklide im Staub an der Oberfläche der Minen, in Abraum- und Tailing-Bereich | <ul style="list-style-type: none"> – Grundwasserverschmutzung durch Tailings und Abraumbereiche – Oberflächenwasser-verschmutzung durch Ableitung von Minenwasser und Prozesswasser, und Oberflächendrainage der Tailings und des Abraumbereiches – Unterbrechung von Oberflächen- und Grundwasserflüsse durch Minenaktivitäten | <ul style="list-style-type: none"> – Landverbrauch durch Minen, Einrichtungen, Tailings und Abraumbereiche – Erhöhte Konzentrationen von radioaktivem Material und Schwermetallen in Flora und Fauna und der Nahrungskette in der Umgebung der Minen |
| | | | |

Anhang 10: Auswirkungen auf die indigene Bevölkerung

Im Norden des Niger baut der französische AREVA-Konzern seit rund 40 Jahren Uran ab. Die lokale Nichtregierungsorganisation Aghirin'man – unterstützt durch westliche NGOs – stellt die Politik des Konzerns in Frage. Nach Angaben von Aghirin'man existiert praktisch kein Strahlenschutz für die Minenarbeiter, es wird radioaktiver Abraum liegen gelassen und das Wasser in der Umgebung der Mine ist radioaktiv belastet. An öffentlichen Wasserstellen sollen die Radioaktivitätsmesswerte zwischen dem 7- bis 110fachen über den Grenzwerten der WHO liegen (Lindemann & Wippel 2008). Im Januar 2008 hat der AREVA-Konzern den Public Eye Award erhalten, welche Unternehmen auszeichnet, die ihre soziale und ökologische Verantwortung nicht wahrnehmen.

Das unabhängige Institut CRIIRAD (Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité) hat zwischen 2003 und 2005 eine Untersuchung der Umweltfolgen von Uranabbau im Niger durchgeführt. CRIIRAD stellte dabei Folgendes fest (CRIIRAD 2005):

- eine überhöhte Strahlenbelastung (nach WHO Standard) von Trinkwasserproben;
- hohe Belastung der Minenarbeiter und der Bevölkerung in der Region durch Radon-Freisetzung aus der Mine sowie aus den Tailings;
- Unzulängliches Abfallmanagement für Abraum und Tailings: keinerlei Kennzeichnung der Lagerstätten, kein Zaun um die Lagerstätten, keinerlei Abschirmung der Lagerstätten gegenüber der Luft;
- Unzulängliche Beseitigung der Folgen eines Unfalls im Jahre 2004 beim Transport von angereichertem Uran, noch einen Monat später war die deutlich erhöhte Strahlenbelastung messbar;
- radioaktiv belastetes Altmetall wird nicht angemessen entsorgt. Es findet sich, wie auch andere Studien bestätigen, regelmässig auf den Märkten in der Umgebung zum Verkauf.

Im Gegensatz dazu unternehmen einige Unternehmen Anstrengungen, Uran umwelt- und sozialverträglicher abzubauen. So ist beispielsweise der Cameco-Konzern, welcher in Kanada, den USA und Kasachstan Uran abbaut, nach dem ISO 14001 Standard für Umweltmanagement zertifiziert. Zusätzlich werden im Sozialbereich Anstrengungen unternommen. Beispielsweise wurden 2007 71% der für Cameco geleisteten Dienstleistungen durch Firmen im Besitz der lokalen Bevölkerung bereitgestellt (Responsible Miner 2008).

Anhang 11: Mögliche zusätzliche Uranressourcen: Beispiel „Abgereichertes Uran“

Es existieren weltweit sehr grosse Lagerbestände an abgereichertem Uran. Allein in den USA lagern nach Angaben des Amerikanischen Energiedepartements insgesamt 686'500 t abgereichertes Uran in Form von Uranhexafluorid (US Department of Energy 2008).

Abgereichertes Uran findet Verwendung bei der Rezyklierung von Plutonium, wo es in MOX-Brennelementen zur Einstellung der benötigten Spaltstoffkonzentration als nichtspaltbares Nuklid zugesetzt wird. Weiter existieren technische Anwendungen ausserhalb einer energetischen Nutzung wie z.B. als Material für Strahlenabschirmungen, als Ballast (Flugzeugbau) oder als Projektilmaterial mit hoher Durchschlagskraft in der konventionellen Waffentechnik. Letzteres ist international wegen der mit dem Einsatz verbundenen Strahlenrisiken stark unter Kritik geraten (siehe z.B. Diehl 1999).

