Mögliche Auswirkungen von Unfällen oder Angriffen auf Castor-Transporte von Jülich nach Ahaus

Dipl.-Phys. Oda Becker

Erstellt im Auftrag von .ausgestrahlt

Juli 2024

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **3**

1 Einleitung **8**

2 Mögliche Gefahren bei komplikationsfreiem Transport **12**

2.1 Neutronenstrahlung 12

2.2 Gesundheitliche Folgen durch Neutronenstrahlung 12

2.3 Strahlendosen in Abhängigkeit zur Entfernung 14

3 Sicherheit der AVR-Behälter **16**

3.1 Der Behältertyp THTR/AVR 16

3.2 Sicherheitsanforderungen für Transport- und Lagerbehälter 18

3.3 Versuche mit CASTOR-Behältern 19

3.4 Vergleich der IAEA-Anforderungen mit Unfallszenarien 21

3.5 Angriff mit panzerbrechenden Waffen 23

3.6 Potenzieller Angriff mit „Kamikaze-Drohnen“ 29

4 Auswirkung eines Unfalls oder eines Angriffs **31**

4.1 Inventar eines Behälters 31

4.2 Unfallbedingte Freisetzung 33

4.3 Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe 35

4.4 Angriff mit Drohnen 40

5 Literatur **44**

Zusammenfassung

Seit dem 30. Juni 2013 ist die am 17. Juni 1993 erteilte Genehmigung für das Zwischenlager Jülich nicht mehr gültig. Die rund 300.000 AVR-Brennelemente des ehemaligen AVR-Forschungsreaktors lagern allerdings weiterhin in Jülich. Es werden zwei Optionen für die Verbringung der AVR-Brennelemente in Betracht gezogen: Der Bau eines Zwischenlagers in Jülich oder der Transport in das Zwischenlager Ahaus.

Die Aufbewahrungsgenehmigung für die AVR-Behälter im Zwischenlager in Ahaus wurde am 21.07.2016 erteilt, diese wird allerdings unter anderem von der Stadt Ahaus beklagt. Die Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen (JEN) bzw. deren beauftragter Transporteur (Firma Orano NCS GmbH) hat bei der zuständigen Genehmigungsbehörde (BASE) einen Antrag auf Transport der 152 AVR-Behälter von Jülich in das Zwischenlager Ahaus gestellt. Im zurzeit laufenden Genehmigungsverfahren entwickelt die JEN ein neues Sicherungskonzept, da seit 2018 eine neue Richtlinie für den Schutz gegen Terroranschläge während eines Transports Anwendung findet. Die Transportgenehmigung wird zeitnah erwartet, der Beginn der Transporte ist für den Sommer 2024 geplant.

Die Transporte von Jülich nach Ahaus würden als Schwerlasttransporte über die Straße per Sattelzug erfolgen. Pro Sattelzug kann nur ein AVR-Behälter transportiert werden. Der Sattelzug besteht aus einer 4-achsigen Zugmaschine und einem 9-achsigen Auflieger plus zugehöriger Aufbauten. Die Transportdetails (darunter auch die genauen Zeiten und die Streckenführung) wird der Transporteur mit der für die Begleitung der Transporte zuständigen Polizeibehörde abstimmen. Nach derzeitiger Projektplanung rechnet die JEN mit einer Gesamtdauer von 2 Jahren ab Beginn der Transporte.

In dieser Stellungnahme werden im Auftrag der Nichtregierungsorganisation „.ausgestrahlt“ die potenziellen Gefahren, die von diesen Transporten für die Bevölkerung ausgehen, thematisiert.

In Kapitel 1 wurde die Höhe der Neutronenstrahlung und die daraus resultierenden Strahlendosen abgeschätzt. Neutronenstrahlung ist eine Form ionisierender Strahlung, die aus freien Neutronen besteht. Vor allem aufgrund der starken Wechselwirkung mit biologischem Gewebe hat Neutronenstrahlung eine hohe biologische Wirksamkeit. Es gibt einen linearen Zusammenhang zwischen der erhaltenen Dosis und der Wahrscheinlichkeit einer Krebserkrankung. Dabei gibt es keine Schwellendosis (LNT-Modell=Linear-No-Threshold-Modell). Bei einer sehr geringen Dosis ist aber auch die Wahrscheinlichkeit einer dadurch induzierten Krebserkrankungen sehr gering.

