

**Überlegungen zur Relevanz von Unsicherheiten und Fehlern in der Ermittlung des radioaktiven Inventars und der Abfalleigenschaften der Schachtanlage Asse II
(AP-A6)**

Darmstadt 17.11.2009

Im Auftrag des BMU

Vorhaben UM09A03205

Unterstützung des BMU bei der Aufsicht über Betrieb und Stilllegung der Asse

Öko-Institut e.V.
Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
D-64295 Darmstadt
Telefon +49 (0) 6151 - 8191 - 0
Fax +49 (0) 6151 - 8191 - 33

Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 50 02 40
D-79028 Freiburg
Hausadresse
Merzhauser Straße 173
D-79100 Freiburg
Telefon +49 (0) 7 61 - 4 52 95-0
Fax +49 (0) 7 61 - 452 95-88

Büro Berlin
Novalisstraße 10
D-10115 Berlin
Telefon +49 (0) 30 - 28 04 86-80
Fax +49 (0) 30 - 28 04 86-88

Überlegungen zur Relevanz von Unsicherheiten und Fehlern in der Ermittlung des radioaktiven Inventars und der Abfalleigenschaften der Schachtanlage Asse II

(AP-A6)

Autoren:

Dipl.-Biol. Mathias Steinhoff

Dipl.-Geol. Stefan Alt

unter Mitwirkung von Christian Küppers

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

1	Anlass	1
2	Vorgehensweise	1
3	Unsicherheiten des Asse-Inventars nach den Indizien der ESK-SSK-Ad-hoc-Arbeitsgruppe ASSE	2
4	Eigenschaften der von Unsicherheiten des Asse- Nuklidinventars betroffenen Radionuklide	3
4.1	Tritium, Kohlenstoff-14, Chlor-36.....	3
4.2	Isotope des Urans	5
4.3	Isotope des Plutoniums	8
4.4	Radium-228.....	10
4.5	Neptunium-237.....	10
4.6	Cobalt-60, Nickel-63.....	11
4.7	Andere Nuklide.....	12
5	Nichtradiologische Abfalleigenschaften und Gebindezustand	13
5.1	Nichtradiologische Annahmebedingungen	13
5.2	Dokumentierte Abweichungen von den nichtradiologischen Annahmebedingungen	13
5.3	Hinweise zur Handhabung von Abfällen mit abweichenden nichtradiologischen Eigenschaften im Zuge der Stilllegungsoptionen „Rückholung“ und „Umlagerung“	16
6	Zusammenfassung	21
7	Literaturverzeichnis	24

1 Anlass

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat das Öko-Institut im Rahmen des Vorhabens UM09A03205 mit der Erstellung einer Unterlage beauftragt, die Bedeutung von Unsicherheiten in der Abschätzung des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars <GSF 02> und der stofflichen Eigenschaften und Qualität der im Einlagerungszeitraum angelieferten Abfallgebinde im Hinblick auf die Stilllegung der Schachanlage Asse II zu beurteilen.

Das Aktivitätsinventar der Schachanlage ASSE II wurde in <GSF 02> näherungsweise nachträglich ermittelt, um als Grundlage für einen Nachweis der Langzeitsicherheit zu dienen. Die so ermittelte Datenbasis wurde in der Datenbank ASSEKAT dokumentiert. Bis dato existierte ein derartiges nuklidspezifisches und auf die einzelnen Einlagerungskammern bezogenes Aktivitätsinventar nicht.

Das in der Datenbank ASSEKAT dokumentierte Aktivitätsinventar war auch Grundlage der Machbarkeitsstudien für die im Optionenvergleich zu bewertenden Stilllegungsoptionen. Insbesondere die Machbarkeitsstudie zur Rückholung <DMT 09> verweist explizit auf die Annahme, dass das in ASSEKAT dargestellte Inventar, nach einer vorgenommenen Korrektur des offensichtlich erheblich unterschätzten Tritiuminventars durch „Erhöhung der Tritiumaktivität um ca. $2E+12$ Bq“ für die Charakterisierung der Abfallgebinde <DMT 09>, die Verhältnisse unter Tage korrekt wiedergibt. Die Machbarkeitsstudie zur Umlagerung <ERC 09> beruht auf der gleichen Annahme, hält aber eine Charakterisierung nicht für erforderlich und verweist demzufolge auch nicht auf eine konkrete Korrektur des Tritiuminventars.

Im Rahmen der Beratungen der Entsorgungskommission kamen seit Sommer 2008 vermehrt Zweifel an der Plausibilität des nachträglich abgeleiteten Inventars auf. Die diesbezüglichen Indizien hat die ESK-SSK-Ad-hoc-Arbeitsgruppe ASSE aktuell in ihrem Schreiben vom 02.11.2009 zusammengestellt.

Ziel der vorliegenden Ausarbeitung ist es, die Relevanz der derzeit diskutierten Unstimmigkeiten des Asse-Inventars für die Stilllegung der Schachanlage Asse genauer zu betrachten.

2 Vorgehensweise

Kapitel 3 fasst zunächst die im Rahmen der Beratungen der ESK-SSK-Ad-hoc-Arbeitsgruppe ASSE gesammelten Indizien für Abweichungen des Abfallinventars von den Erwartungswerten zusammen. Kapitel 4 enthält radiologische Überlegungen zu den in Rede stehenden Radionukliden und deren Einfluss auf Strahlenschutzaspekte beim Umgang mit den Abfällen und im Hinblick auf eine Langzeitsicherheitsbetrachtung. Kapitel 5 behandelt die möglichen Auswirkungen von nicht den Erwartungen entsprechenden Abfallgebänden auf deren Handhabung im Zuge der Stilllegung.

3 Unsicherheiten des Asse-Inventars nach den Indizien der ESK-SSK-Ad-hoc-Arbeitsgruppe ASSE

Die ESK-SSK-Ad-hoc-Arbeitsgruppe ASSE hat in ihrem Schreiben vom 02.11.09 folgende Sachverhalte und Fehlerquellen aufgeführt, die im Einzelfall zu Zweifeln an der Plausibilität des Asse-Inventars geführt haben:

Nuklidspezifische Indizien

- Unterschätzung des Plutonium-Inventars (ca. 28 statt 9 kg)
- Unterschätzung des Tritium-Inventars aus AVR-Graphit, insbesondere in Kammer 12/750 um 2 Größenordnungen (zerfallskorrigiert „heute“ ca. $5\text{-}6\text{E}12$ Bq anstatt ca. $9\text{E}10$ Bq 2003), mit Auswirkungen auf das Gesamtinventar an Tritium ($1,2\text{E}12$ Bq 2003 in <GSF 02>)
- Aktivierung von herstellungsbedingten Verunreinigungen im Graphit, die zu höheren Inventarannahmen als in <GSF 02> führen können:
für Kohlenstoff-14 (um ca. Faktor 2,5)
Chlor-36 (um ca. Faktor 2,2)
Calcium-41 (um ca. 4 Größenordnungen)
- Fehler bei der Berechnung des Inventars an Radium-228 aus der Thorium-232 Zerfallsreihe
- Nichtberücksichtigung von Aktivierungsprodukten aus Edelstahl (Silber-110, Cobalt-60-58, Nickel-59-63, Eisen-55-59, Zink-65 und ggf. weitere Nuklide)
- Ggf. weitere Unterschätzung des Tritium- und des Kohlenstoff-14-Inventars aus Ionentauscherharzen aus KKW

Nichtradiologische bzw. nicht nuklidspezifische Indizien

- Abfalldeklaration über Beispielnuklide ohne Angabe genauerer Nuklidspektren (unzureichende Qualität der Angaben auf den Begleitlisten).
- Bei der Deklaration durch den Ablieferer vergessene Nuklide, die aus der sonst vorliegenden Abfallbeschreibung nicht mehr herleitbar sind (unzureichende Qualität der Angaben auf den Begleitlisten).
- Bei der Deklaration vergessene Nuklide, die aus physikalischen Überlegungen heraus bei der Inventarermittlung hätten nachträglich hergeleitet werden können (unsichere nachträgliche Herleitung der Nuklidvektoren).
- Offenbar absichtlich falsch deklarierte Fässer, hier insbesondere aufgetreten bei für die Asse bestimmten Abfallgebinden in der Landessammelstelle (LSST) Geesthacht, Ablieferer Amersham-Buchler.
- Ungenügend konditionierte Abfallgebinde in der LSST Geesthacht (fehlerhafte oder fehlende Betonauskleidung).
- Freie Flüssigkeiten in Abfallgebinden, aufgetreten in der LSST Geesthacht.
- Nicht oder ungenügend fixierte, flüssige oder Flüssigkeiten enthaltende Abfälle aus Kernkraftwerken, insbesondere aufgetreten bei einem Transportzwischenfall (geplatzttes Fass) in der Schachanlage Asse im Jahr 1980.

- Berichte über Umlagerungen von Abfallgebinden in andere Einlagerungskammern innerhalb der Asse II, hier aus Kammer 7 in Kammer 6 NACH Beendigung der Abfalleinlagerung und offenbar ohne entsprechende Korrektur der Begleitlisten.

4 Eigenschaften der von Unsicherheiten des Asse-Nuklidinventars betroffenen Radionuklide

In <ESK/SSK 09> wurden alle bisher bekannten Unsicherheiten und Fehler zum radioaktiven Inventar der Schachanlage Asse zusammengefasst. In diesem Kapitel werden die dort erwähnten Radionuklide, bei denen Unsicherheiten des Inventars der Asse bestehen, radiologisch charakterisiert.

Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung der Relevanz von Inventarunsicherheiten dieser Radionuklide. Dabei werden die Aspekte Strahlenexposition der Beschäftigten bei Tätigkeiten mit den Abfällen bei gegebenenfalls erfolgender Rückholung oder Umlagerung, Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ableitungen und Störfälle sowie Aspekte der Langzeitsicherheit berücksichtigt.

Als Quelle zur Ermittlung der Relevanz von Inventarunsicherheiten einzelner Radionuklide für die Strahlenexposition der Bevölkerung oder die potenzielle Strahlenexposition durch Störfälle werden die Quellterme hinzugezogen, die in der Studie der „Rückholung“ <DMT 09> für diese Berechnungen verwendet wurden. Diese Quellterme basieren auf Annahmen zur Freisetzung, wie z. B. der Integrität der Gebinde, Niederschlag von Radionukliden, Rückhaltung von Radionukliden durch Filter etc., die in der Studie zur Rückholung nicht im Einzelnen nachvollziehbar sind. Sofern Unsicherheiten den Annahmen in <DMT 09> zugrunde liegen würden, würden diese sich auch auf die Ergebnisse dieser Studie auswirken können.

Als Hilfsgröße für die Bewertung des Anteils von Radionukliden im Hinblick auf ihre Relevanz für die effektive Dosis durch Ingestion oder Inhalation werden die im Bundesanzeiger <BMU 01> veröffentlichten Dosiskoeffizienten für die effektive Dosis durch Ingestion oder Inhalation bei Erwachsenen verwendet.

Für die Bewertung von Radionukliden im Hinblick auf die Stärke der Gammastrahlung kann darüber hinaus als Hilfsgröße der jeweilige Dosisleistungskoeffizient des Nuklids für Gamma-Bodenstrahlung für die effektive Dosis aus <BMU 01> herangezogen werden. Soweit Tochternuklide zu berücksichtigen sind, werden die Dosisleistungskoeffizienten für Gamma-Bodenstrahlung für die effektive Dosis des jeweiligen Nuklids inkl. Tochternukliden verwendet.

4.1 Tritium, Kohlenstoff-14, Chlor-36

Die Radionuklide Tritium und Kohlenstoff-14 sind vor allem deshalb für die Strahlenexposition der Beschäftigten und der Bevölkerung relevant, da diese Radionuklide gasförmig freigesetzt und durch Filter kaum zurückgehalten werden.

Tritium (Halbwertszeit: 12,33 Jahre) ist ein reiner Betastrahler und besitzt einen relativ niedrigen Dosiskoeffizienten von $1,8E-11$ Sv/Bq (Ingestion: gelöst in Wasser, Inhalation: als HTO) für die effektive Dosis von Erwachsenen durch Ingestion und durch Inhalation. Durch einen hohen Anteil von Tritium an einem Quellterm für die Ermittlung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ableitungen können sich Unsicherheiten beim Inventar von Tritium auf die Höhe der berechneten Strahlenexposition der Beschäftigten und der Bevölkerung auswirken.

In der Studie zur Rückholung <DMT 09> wurden für die Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ableitungen die Inventare der Kammern 7/750 und 1/750 als abdeckend bewertet und zur Berücksichtigung der innerhalb eines Jahres erfolgenden Rückholung der LAW aus mehreren Kammern mit dem Faktor 3 bzw. dem Faktor 4 multipliziert. Die im Schreiben der ESK/SSK-Ad-hoc-Arbeitsgruppe Asse aufgeführten Unsicherheiten zum Tritium-Inventar beziehen sich aber vor allem auf die Einlagerungskammer 12/750, die im Hinblick auf ihr ursprünglich angenommenes Tritium-Inventar etwa eine Größenordnung unter dem Tritium-Inventar der ELK 7/750 liegt. Darüber hinaus berücksichtigt die Studie zur Rückholung ein erhöhtes Tritiuminventar von $2E12$ Bq

In der Studie zur Rückholung <DMT 09> beträgt der Anteil der Tritiumaktivität in Bq am Quellterm für die Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ableitungen 90 % (Kammer 1/750). Der Beitrag der um Größenordnungen geringeren Inventaranteile von Radionukliden wie Americium-241, Plutonium-238, Plutonium-241, Uran-234, Uran-238 (s.u.) wirkt sich jedoch durch deren hohe Inhalationskoeffizienten bei einer Berechnung der Dosis erheblich aus, sodass abgeschätzt werden kann, dass der Beitrag von Tritium zur Dosis der Bevölkerung im Bereich von etwa nur 1/1000 (0,1 %) der insgesamt in <DMT 09> abgeschätzten Dosis liegt. Unsicherheiten beim Tritiuminventar in der in <ESK/SSK 09> vermuteten Größenordnung können sich auf die abgeschätzte Strahlenexposition der Bevölkerung zwar rechnerisch auswirken, sind derzeit aber nicht quantifizierbar. **Auf Grundlage der in <DMT 09> auf Basis von Freisetzunganteilen von Kammerinventaren abgeschätzten Strahlenexposition der Bevölkerung würde sich ein um Faktor 10 größer angenommenes Inventar an Tritium aber voraussichtlich nicht erheblich auf die Ergebnisse der Abschätzungen der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ableitungen bei einer Rückholung auswirken, da die Dosisbeiträge anderer Radionuklide den rechnerischen Wert viel stärker dominieren.**

Kohlenstoff-14 ist ein reiner Betastrahler mit einer Halbwertszeit von 5.730 Jahren. Der Dosiskoeffizient für die effektive Dosis Erwachsener durch Ingestion liegt mit $5,8E-10$ Sv/Bq (gelöst in Wasser) etwa eine Größenordnung über dem des Tritiums. Das Nuklidinventar von Kohlenstoff-14 in der Asse entspricht beim Gesamtinventar des LAW in etwa dem des Tritiums. Beim MAW liegt das Inventar von Kohlenstoff-14 etwa eine Größenordnung über dem von Tritium.

In den Quellterm für die Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung nach <DMT 09> geht Kohlenstoff-14 mit etwa 10 % des Anteils von Tritium ein. Dies liegt

daran, dass für die Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung in <DMT 09> Kammern ausgewählt wurden, die für die Belegung mit Behältern mit verlorener Abschirmung (VBA) und für die Belegung mit Behältern ohne verlorene Abschirmung (nVBA) repräsentativ sind. Die für VBA bzw. nVBA repräsentativen Kammern enthielten entweder weniger Kohlenstoff oder es wurde bei der Eruiierung des Quellterms von einer Rückhaltung von Kohlenstoff-14 Kredit genommen. Ob dies den realen Verhältnissen entspricht, kann jedoch derzeit nicht nachvollzogen werden.

Unsicherheiten beim Inventar von Kohlenstoff-14 sind somit für die Strahlenexposition der Beschäftigten durch Inhalation und für die Strahlenexposition der Bevölkerung vergleichbar relevant, wie Inventarunsicherheiten bei Tritium. Kohlenstoff-14 ist im Gegensatz zu anderen Radionukliden für die Dosis nicht dominierend.

Chlor-36 ist ein Betastrahler mit einer Halbwertszeit von 301.000 Jahren und daher im Hinblick auf Aspekte der Langzeitsicherheit radiologisch relevant. Der Ingestionsdosiskoeffizient für die effektive Dosis Erwachsener für Chlor-36 beträgt $9,30E-10$ Sv/Bq (gelöst in Wasser).

Der Anteil von Chlor-36 am Gesamtinventar liegt 8 bzw. 6 Größenordnungen unter dem Gesamtinventar der Gamma- und Beta-Strahler bei MAW bzw. LAW. In den Quellterm für die Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung in der Studie zur Rückholung <DMT 09> ging Chlor-36 auf Grund seines geringen Anteils am Inventar nicht ein. **Unsicherheiten beim Inventar von Chlor-36 um eine Größenordnung spielen im Hinblick auf die Strahlenexposition der Beschäftigten und der Bevölkerung bei einer Rückholung oder Umlagerung von Abfällen der Asse daher keine relevante Rolle.**

4.2 Isotope des Urans

In <ESK/SSK 09> wird u. a. beschrieben, dass wegen früher weniger wirksamen Trennungen bei Reinigungsstufen der Wiederaufbereitung höhere Gehalte an Neptunium und anderen Nukliden in den schwach radioaktiven Abfällen vorhanden sein können. Erwähnt werden außerdem möglicherweise erforderliche Korrekturen beim Uran- und Plutonium-Inventar.

Relevante Isotope des Urans sind hierbei Uran-232, Uran-233, Uran-234, Uran-235, Uran-236 und Uran-238. Der Anteil dieser Uran-Isotope am Inventar der der Asse nach <GSF 02> ist nachfolgend wiedergegeben.