Die vorhandenen Mengen an abgereichertem Uran stellen auch eine energetische Reserve dar. In den in Entwicklung befindlichen Brutreaktoren mit schnellen Neutronen kann das mit thermischen Neutronen nicht spaltbare Nuklid U-238, aus welchem das abgereicherte Uran fast vollständig besteht, in Plutonium umgesetzt und so einer Spaltung zugänglich gemacht werden. Die grundsätzliche Machbarkeit der Brütertechnologie ist mit einer ganzen Reihe von Reaktoranlagen, davon eine Anzahl grösserer Leistungsreaktoren, grosstechnisch demonstriert worden, wie der IAEA Fast Reactor Database entnommen werden kann (<http://www-frdb.iaea.org/index.html>). Verglichen mit der Kernfusion ist man einem kommerziellen Einsatz dieser Technologie wesentlich näher. Das abgereicherte Uran stellt somit eine potentielle Energiereserve dar. Die bereits vorhandenen Lagerbestände an Uran-238 wären für mehrere Tausend Jahre ausreichend.

Auch für die Brennstoffversorgung von thermischen Reaktoren stellen die Bestände an abgereichertem Uran eine gewisse Reserve dar. Mit dem Übergang zur Ultrazentrifuge zur Urananreicherung kann die Konzentration des U-235 im abgereicherten Uran bis auf 0.15% abgesenkt werden, ohne die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu beeinträchtigen. Auch Konzentrationen von 0.1% erscheinen bei entsprechend hohen Natururanpreisen machbar. Damit werden weitere Spaltstoffreserven erschlossen. Diese Möglichkeit wird als Re-Enrichment bezeichnet. Russland hat in den vergangenen Jahren Überkapazitäten von Anreicherungsanlagen mit Ultrazentrifugen genutzt, um niedrig angereichertes Uran aus abgereichertem Uran westlicher Herkunft zu gewinnen. Eine Beschreibung und Bewertung dieser Technik wurde von Diehl (2007) vorgenommen. Der Aufwand, um z.B. von 0.3 % auf 0.2 % abzureichern, ist etwa 2.5 mal höher als der ursprüngliche Aufwand für die Anreicherung, aus der das abgereicherte Uran mit 0.3 % U-235-Gehalt hervorging. Ausgehend von dieser Erkenntnis wird berechtigterweise ein Re-Enrichment auf Basis von Gas-Diffusionsanlagen kritisch gesehen, da dies mit einem sehr hohen Energieaufwand verbunden ist. Hingegen

bleiben Energieaufwand und Kosten bei Verwendung von Ultrazentrifugen ohne weiteres vertretbar. Ab einem Uranpreis von 25 \$/lb U₃O₈ (etwa 68 \$/kg Natururan) wird Re-Enrichment kostengünstiger als die Verwendung von Natururan.

Diehl (2007) bemängelt, dass sich vom Standpunkt der Reduzierung der Masse an abgereichertem Uran durch Re-Enrichment kaum etwas ändert. Dies ist jedoch offensichtlich und nur dann als Problem zu betrachten, wenn das abgereicherte Uran als Abfall betrachtet wird. Wie schon bemerkt, kann es jedoch auch als Rohstoff für die Konversion in neuen Spaltstoff gesehen werden.

Die Potentiale des Re-Enrichments werden im OECD/NEA Red Book (2007) dargelegt. Demnach beträgt der Bestand an abgereichertem Uran weltweit etwa 1.6 Mio. t. Jährlich kommen aus der laufenden Anreicherung ca. 60'000 t dazu. Eine Verwertung würde etwa einem Äquivalent von 450'000 t Natururan entsprechen und damit den heutigen Weltbedarf für ca. 7 Jahre decken können. Momentan fehlt dafür jedoch die notwendige Anreicherungskapazität. Die russischen Re-Enrichment-Aktivitäten haben im Zeitraum von 2001 bis 2006 zwischen 3 und 8 % des jährlichen weltweiten Bedarfs an Reaktorbrennstoff gedeckt.