Tabelle 1: Anteil der Isotope des Urans am Gesamtinventar der Asse II (Bezugsjahr 1980)

	Inventar MAW [Bq]	Inventar LAW [Bq]	Gesamtinventar [Bq]
Uran-232	5,29E+07	7,15E+08	7,63E+08
Uran-233	2,36E+09	2,13E+09	4,49E+09
Uran-234	4,75E+09	1,32E+12	1,33E+12
Uran-235	1,88E+08	5,23E+10	5,25E+10
Uran-236	7,72E+08	1,20E+10	1,27E+10
Uran-238	1,85E+09	1,26E+12	1,26E+12
Summe	9,97E+9	2,65E+12	2,66E+12
% Anteil am Gesamtinventar	0,00025	0,057	0,031

Uran-232 zerfällt zu den Tochternukliden Thorium-228, Radium-224, Radon-220, Polonium-216, Blei-212, Bismut-212, Polonium-212, Thallium-208. Uran-232 ist unter den in Tabelle 1 genannten Uranisotopen im Hinblick auf die Gammastrahlung bei einer Handhabung von Abfällen eher relevant als alle anderen genannten Uranisotope. Der hilfsweise als Maß hierfür heranzuziehende Dosiskoeffizient für die effektive Dosis von Erwachsenen für Gamma-Bodenstrahlung liegt mit $1,30E-15$ (Sv/s)/(Bq/m²) in der Größenordnung des Dosiskoeffizienten von Cobalt-60. Wichtig ist jedoch auch die Gesamtmenge des vorhandenen Isotops in den Kammern und letztlich in jedem einzelnen Behälter. Das Inventar von Uran-232 liegt in der MAW-Kammer etwa 7 Größenordnungen unter dem des Cobalt-60 und etwa 6 Größenordnungen unter dem des Cobalt-60 im Gesamtinventar des LAW. Auswirkungen auf die Direktstrahlung wären nur dann denkbar, wenn spezielle Abfälle mit einem hohen Uran-232-Anteil eingelagert worden wären (z. B. relativ reines Uran, das bestahlt und aufgearbeitet wurde oder bestrahlte Kugel-Brennelemente mit dem Brutstoff Thorium-232). Es würde sich dabei um einzelne Gebinde handeln, bei denen ein erhöhter Gehalt an Uran-232 durch Messung der Dosisleistung vor weiterer Handhabung festgestellt werden könnte. Eine erhebliche Verzögerung von Arbeiten während einer gegebenenfalls erfolgenden Rückholung ist dadurch nicht erkennbar.

Ebenfalls im Hinblick auf die Direktstrahlung relevant ist Uran-235 mit seinen radioaktiven Tochternukliden der Uran-Actinium-Zerfallsreihe (Thorium-231, Protactinium-231, Actinium-227, Thorium-227, Radium-223, Radon-219, Polonium-215, Blei-211, Bismut-211, Thallium-206, Francium-223 und Polonium-210). Der Dosisleistungskoeffizient für die Gamma-Bodenstrahlung liegt inkl. der Tochternuklide mit $1,5E-16$ (Sv/s)/(Bq/m²) jedoch eine Größenordnung unter dem von Cobalt-60. Das Inventar von Uran-235 ist in der MAW-Kammer 7 Größenordnungen geringer als das des Cobalt-60 und beim Inventar des gesamten LAW etwa 4 Größenordnungen geringer als das des Cobalt-60.

Alle anderen Uranisotope sind inklusive ihrer Tochternuklide für die Direktstrahlung bei Handhabung der Abfälle von untergeordneter Bedeutung, da die Uranisotope selbst und ihre Tochternuklide keine starken Gammastrahler sind.

Uran-234 zerfällt über die Kette Thorium-230, Radium-226, Radon-222, Polonium-218, Astat-218, Polonium-214, Blei-210, Bismut-210, Polonium-210, Blei-214, Ra-

don-218, Thallium-210, Blei-209, Quecksilber-206 und Thallium-206. Durch das Tochternuklid Radium-226 ist Uran-234 über den Pfad „Ingestion durch Trinkwasserkonsum“ radiologisch relevant und daher für Fragen der Langzeitsicherheit von grundsätzlicher Bedeutung.

Gleiches gilt für Uran-236 mit seinen radioaktiven Tochternukliden Thorium-232, Radium-228, Actinium-228, Thorium-228, Radium-224, Radon-220, Polonium-216, Blei-212, Bismut-212, Polonium 212 und Thallium-208. Hier führen vor allem die Nuklide Radium-228 und auch Thorium-232 beim Verzehr von Trinkwasser zu relevanten effektiven Dosen.

Der Zerfall von Uran-238 mündet über Thorium-234 und Protactinium-234 in die Zerfallsreihe des Uran-234.

Mit Ausnahme des Uran-233 (radioaktive Tochternuklide: Thorium-229, Radium-225, Actinium-225, Francium-221, Astat-217, Bismut-213, Polonium-213 und Blei-209) entsteht beim Zerfall aller anderen genannten Uran-Isotope auch Radon, das im Hinblick auf die Strahlenexposition der Beschäftigten und der Bevölkerung relevant ist, da Radon-Isotope als Edelgas durch Filter weitgehend nicht zurückgehalten werden können. Sofern Radon in der Luft vorliegt, sind stets auch seine kurzlebigen Zerfallsprodukte im Hinblick auf die Strahlenexposition relevant. Dazu gehören insbesondere Polonium-218, Blei-214, Bismut-214, und Polonium 214.

Für die Bevölkerung besteht im Hinblick auf das Radon aus dem Zerfall von Uran in der Schachanlage Asse II eine geringere Wahrscheinlichkeit der Exposition als für Beschäftigte, da ein großer Anteil der Mutternuklide des Radon als Staub bzw. Aerosole in Filtern zurückgehalten wird und die durch die Mutternuklide entstehenden Radonisotope und ihre Töchter relativ kurzlebig sind (HWZ Rn-220: 55,6 s, HWZ Rn-222: 3,8 d). Dadurch findet der Zerfall von Radon und seinen Tochternukliden teilweise bereits im Grubengebäude statt.

Alle Uranisotope sowie zahlreiche ihrer Tochternuklide sind als Alphastrahler und Betastrahler bei Ingestion und Inhalation von Bedeutung. Veränderungen des Nuklidinventars können sich daher auf Störfallbetrachtungen und, soweit die Uranisotope nicht durch Filter zurückgehalten werden können, auch auf die Strahlenexposition der Bevölkerung und der Beschäftigten auswirken. Im Quellterm, der in der Studie zur Rückholung <DMT 09> für die Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung abgeschätzt wurde, sind vor allem Uran-234 und Uran-238 mit $2,1E+4$ und $2,0E+4$ Bq relevant. Da für die Strahlenexposition jedoch die Anteile anderer Nuklide (Americium-241, Plutonium-241 und Plutonium-238) gegenüber dem Uran-Anteil dominierend sind, spielen Unsicherheiten im Uraninventar für die Strahlenexposition der Bevölkerung eine untergeordnete Rolle.

Der maximale Anteil der Aktivität der Uranisotope an der Gesamtaktivität der Quellterme für die Störfallbetrachtung in <DMT 09> beträgt etwa 2 % und setzt sich aus Uran-234, Uran-235, Uran-236 und Uran-238 zusammen.

Auf Grund der auch bei Störfallbetrachtungen wesentlich höheren Anteile an Plutoniumisotopen und Americium-241 sind die Beiträge des Urans zur in <DMT 09> berechneten Dosis durch Störfälle eher untergeordnet, so dass Unsicherheiten bezüglich des Urananteils nur geringe Bedeutung für diese Dosisberechnungen haben.

4.3 Isotope des Plutoniums

Die im Hinblick auf Unsicherheiten zur Masse an Plutonium im Nuklidinventar der Asse II in Frage kommenden Isotope des Plutoniums (Plutonium-238, Plutonium-239, Plutonium-240, Plutonium-241, Plutonium-241, Plutonium-242 und Plutonium-244) sind für die Direktstrahlung kaum relevant, da es sich nicht um starke Gammastrahler handelt.

Der Zerfall der verschiedenen Plutoniumisotope führt teilweise über Zwischenstufen in die Zerfallsreihen von Uranisotopen: Plutonium-238 zerfällt zum Uran-234, Plutonium-239 zum Uran-235 und Plutonium-240 zerfällt zum Uran-236. Plutonium-242 zerfällt zu Uran-238. Plutonium-244 zerfällt über Uran-240 und nachfolgend Neptunium-240 zu Plutonium-240.

Relativ kurze Halbwertszeiten bestehen bei Plutonium-241 mit 14,3 Jahren und Plutonium-238 mit 87,7 Jahren.

Durch den Zerfall von Plutonium über die Uran-Zerfallsreihen wirken sich Veränderungen des Plutonium-Inventars auch auf die Bildung von Radon und dessen Tochternukliden aus. Die Bildung von Radon erfolgt jedoch dabei in sehr langen Prozessen, da zunächst die langlebigen Uranisotope als Töchter des jeweiligen Plutoniums zerfallen müssen. Auswirkungen auf die Strahlenexposition der Bevölkerung ergeben sich damit erst nach Jahrzehnten nach einer gegebenenfalls durchzuführenden Rückholung und sind derzeit nicht als erheblich einzuschätzen.

Unsicherheiten des Inventars an Plutonium-241 wirken sich durch den Zerfall zu den über den Trinkwasserpfad radiologisch relevanten Isotopen Americium-241 und Neptunium-237 langfristig auf deren Inventar aus, insbesondere durch die relativ kurze Halbwertszeit des Plutonium-241 von 14,3 Jahren. Über den weiteren Zerfall zu Protactinium-233 mündet der Zerfall von Plutonium-241 in die Zerfallsreihe des Uran-233. Insbesondere die Bildung von Americium-241 ist im Hinblick auf die Strahlenexposition der Bevölkerung und die potenzielle Strahlenexposition durch Störfälle relevant.

Plutonium-241 ist ohne Berücksichtigung der diskutierten Tochternuklide im Hinblick auf Langzeitsicherheitsfragen aufgrund der relativ kurzen Halbwertszeit von 14,3 Jahren weniger relevant als andere Plutoniumisotope.

Durch den relativ hohen Anteil an Plutonium-238, Plutonium-239 und Plutonium-240 im Quellterm für die Ermittlung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ableitungen <DMT 09> wirken sich Unsicherheiten beim Inventar dieser Plutoniumisotope deutlich auf die Höhe der Strahlenexposition der Beschäftigten und der Bevölkerung aus, da die Plutonium-Isotope neben Americium-241 die Dosis dominieren. Der Anteil von Plutonium-241 am freigesetzten Quellterm der Kammer 1/750 ist um eine Größenordnung höher als der der übrigen genannten Plutoniumisotope. Der Dosiskoeffizient für die effektive Dosis durch Inhalation von Plutonium-241 (Erwachsene) liegt jedoch zwei Größenordnungen unter dem der anderen genannten Plutonium-Isotope, sodass Plutonium-241 gegenüber den o. g. Plutoniumisotopen die Strahlenexposition der Bevölkerung nach <DMT 09> weniger dominiert.

Unsicherheiten beim Inventar der Plutonium-Isotope Pu-238, Pu-239 und Pu-240 sind für die Strahlenexposition der Bevölkerung relevant und würden sich analog auf die Strahlenexposition der Beschäftigten durch Inhalation auswirken.

Da nach <DMT 09> der Grenzwert für die effektive Dosis der Bevölkerung durch Ableitungen (Altersgruppe Erwachsene) bei den verschiedenen Varianten der Rückholung zu maximal 15 % ausgeschöpft werden würde, würde sich ein um den Faktor 3 höheres Inventar an Pu-238, Pu-239 und Pu-240 erheblich auf die in <DMT 09> berechnete Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ableitungen auswirken. Die Grenzwertausschöpfung läge dann abgeschätzt im Bereich von etwa 50 %.

Unsicherheiten beim Plutonium-Inventar wirken sich vor allem auf die potenzielle Strahlenexposition der Bevölkerung durch störfallbedingte Freisetzungen aus. Dies ergibt sich daraus, dass der Anteil von Plutonium-241 und Plutonium-238 mit $2E+8$ Bq bzw. $1,2 E+7$ Bq (Gebinde aus Chargennummer 2874 <DMT 09>) sehr hoch ist. Zusammen mit Americium-241 tragen die genannten Plutoniumisotope im, in der Studie zur Rückholung <DMT 09> ermittelten, Quellterm zur Berechnung der potenziellen Strahlenexposition durch Störfälle erheblich zur Gesamtdosis bei. **Da der Grenzwert für die Knochenoberfläche nach <DMT 09> zu maximal 14 % ausgeschöpft werden würde, würden sich Inventarunterschiede beim Plutonium bereits bei einem doppeltem oder dreifachen höheren Anteil als derzeit angenommen erheblich auf die Ergebnisse der Berechnung der potenziellen Strahlenexposition bei Störfällen auswirken.**

Gerade für die Störfallbetrachtung ist das Inventar einzelner Gebinde relevant. Die in <DMT 09> durchgeführte Ermittlung des Quellterms erfolgte über die mittlere Aktivität der Gebinde einer Charge, da aufgrund der heutigen Datenlage einzelnen Gebinden keine gebindespezifischen Aktivitäten mehr zugeordnet werden konnten. Die Ermittlung des Quellterms in <DMT 09> ist nicht Gegenstand dieser Stellungnahme.

4.4 Radium-228

In <ESK/SSK 09> wird darauf hingewiesen, dass das Inventar von Radium-228, das beim Zerfall von Thorium-232 anwächst, falsch berechnet wurde. In die Quellterme zur Ermittlung der Strahlenexposition der Bevölkerung bei einer Rückholung in <DMT 09> geht Radium-228 nur mit $1,7E+1$ Bq ein. Im Quellterm für die Störfälle ist Radium-228 nicht enthalten. Auf Grund der im Vergleich zu Americium-241 sowie zu den Uran- und Plutoniumisotopen nicht sonderlich hohen Dosisrelevanz von Radium-228 bei potenziellen Freisetzungen im Rahmen einer Rückholung kann davon ausgegangen werden, dass sich dieser Rechenfehler im Falle einer Handhabung der Abfälle nicht erheblich auf die Strahlenexposition der Bevölkerung auswirkt. Gleiches gilt für die potenzielle Strahlenexposition bei Störfällen.

Langfristig entsteht jedoch Radium aus dem Zerfall von Thorium-232 sowie, noch langfristiger, sofern das Inventar von Uran-236 höher wäre als bisher angenommen, da Uran-236 über Thorium-232 zu Radium-228 zerfällt. Unter zusätzlicher Berücksichtigung von Löslichkeiten <Gel 09> ist die Bildung von Radium-228 daher im Hinblick auf die Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ingestion von Trinkwasser relevant (Langzeitaspekte), sodass aus diesem Grund **eine Korrektur des Inventar an Radium-228 erforderlich** ist.

4.5 Neptunium-237

Neptunium-237 (HWZ: 2,14 Mio. Jahre) ist im Hinblick auf die Direktstrahlung mit Uran-235 vergleichbar. Die Gesamtaktivität von Neptunium-237 liegt bei MAW sechs Größenordnungen und bei LAW fünf Größenordnungen unter der jeweiligen Gesamtaktivität von Cobalt-60. Daher wirken sich Unsicherheiten des Inventars von Neptunium um eine bis zwei Größenordnung nicht erheblich auf die Direktstrahlung bei Tätigkeiten aus. Der Alphastrahler Neptunium-237 zerfällt über den Betastrahler Protactinium-233 zu Uran-233. Wie beim Uran-233 entstehen dabei keine Radon-Isotope.

In den Quellterm zur Berechnung der Strahlenexposition für die Bevölkerung in der Studie zur Rückholung <DMT 09> ging Neptunium-237 aufgrund seines geringen Anteils am Inventar (unter 10 Bq) in den ausgewählten Kammern 7/750 und 1/750 nicht ein. Sofern in anderen Kammern der Asse II keine wesentlich höheren Neptunium-Inventare als in den ausgewählten Kammern existieren, was derzeit noch nicht geprüft wurde, können radiologisch relevante Auswirkungen von Neptunium auf die Strahlenexposition der Bevölkerung ausgeschlossen werden.

Im Hinblick auf das Inventar zur Berechnung der Strahlenexposition durch Freisetzungen bei Störfällen in <DMT 09> ist Neptunium im Quellterm enthalten. Der Anteil des Neptuniums-237 ist jedoch mit 39 Bq bzw. 140 Bq in den ausgewählten Gebinden sehr niedrig. **Sofern wesentlich höhere Gehalte von Neptunium-237 (um mehr als Faktor 10) in Gebinden für Störfallbetrachtungen ausgeschlossen werden können, sind keine erheblichen Auswirkungen von Unsicherheiten**

beim Inventar an Neptunium-237 auf die potenzielle Strahlenexposition durch Störfälle zu besorgen.

4.6 Cobalt-60, Nickel-63

Cobalt-60 ist ein starker Gammastrahler (1,332 MeV und 1,173 MeV) und zudem Betastrahler. Daher ist Cobalt-60 insbesondere bei Tätigkeiten von Personen in der Nähe unabgeschirmter Abfälle der Asse II von Bedeutung. Der Anteil des Aktivitätsinventars von Cobalt-60 am Gesamtinventar für Beta- und Gammastrahlung liegt bei 60,6 % für MAW und bei 6,5 % für LAW. Inventarunterschiede bei Cobalt-60 wirken sich auf die Handhabbarkeit der Abfälle, insbesondere bei MAW aus. Das Gesamtinventar von Cobalt-60 ist beim LAW etwa halb so groß wie von Cäsium-137.

Da sich Inventarunsicherheiten von Cobalt-60 auf einzelne Fässer auswirken können, können zur Anzahl der betroffenen Fässer und der Höhe der resultierenden Direktstrahlung derzeit keine Aussagen getroffen werden. Beim LAW kann jedoch davon ausgegangen werden, dass erheblich höhere Dosisleistungen beim Bergen durch Messgeräte erkannt werden können. Darüber hinaus erfolgten die Einlagerung der Abfälle sowie die zuvor erforderliche Transportabfertigung unter Kontrollen, mit denen Co-60-Inventare vergleichsweise gut bestimmt werden konnten. **Erhebliche und permanente Überschreitungen der zulässigen Dosisleistung von Gebinden, die für Zeitverluste bei einer Rückholung oder Umlagerung durch Sonderbehandlung der betroffenen Fässer relevant wären, sind bisher nicht bekannt.**

Durch die Halbwertszeit von etwa 5,27 Jahren ist Cobalt-60 für die Langzeitsicherheit nicht relevant.

Nickel-63 hat eine für die Langzeitsicherheit relevante Halbwertszeit von 100 Jahren und mit $1,5E-10$ Sv/Bq einen relevanten Dosiskoeffizienten für die effektive Dosis durch innere Strahlenexposition bei Ingestion (Erwachsene). Es handelt sich um einen reinen Betastrahler. Der Anteil des Aktivitätsinventars von Nickel-63 am Gesamtinventar für Gamma- und Betastrahler ist mit 20,2 % bei MAW und 2,1 % bei LAW relativ hoch.

Der maximale Anteil von Nickel-63 am für Störfallberechnungen in <DMT 09> freigesetzten Inventar beträgt 0,16 %. Unterschiede im Inventar von Nickel-63 können sich daher zwar auf die Ergebnisse der Berechnungen zur Einhaltung der Störfallplanungswerte auswirken. **Der Beitrag von Nickel-63 ist jedoch nicht gravierend, so dass erhebliche Auswirkungen derzeit nicht erkennbar sind.**

Nickel-59 ist radiologisch im Hinblick auf den Langzeitsicherheitsnachweis weniger relevant als Nickel-63. Es hat eine lange Halbwertszeit von 75.000 Jahren. Der Dosiskoeffizienten für die innere Strahlenexposition durch Ingestion liegt mit $6,30E-11$ Sv/Bq für Erwachsene eine Größenordnung unter dem von Nickel-63. Für die Di-

rektstrahlung ist Nickel-59 kaum relevant. Der Anteil des Aktivitätsinventars von Nickel-59 am Gesamtinventar für Gamma- und Betastrahler beträgt etwa 0,15 % für MAW und 0,003 % für LAW.

4.7 Andere Nuklide

Calcium-41 (HWZ: 103.000 a) ist radiologisch nicht relevant. Der Dosiskoeffizient für Ingestion ist mit $1,9E-10$ Sv/Bq relativ hoch. Die aus dem K-Einfang resultierende Röntgenstrahlung führt zu einem Dosiskoeffizienten für die externe Strahlenexposition der Bevölkerung durch Bodenstrahlung, der aber mehr als 5 Größenordnungen unter dem von Cobalt-60 liegt. Der Anteil von Calcium-41 am Gesamtinventar für Gamma- und Betastrahler ist unbedeutend (Unterschied zum Anteil von Cobalt-60: 10 Größenordnungen).

Folgende Nuklide, die in <ESK/SSK 09> zum Inventar der Asse erwähnt wurden sind für derzeitige radiologische Betrachtungen nicht relevant, da ihr ursprüngliches Inventar heute bereits zerfallen ist:

- Zink-65 ist zwar ein starker Gammastrahler (max. 1,115 MeV) sowie ein Beta+-Strahler, jedoch mit einer Halbwertszeit von 244,3 Tagen radiologisch nicht relevant.
- Eisen-59 ist mit 1,099 MeV und 1,292 MeV ein starker Gammastrahler und zudem Betastrahler, durch die geringe Halbwertszeit von 44,5 Tagen jedoch radiologisch nicht relevant.
- Cobalt-58 ist ein Beta+-Strahler und ein relativ starker Gammastrahler, jedoch mit einer Halbwertszeit von 70,8 Tagen radiologisch nicht relevant
- Eisen-55 ist mit einer Halbwertszeit von 2,73 Jahren radiologisch nicht relevant. Es emittiert Röntgenstrahlung (126 keV) durch K-Einfang.
- Silber-110 ist ein Gammastrahler. Es spielt jedoch aufgrund der Halbwertszeit von 24,57 Sekunden keine Rolle. Das metastabile Silber-110m besitzt ebenfalls nur eine kurze Halbwertszeit von 249,9 Tagen.

Die aufgeführten Isotope Eisen-56, Eisen-67 und Eisen-58, Cobalt-59 sowie Nickel-60, Nickel-61 und Nickel-62 sind nicht radioaktiv.

5 Nichtradiologische Abfalleigenschaften und Gebindezustand

5.1 Nichtradiologische Annahmebedingungen

In die Schachtanlage Asse II wurden im Zeitraum von 1967 bis 1978 radioaktive Abfälle eingelagert. 1971 wurden Annahmebedingungen für schwachradioaktive Abfälle für die Einlagerung auf der Schachtanlage Asse II eingeführt und 1975 weiterentwickelt <GSF 75>. Für die zwischen 1967 und 1971 angelieferten Abfälle gab es keine festgeschriebenen Annahmekriterien.

In den Annahmebedingungen <GSF 75> wurden die Randbedingungen für die Verpackung und Kennzeichnung der Abfälle sowie die Aktivitätsgrenze für schwachradioaktive Abfälle in drei Abfallkategorien definiert. Hinsichtlich der nichtradiologischen Eigenschaften wurde festgelegt:

„Die in einen Behälter eingebrachten Abfälle dürfen bei üblichen Umweltbedingungen keine chemischen oder physikalischen Vorgänge auslösen, durch welche die Festigkeit oder Dichtigkeit des Abfallbehälters oder der Verpackung gefährdet wird. Nicht angenommen werden Flüssigkeiten, faul- und gärfähige, leicht oder selbstentzündliche Stoffe sowie Abfälle, die heftige chemische Reaktionen erwarten lassen.“ (<GSF 75>, S. 3).

Weiterhin heißt es zum Behältermaterial:

„Sofern die Gefahr besteht, dass der Inhalt korrodierend auf das Behältermaterial wirkt, ist dieses mit einem wirkungsvollen Korrosionsschutz zu versehen“ (<GSF 75>, S. 3).

Von der ESK-SSK-Ad-hoc-Arbeitsgruppe ASSE zusammengetragene Indizien sprechen dagegen, dass alle Abfälle hinsichtlich ihrer nichtradiologischen Eigenschaften diesen Bedingungen entsprachen. Vielmehr muss damit gerechnet werden, dass ein nicht näherer quantifizierbarer Anteil der Abfallgebinde Mängel aufweist, die insbesondere bei der Planung der Handhabung von Abfallgebinden, derzeit vorgesehen bei den Stilllegungsoptionen „Rückholung“ und „Umlagerung“, berücksichtigt werden müssen. Nachfolgend werden die wesentlichen Indizien für mangelhafte nichtradiologische Abfalleigenschaften und die sich daraus möglicherweise ergebenden Konsequenzen diskutiert.

5.2 Dokumentierte Abweichungen von den nichtradiologischen Annahmebedingungen

LSST Geesthacht

Der in <ESK/SSK 09> enthaltene „Bericht zu den Sicherungsmaßnahmen in Geesthacht“ aus dem Jahr 2001, in dem von der Öffnung von, ursprünglich für die Einlagerung in der Asse vorgesehenen, Abfallgebinden in der LSST Geesthacht berichtet wird, erwähnt im Hinblick auf die nicht radiologische Gebindequalität

- feuchte und innen korrodierte Fässer,
- unvollständige Betonauskleidungen, bzw. nicht vollständig mit Beton vergossenen Abfälle,
- reaktive Abfälle, die Korrosion verursacht haben,
- frei bewegliche Flüssigkeiten in z. T. „erheblicher Menge“ (2-6 l) sowie
- falsche Abfallbeschreibungen (statt betonierter Abfälle, die als Papier, Geräte etc. bezeichnet wurden, enthielt ein Fass eine Blei-Innenabschirmung zur Abschirmung einer offenbar unzulässig hohen Aktivität).

Der Bericht selbst geht von einem „gezielten Verstoß gegen die Annahmebedingungen“ aus. Dabei stammen sämtliche auffälligen Fässer von einem Ablieferer (Amersham-Buchler).

Da mit den Befunden aus Geesthacht <ESK/SSK 09> die Zuverlässigkeit des Ablieferers nachträglich in Frage gestellt wurde (bei der Überprüfung im Jahr 2000 wiesen 16 von 28 untersuchten Gebinde erhebliche Abweichungen von den Annahmebedingungen auf, 10 Fässer wiesen innen Feuchtigkeit und Korrosion auf, und bei lediglich zweien der geöffneten Fässer wurde eine ordnungsgemäße Deklaration und ein den Annahmebedingungen entsprechender Zustand attestiert), stellt sich die Frage, inwiefern die von Amersham-Buchler insgesamt angelieferten und in der Schachanlage Asse eingelagerten Abfallgebände besondere Aufmerksamkeit erfordern. Laut den vorliegenden Informationen zum Inventar der Schachanlage Asse <GSF 02> wurden von diesem Ablieferer 1833 Abfallgebände in der Asse eingelagert. **Der Inventarbericht enthält keine abliefererspezifische Zusammenstellung des Inventars oder der Einlagerungsorte, die Struktur der ASSEKAT-Datenbank könnte eine entsprechende Auswertung aber ermöglichen und so insbesondere Hinweise über den Einlagerungsort generieren.**

Eine systematische Prüfung hinsichtlich der Zuverlässigkeit aller Ablieferer ist hingegen ohne konkrete Anhaltspunkte für ein Fehlverhalten bei der Abfallkonditionierung und -deklaration nicht sinnvoll und zielführend. Es ist nicht zu erwarten, dass sich aus den hierzu erforderlichen zeitintensiven Recherchen zu 30 bis 40 Jahre alten Vorgängen mit verhältnismäßigen Mitteln zusätzliche Hinweise auf den Zustand der Abfälle und die Handhabung im Zuge der Stilllegung ergeben werden.

Zwischenfall am 10.09.1980

Eine Notiz einer Begehung der Schachanlage Asse II im September 1980 und die darin enthaltene Beschreibung eines Zwischenfalls, bei dem ein Abfallgebände beim Transport aufplatzte, enthält folgende Hinweise auf nicht den Annahmebedingungen entsprechende Abfalleigenschaften:

- Das Abfallgebände stand unter hohem Innendruck, enthielt also ursprünglich offenbar gasbildende Abfälle.
- Das Fass war vor der Handhabung aufgrund des Innendrucks sichtbar ausgebeult, hatte also bereits mit Materialbeanspruchung auf den Überdruck reagiert.

- Der durch das Aufplatzen des Fassbodens „eruptionsartig heraus gespritzte“ Abfall war offenbar unverfestigt und flüssig, enthielt jedenfalls einen erheblichen Flüssigkeitsanteil.

Es wurde vermutet, dass der Abfallbehälter mit großer Wahrscheinlichkeit von einem Kernkraftwerk stamme. Obwohl das Fass nach der Schilderung erst 2 Jahre in Kammer 7 gelegen hatte und beim Aufplatzen lediglich der Fassboden abgesprengt wurde, wurde es offenbar nicht genau identifiziert, was darauf hindeutet, dass die „dauerhafte“ Behälterkennzeichnung entweder gar nicht oder nicht hinreichend angebracht war, oder dass vom Betriebspersonal keine entsprechende Ermittlung vorgenommen wurde, obwohl das Gebinde eindeutig nicht den seinerzeit geltenden Annahmekriterien entsprach und nach zwei Jahren Lagerzeit eine Ermittlung sicher noch zielführend möglich gewesen wäre. Die Schilderung aus dem Jahr 1980 geht allerdings nicht soweit, dies zu hinterfragen.

Offensichtlich entsprachen also nicht alle direkt von Kernkraftwerken abgelieferten Abfallgebände den Annahmekriterien. **Es ist demzufolge damit zu rechnen, dass ein Teil der Kernkraftwerksabfälle entgegen den Annahmebedingungen zur Gasbildung neigt, freie Flüssigkeiten enthält oder nicht, bzw. nicht hinreichend, fixiert wurde. Aus dem dokumentierten Einzelfall lassen sich aber keine qualifizierten Rückschlüsse auf die Relevanz und Häufigkeit derartiger Abweichungen ableiten, zumal das Abfallgebäude nicht identifiziert wurde und daher auch keine genaueren Angaben über Herkunft und Inhalt verfügbar sind.**

Betriebliche Vorgänge in der Schachtanlage

Das bei dem geschilderten Zwischenfall aus dem Jahre 1980 geplatze Fass sollte 2 Jahre nach Beendigung der Abfalleinlagerung aus der ursprünglichen Einlagerungskammer in eine benachbarte Kammer umgelagert werden. Die i.W. auf den Anlieferbegleitlisten beruhende kammerspezifische Inventarabschätzung in <GSF 02> berücksichtigt derartige nachträgliche Umlagerungen offenbar nicht, jedenfalls wird darüber nicht berichtet. Die ESK-SSK-Ad-hoc-Arbeitsgruppe ASSE macht in <ESK/SSK 09> diesbezüglich darauf aufmerksam dass auch die in anderen Dokumenten, beispielsweise dem Risswerk, angegebenen Einlagerungszeiträume und damit auch die Gebindezahlen, sich offenbar auf den ursprünglichen Einlagerungszeitraum beziehen und nachträgliche Umlagerungen so nicht dokumentiert sind.

Es ist davon auszugehen, dass die geschilderte Umlagerung kein Einzelfall war und dass daher eine unbestimmte Anzahl an Gebinden sich heute nicht mehr in der ursprünglichen Einlagerungskammer befindet. Es stellt sich die Frage, ob und in welcher Qualität anhand der Betriebsunterlagen derartige Umlagerungsvorgänge ggf. noch nachvollzogen werden können.

5.3 Hinweise zur Handhabung von Abfällen mit abweichenden nichtradiologischen Eigenschaften im Zuge der Stilllegungsoptionen „Rückholung“ und „Umlagerung“¹

Drucklosigkeit der Abfallgebinde

Die Machbarkeitsstudien zur Rückholung <DMT 09> und Umlagerung <ERC 09> gehen davon aus, dass bei allen Abfallbehältern grundsätzlich vom Versagen der Behälterintegrität auszugehen ist. Hinsichtlich der notwendigen Vorbereitungen auf radiologisch relevante Kontaminationen ist diese Annahme sicherlich korrekt.

Dies würde für die Handhabung von Gebinden aber auch bedeuten, dass bei den Abfallgebinden zunächst nicht mit unter Druck stehenden Behältern zu rechnen ist.

Die Bedeutung zur Gasbildung neigender Abfälle und unter Druck stehender Gebinde für die Störfallanfälligkeit im Stilllegungsbetrieb wird in beiden Machbarkeitsstudien wahrscheinlich unterschätzt.

Bei der Störfallanalyse (Tab. 6.3-1 in <DMT 09>, S. 187 ff.) wird eine „Verpuffung/Explosion“ bei der Handhabung von Abfallgebinden als möglicher, aber nicht radiologisch relevanter Störfall behandelt. Als Vorsorgemaßnahme wird die „Überwachung der Luft zur frühzeitigen Erkennung von Gasen“ angeführt, aktive Maßnahmen zur Störfallvermeidung werden nicht erwähnt. In diesem Zusammenhang wird in <DMT 09> auf S. 293 beispielsweise festgestellt: *„Es ist nicht Gegenstand der vorliegenden Studie zu prüfen, ob durch die Beschaffenheit und Zusammensetzung der eingelagerten Abfälle in Verbindung mit den Rückholtätigkeiten explosive Gemische entstehen können.“* Eine Druckentlastung der Gebinde, in Form eines Anbohrens der VBAs und des übertägigen oder untertägigen Verpressens nichtbetonierter Fässer ist in <DMT 09> vorgesehen, allerdings frühestens in der UTK.

<ERC 09> stellt im Hinblick auf unter Druck stehende Abfallgebinde lediglich bezüglich der VBAs fest: *„Eine Druckentlastung des Gebindes durch Anbohren, wie im Konzept zur Rückholung empfohlen, ist nicht erforderlich, da die Bedingung „drucklose Anlieferung“ aus den Konrad-Endlagerbedingungen resultiert und nicht aus den Asse-Annahmebedingungen“* (S. 182 der Studie).

Es ist zunächst rein formal die Frage zu stellen, inwiefern die Asse-Annahmebedingungen für den Umlagerungsbetrieb überhaupt als geltend herangezogen werden können (was so nicht ohne weiteres vorausgesetzt werden kann). Zwar enthalten die Asse-Annahmebedingungen <GSF 75> tatsächlich keine Anforderung nach druckloser Anlieferung, wohl aber die Nichtannahme faul- und gärfähiger Abfälle sowie solcher Abfälle, deren Reaktionen im Abfallbehälter dessen Festigkeit und Dichtigkeit gefährden. Mit diesen Anforderungen wurde ein Gasbildungspotenzial in den Abfällen eigentlich de facto ausgeschlossen.

¹ Bei der Stilllegungsoption „Vollverfüllung“ werden keine Gebinde gehandhabt, insofern erübrigt sich die Betrachtung des Gebindeversagens für diese Option.

Die seitens der ESK-SSK-Ad-hoc-Arbeitsgruppe ASSE zusammengetragenen Indizien zeigen, dass aufgrund von Abweichungen von den Annahmebedingungen sehr wohl mit zur Gasbildung (CO_2 , CH_4 , H_2) neigenden Abfällen zu rechnen ist. Vor dem Hintergrund dieser Indizien muss bei Störfallanalysen daher auch die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass Behälter mit gasbildenden Abfällen unbeschädigt geblieben sind (z. B. gestapelt gelagerte Abfallgebände ohne Beschädigung durch Verstoß) und daher heute unter Druck stehen.

Weiterhin erfordern die o. a. begründeten Zweifel an den nichtradiologischen Abfalleigenschaften eines Teils der Abfallgebände, dass mit brennbaren Gasen (i. e. Methan aus organischen Bestandteilen) und zündfähigen Gasgemischen beim Umgang mit Abfallgebänden zu rechnen ist, insbesondere mit unbeschädigten, unter Druck stehenden Gebänden. Dies gilt bei einer Freisetzung aus einem bis dato unbeschädigten Fass so lange, bis über die Verdünnung in der Grubenluft die untere Explosionsgrenze (UEG) unterschritten wird. Der in <DMT 09> und <ERC 09> beschriebene Ausschluss eines entsprechenden Störfalls durch Überwachung der Grubenluft als Vorsorgemaßnahme ist wahrscheinlich nicht ausreichend. Es sollte geprüft werden ob zusätzliche Messungen im direkten Handhabungsbereich (z.B. am Bergungs- oder Transportfahrzeug) sinnvoll sind. Außerdem ist das Auftreten brennbarer Gase bei der Auslegung der saugenden Bewetterung zu beachten, um eine frühest mögliche Verdünnung austretender brennbarer Gase zu erreichen. Entsprechende Details gehen aus den Machbarkeitsstudien bisher nicht hervor, sind aber im Rahmen weiterer Planungen zu beachten.

Das Versagen eines unter Druck stehenden Behälters bei Bergung, Transport oder Teilkonditionierung kann zur Freisetzung des gasförmigen, flüssigen und festen Behälterinventars führen.

Folgende Konsequenzen eines solchen Behälterversagens sind denkbar:

- Freisetzung des gasförmigen Behälterinventars (i. W. CO_2 , CH_4), ggf. mit Kohlenstoff-14:
 - Auswirkung auf die Bevölkerungsdosis und die Störfallplanungswerte, da ggf. mit einem größeren Gasbildungspotenzial zu rechnen wäre und gasförmige Nuklide in den vorgesehenen Filtern nicht zurückgehalten werden. Insofern wäre der entsprechende Quellterm für Ableitungen daraufhin zu überprüfen.
- Freisetzung des festen und flüssigen Behälterinhalts:
 - Auswirkung auf die betrieblichen Strahlenschutzmaßnahmen
 - Beladung der Aerosolfilter
 - Kontamination von benachbarten Behälteroberflächen in der Einlagerungskammer
 - Kontamination von Salzversatz in der Einlagerungskammer
 - Kontamination von Arbeitsgeräten,
 - Kontamination von Grubenbauen, Transportwegen, Arbeitsbereichen

Heute noch intakte Gebände werden in vielen Fällen voraussichtlich bereits beim Lösen und Bergen in den Einlagerungskammern beschädigt und damit druckentlas-

tet, jedenfalls legt die Beschreibung dieses Vorgangs die Erwartung nahe, dass intakte Gebinde nur im Ausnahmefall unbeschädigt gewonnen werden können (s. hierzu auch DMT 09, Kap. 3.6.5). In diesen Fällen werden Kontaminationen durch austretende Abfälle, Flüssigkeiten oder Aerosole i.W. auf den Innenraum der Einlagerungskammern beschränkt bleiben und dort durch Bergung kontaminierten Schüttguts vergleichsweise einfach gehandhabt werden können. Die Machbarkeitsstudien zur Rückholung und zur Umlagerung enthalten hier bereits Vorsorgemaßnahmen zum Umgang mit Kontaminationen in den Rückholbereichen (z. B. Unterdruck-Haltung und Abwetterfiltration, Handhabung auslaufender Flüssigkeiten in den Einlagerungskammern als Normalbetrieb, s. <DMT 09>, Kap. 6.3; <ERC 09> beruft sich hierauf).

Es ist nach der derzeitigen Beschreibung allerdings auch nicht auszuschließen, dass auch unbeschädigte, unter Druck stehende Gebinde, insbesondere aus Bereichen mit Stapellagerung, gewonnen und außerhalb der Einlagerungskammern gehandhabt werden und dabei versagen. Für die Stilllegungsoption „Umlagerung“, in der die Drucklosigkeit der Abfallgebinde in <ERC 09> nicht grundsätzlich gefordert wird, kann ein derartiges Ereignis einen relevanten Störfall darstellen, insbesondere beim Transport unter Druck stehender Gebinde zu den untertägigen Einlagerungskammern.

Freie Flüssigkeiten in den Abfallgebinden

Sowohl die Untersuchungen in Geesthacht als auch der Zwischenfall 1980 zeigen, dass entgegen den Annahmebedingungen auch freie Flüssigkeiten in den Abfallgebinden vorhanden sein können. Soweit entsprechende Abfallgebinde heute maßgeblich beschädigt sind, wird ihr flüssiger Inhalt zu einer Kontamination benachbarter Gebinde, Salzgrus oder Salzgestein geführt haben.

Die grundsätzliche Erwartung beschädigter Abfallgebinde und ihre Handhabung sowie die Handhabung von kontaminiertem Schüttgut sind in den Machbarkeitsstudien <DMT 09> und <ERC 09> beschrieben, insofern sind ausgetretene Flüssigkeiten und die davon ausgehenden Kontaminationen im Rahmen der beschriebenen Maßnahmen voraussichtlich handhabbar.

Intakte oder nur leicht beschädigte Abfallgebinde können nach wie vor freie Flüssigkeiten oder intakte Flüssigkeitsbehälter enthalten, die bei der Bergung, dem Transport oder der Konditionierung freigesetzt werden können und dann ggf. zu

- Auswirkung auf die betrieblichen Strahlenschutzmaßnahmen
- Kontamination von benachbarten Behälteroberflächen in der Einlagerungskammer
- Kontamination von Salzversatz in der Einlagerungskammer
- Kontamination von Arbeitsgeräten,
- Kontamination von Grubenbauen, Transportwegen, Arbeitsbereichen (z.B. UTK)

führen können. Derartige Kontaminationen werden aber ohnehin für die Rückholbereiche als Bestandteil des Normalbetriebs von der Bergung bis zur UTK vorausgesetzt, zusätzliche Anforderungen ergeben sich hierfür nicht. Beim Transport von der UTK zur Tagesoberfläche („Rückholung“) oder zu den neuen Einlagerungshohlräumen („Umlagerung“) soll die Freisetzung von Flüssigkeiten durch die Umverpackung der Gebinde ausgeschlossen werden.

Die Stilllegungsoption „Rückholung“ <DMT 09> sieht eine Trocknung feuchter Abfälle über Tage zur endlagergerechten Abfallkonditionierung vor. Bei der Stilllegungsoption „Umlagerung“ ist eine Trocknung nicht vorgesehen. Vor dem Hintergrund der Indizien bezüglich freier Flüssigkeiten wäre zu prüfen, ob diese Vorgehensweise bei der Umlagerung noch gerechtfertigt ist, insbesondere dann, wenn für den neuen Einlagerungsbereich unter Tage ein Langzeitsicherheitsnachweis geführt werden soll.

Sonstige Abweichungen von den nichtradiologischen Annahmebedingungen

Die Untersuchung in Geesthacht hat gezeigt, dass etliche der geöffneten Fässer eine fehlerhafte oder keine Betonauskleidung besaßen. Für die eingelagerten Abfälle bedeuten derartige Abweichungen zunächst eine reduzierte Behälterstabilität und höhere Versagenswahrscheinlichkeit, was zu einer vermehrten Beschädigung dieser Gebinde führen kann. Die grundsätzliche Erwartung beschädigter Abfallgebinde und ihre Handhabung sind in den Machbarkeitsstudien <DMT 09> und <ERC 09> beschrieben, insofern ist der Umgang mit beschädigten Gebinden und den davon ggf. ausgehenden Kontaminationen bereits Gegenstand des vorgesehenen Stilllegungsbetriebs.

Die Machbarkeitsstudie zur Umlagerung <ERC 09> (s. d. S. 143) weist allerdings diesbezüglich im Zusammenhang mit der Berechnung der Dosis für das Personal darauf hin, dass *„für eine realistische Abschätzung der Dosisleistung [...] davon ausgegangen [wurde], dass alle Gebinde mit Beton verfüllt sind. Somit konnten die in den Fässern vorhandenen Abschirmungen mit berücksichtigt werden.“* Die Machbarkeitsstudie zur Rückholung <DMT 09> verfolgt einen analogen Ansatz (s. d. S. 284)². Die Befunde der geöffneten Fässer aus Geesthacht stellt die Allgemeingültigkeit dieser Annahme in Frage. **Da eine quantitative Abschätzung der Abfallgebinde mit fehlerhafter Betonauskleidung nicht möglich ist, stellt sich die Frage, welche Auswirkungen eine als fehlerhaft angenommene Betonauskleidung auf die Dosismittlung haben würde. Eine diesbezügliche Betrachtung wäre angebracht.**

² Anmerkung: Hinsichtlich der Abschirmwirkung von VBAs geht /ERC 09/ von einer 25 cm Betondicke aus, /DMT09/ von 20 cm

Unsicherheit über den Lagerort der Abfallgebände

Die Schilderung des Zwischenfalls vom 10.09.1980 zeigt über die physikalischen Abfalleigenschaften hinaus, dass nach Beendigung der Abfalleinlagerung noch Umlagerungen von Abfallgebänden stattgefunden haben, die in der kammer-spezifischen Inventarabschätzung in <GSF 02> nicht nachvollzogen wurden. Es ist also damit zu rechnen, dass nachträgliche Umlagerungen von Abfallgebänden innerhalb der Schachtanlage zwar vorgenommen, aber nicht dokumentiert wurden. Jedenfalls ist es mehr als wahrscheinlich, dass die Umlagerung von Abfällen häufiger stattgefunden hat, ohne dass derzeit systematische Informationen über derartige Umlagerungsvorgänge vorliegen oder in den Planungen bezüglich der Stilllegungsoptionen hätten berücksichtigt werden können.

Für die Stilllegungsoptionen „Rückholung“ und „Umlagerung“ ergibt sich daraus, dass bezüglich des kammer-spezifischen Abfallinventars aus <GSF 02> der Einlagerungskammern in nicht quantifizierbarem Maß eine zusätzliche Unsicherheit in der Zuordnung der Abfallgebände zu einer Einlagerungskammer herrscht.

Auswirkungen hat dies weniger auf die vorgesehenen Handhabungen als auf die Erfolgsprognosen hinsichtlich der Planungsvarianten zur teilweise Rückholung bzw. teilweisen Umlagerung der Abfälle.

Bei einer vollständiger Rückholung bzw. Umlagerung hingegen werden derartige Unsicherheiten nicht auftreten, hierfür ist der Lagerort einzelner Gebände in den Einlagerungskammern nicht ausschlaggebend. Gleiches gilt für die Option der Vollverfüllung, die aber von Unsicherheiten bezüglich der Gebändequalität und Gebändeposition ohnehin nicht maßgeblich beeinflusst wird.

6 Zusammenfassung

Eigenschaften der von Unsicherheiten des Asse-Nuklidinventars betroffenen Radionuklide

Die in <ESK/SSK 09> aufgeführten derzeit bekannten Unsicherheiten und Fehler zum radioaktiven Inventar der Schachanlage Asse werden qualitativ im Hinblick auf ihre Relevanz für die Strahlenexposition der Beschäftigten und der Bevölkerung und die Strahlenexposition bei Störfällen für den Fall einer Rückholung sowie im Hinblick auf Langzeitsicherheitsaspekte, insbesondere der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ingestion über den Trinkwasserpfad, bewertet.

Für die Bewertung wurden die Aussagen der Machbarkeitsstudie zur Rückholung der LAW <DMT 09> zum Anteil einzelner Radionuklide am Quellterm für die Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung und für die Berechnung der Einhaltung der Störfallplanungswerte hinzugezogen. Die Studie zur Umlagerung <ERC 09> beruft sich hierauf, geht also von den gleichen Randbedingungen aus.

Zu folgenden Radionukliden sind Unsicherheiten zu ihrem Inventar relevant:

Plutoniumisotope

- Unsicherheiten beim Inventar von Plutonium-241 und Plutonium-238 können sich durch den hohen Anteil dieser Radionuklide am Quellterm für Freisetzungen <DMT 09> erheblich auf die Berechnung der potenziellen Strahlenexposition durch Störfälle auswirken.
- Auf Grund ihres relative hohen Anteils am Quellterm nach <DMT 09> können sich Unsicherheiten zum Inventar der Plutoniumisotope Pu-238, Pu-239 und Pu-240 deutlich auf die Ermittlung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Ableitungen bei einer Rückholung auswirken.
- Unsicherheiten des Plutonium-Inventars wirken sich bei einer Rückholung langfristig durch die Bildung von Radonisotopen auf die Strahlenexposition der Bevölkerung aus. Die Auswirkungen sind jedoch nicht als erheblich einzustufen.
- Unsicherheiten der Inventare aller Plutoniumisotope sind im Hinblick auf ihre Fragen der Langzeitsicherheit relevant. Das an sich kurzlebige Plutonium-241 ist dabei langfristig über die Bildung von Americium-241 und Neptunium-237 relevant.
- Eine relevante Auswirkung von Unsicherheiten des Plutoniuminventars auf die Direktstrahlung bei einer Rückholung ist nicht gegeben.

Uranisotope

- Unsicherheiten der in <DMT 09> im Quellterm zur Berechnung der Störfallauswirkungen berücksichtigten Uranisotope Uran-234, Uran-235, Uran-236 und Uran-238 sind gegenüber dem radiologischen Beträgen von Plutonium-Isotopen und Americium-241 von untergeordneter Bedeutung.
- Für die Strahlenexposition der Beschäftigten und der Bevölkerung spielen die im Quellterm in <DMT 09> enthaltenen Uranisotope U-234 und U-238 eine un-

tergeordnete Rolle, sodass sich Unsicherheiten im Inventar bei den in <DMT 09> gesetzten Randbedingungen nicht erheblich auswirken.

- Im Hinblick auf Aspekte der Langzeitsicherheit sind Unsicherheiten im Inventar von Uran-233, Uran-234, Uran-245, Uran-236 und Uran-238 aufgrund der Bildung von Thorium- und Radiumisotopen relevant.
- Unsicherheiten beim Inventar von Uranisotopen könnten sich bei einzelnen Gebinden mit besonders hohem Inventar an Uran-232 auf die Direktstrahlung bei einer Rückholung auswirken, eine erhöhte Gamma-Aktivität wäre jedoch bei der Handhabung der Gebinde detektierbar, so dass im Einzelfall Maßnahmen eingeleitet werden könnten.

Tritium, Kohlenstoff-14, Radium-228, Neptunium-237

- Unsicherheiten beim Inventar von Tritium und Kohlenstoff-14 wirken sich auf die Strahlenexposition der Beschäftigten und der Bevölkerung aus. Es sind jedoch keine erheblichen Auswirkungen vor dem Hintergrund der Abschätzungen in <DMT 09> zu erwarten.
- Die auf einem Rechenfehler basierenden Fehler im Inventar von Radium-228 sind im Hinblick auf Aspekte der Langzeitsicherheit relevant.
- Unsicherheiten im Inventar von Neptunium-237 wirken sich bei einer Rückholung auf die Strahlenexposition der Bevölkerung und die potenzielle Strahlenexposition durch Störfälle unter den gegebenen Randbedingungen von <DMT 09> nicht erheblich aus. Das Inventar von Neptunium-237 ist im Hinblick auf die Langzeitsicherheit aufgrund der hohen Halbwertszeit relevant.

Cobalt-60, Nickel-63

- Cobalt-60 ist ausschließlich im Hinblick auf die Direktstrahlung relevant. Abweichungen vom Inventar wären detektierbar. Erhebliche Auswirkungen auf eine Rückholung durch permanente Überschreitungen der geplanten Dosisleistung von Gebinden sind derzeit nicht erkennbar.
- Unsicherheiten beim Inventar von Nickel-63 und auch von Nickel-59 sind im Hinblick auf die Langzeitsicherheit grundsätzlich relevant. Der Beitrag von Nickel-63 und Nickel-59 zu den Ergebnissen der Berechnung der Strahlenexposition durch Störfälle bei einer Rückholung <DMT 09> ist nicht gravierend, so dass erhebliche Auswirkungen von Unsicherheiten des Inventars von Nickel-63 und Nickel-59 auf die Ergebnisse der Strahlenexposition durch Störfälle nicht erkennbar sind.

Die getroffene Abschätzung zur Relevanz derzeit bekannter Unsicherheiten von Inventaren der Asse II erfolgt vor dem Hintergrund erforderlicher Entscheidungen über die Stilllegungsoptionen „Rückholung“, „Umlagerung“ und „Vollverfüllung“. Für erforderliche Genehmigungen zur Stilllegung der Asse II ist das Inventar soweit möglich klarzustellen.

Nichtradiologische Abfalleigenschaften und Gebindezustand

Die in <ESK 09> zusammengetragenen Indizien sprechen dagegen, dass alle Abfälle hinsichtlich ihrer nichtradiologischen Eigenschaften bei Anlieferung den Annahmebedingungen der Asse entsprachen, wie dies in den Machbarkeitsstudien vorausgesetzt wird. Abweichungen von diesen Annahmen müssten bei der Planung der Stilllegungsoptionen „Rückholung“ und „Umlagerung“ Berücksichtigung finden. Für die Vollverfüllung haben nichtradiologische Eigenschaften der Abfallgebinde hingegen keine maßgebliche Bedeutung.

Folgende nichtradiologische Abfalleigenschaften sollten in Betracht gezogen werden:

- Unbeschädigte Gebinde können unter Überdruck stehen und bei Handhabung oder Transport zerstört werden.
- Die in den Behältern enthaltenen Gase können zündfähig sein oder beim Ausreten zusammen mit der Grubenluft zündfähige Gemische bilden.
- Unbeschädigte und beschädigte Gebinde können freie Flüssigkeiten enthalten, was neben handhabungsbedingten Kontaminationen auch Auswirkungen für die Langzeitsicherheitseinschätzung einer Umlagerung haben kann.
- Unvollständige oder fehlende Betonverkleidungen stellen die Annahme in Frage, dass bei der Ermittlung der Personendosis von einer Abschirmwirkung der Betonauskleidung Kredit genommen werden kann.
- Die nicht dokumentierte Umlagerung von Gebinden nach deren Einlagerung kann zu Verschiebungen des derzeit bekannten kammer-spezifischen Inventars geführt haben, was insbesondere den prognostizierten Erfolg einer Teilrückholung oder Teilumlagerung mit einer zusätzlichen Unsicherheit belastet.

Die Indizien sind insgesamt nicht so umfassend, dass darauf quantitative Angaben zu Unsicherheiten der Gebindequalität abgeleitet werden könnten. Hinsichtlich der Abfallgebindequalität sollte daher der Umgang mit mangelbehafteten Abfallgebinden grundsätzlich eingeplant werden, wobei die nichtradiologischen Eigenschaften Behälterdruck, Zündgefahr, Flüssigkeitsinhalt und reduzierte Abschirmwirkung besonders zu berücksichtigen sind.

Da hinsichtlich der Zuverlässigkeit des Ablieferers für die von Amersham-Buchler angelieferten 1833 Gebinde begründete Zweifel bestehen, könnte eine genauere Ermittlung der betreffenden Einlagerungskammern eine genauere räumliche Zuordnung dieser speziellen Abfallgebinde ermöglichen, ohne aber damit ähnliche Abweichungen von Annahmekriterien bei anderen Ablieferern ausschließen zu können. Änderungen der kammer-spezifischen Abfallinventare durch nachträgliche Umlagerungen von Abfällen könnten ggf. durch eine genauere Prüfung der Betriebsdokumentation der Schachtanlage nachvollzogen werden.

7 Literaturverzeichnis

- BMU 01 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition vom 23. Juli 2001, Bundesanzeiger Nr. 160 a und b, 28.08.2001
- DMT 09 DMT GmbH & Co. KG, TÜV Nord SysTec GmbH & Co. KG: Beurteilung der Möglichkeit einer Rückholung der LAW-Abfälle aus der Schachtanlage Asse, 25.09.2009
- ERC 09 ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, TÜV Nord SysTec GmbH & Co. KG: Beurteilung der Machbarkeit einer Umlagerung aller oder Teile der radioaktiven Abfälle in der Schachtanlage Asse II, 30.09.2009
- ESK/SSK 09 Entsorgungskommission: Inventar der Schachtanlage Asse II - Beratungsergebnisse der Ad-hoc-Arbeitsgruppe ASSE der ESK und der SSK, Schreiben vom 02.11.2009, mit Anlagen
- Gel 09 Gellermann, R.: Sensitivitätsbetrachtungen zum Nuklidvektor in Bezug auf den Grundwasserpfad, unveröffentlicht, Stellungnahme als Mitglied der ESK/SSK-Arbeitsgruppe Asse, 2009
- GSF 75 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München: Bedingungen für die Lagerung von schwachradioaktiven Abfällen im Salzbergwerk Asse, Stand: Dezember 1975
- GSF 02 GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit: Bestimmung des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars der Schachtanlage Asse, Gerstmann, U., Meyer, H., Tholen, M., August 2002