Für diese Stellungnahme wird davon ausgegangen, dass eine international als „trivial“ bezeichnete Dosis von 10 µSv einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Gesundheit hat. Eine Dosis von 10 µSv würde ein Mensch in einer Entfernung von 5 Metern in ca. 11 Stunden, in 10 Metern in ca. 29 Stunden und in 20 Metern in etwa 57 Stunden erhalten. Bei der Berechnung wurde die biologische Wirkung der Neutronenstrahlung – wie vom BUND gefordert – korrigiert.

Auftragsgemäß wird weiterhin abgeschätzt, wie lange sich in diesen Bereichen Menschen aufhalten können, ohne die maximal zulässige Jahresdosis von 1 mSv für die Bevölkerung zu erhalten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Grenzwert nicht mit einer vollständigen Ungefährlichkeit einer Dosis gleichzusetzen ist. Allerdings würden extrem wenig Menschen, die eine derartige sehr geringe Dosis erhalten, dadurch gesundheitliche Folgen zu befürchten haben. Diese Dosis von

1 mSv würde ein Mensch in einer Entfernung von 5 Metern nach 48 Tagen, in 10 Metern in ca. 119 Tagen und in 20 Metern in etwa 238 Tagen erhalten.

In Kapitel 2 wird die Sicherheit der AVR-Behälter thematisiert. Die Behälter vom Typ CASTOR® THTR/AVR werden zur Aufbewahrung der kugelförmigen Brennelemente des AVR-Reaktors in Jülich verwendet. Insgesamt sollen 288.161 AVR-Brennelemente in 152 Behältern transportiert werden. Jeder Behälter enthält zwei Kannen mit je 950 Brennelementen, d.h. jeder Behälter enthält 1.900 Brennelemente.

Die Behälter der Bauart CASTOR THTR/AVR sind mit einem Doppeldeckel-Dichtsystem mit Metalldichtungen verschlossen. Der Behälter vom Typ CASTOR® THTR/AVR hat eine Typ-B(U)-Zulassung, d.h. er ist zugelassen für den Transport und die Lagerung von bestrahlten Kernbrennstoffen. Für Behälter zum Transport bestrahlter Brennelemente wurden von der IAEA Anforderungen bezüglich der mechanischen und thermischen Belastbarkeit aufgestellt, die in das deutsche Verkehrsrecht für Gefahrguttransporte übernommen wurden.

Die mechanische Prüfung zur Gewährleistung der IAEA-Anforderungen besteht aus einer Fallprüfung aus neun Metern Höhe auf ein unnachgiebiges Fundament und einer zweiten Fallprüfung aus einem Meter Höhe auf einen festen Stahldorn. Die thermische Prüfung besteht in einem Brand bei 800 °C für 30 Minuten. Die Behälter werden außerdem einer Wassertauchprüfung unterzogen. Sie müssen eine Stunde einem Druck von 200 Metern Tiefe standhalten. Der Nachweis, dass ein Behältertyp diese Anforderungen erfüllt, kann mit praktischen Tests (an Prototypen, Originalbehältern oder skalierten Modellen), mit Bezugnahme auf Ergebnisse aus früheren praktischen Versuchen mit ähnlichen Behältern oder mit Berechnungen durchgeführt werden.

Es wird oft in Frage gestellt, ob die verkehrsrechtliche Zulassung eines Behältertyps hauptsächlich auf Grundlage eines rechnerischen Sicherheitsnachweises zulässig ist. In jedem Fall würden praktische Test mit Originalbehältern eine höhere Sicherheit gewährleisten. Ein weiterer Kritikpunkt ist die nicht ausreichende Abdeckung möglicher Unfalleinwirkungen.

Mit dem Behältertyp CASTOR THTR/AVR sind keine experimentellen Untersuchungen gemäß den IAEA-Anforderungen erfolgt. Es erfolgte nur modellhaftes Übertragen von Fallversuchen mit einem anderen Behältertyp. Es kann nicht bei allen Transportstrecken ausgeschlossen werden, dass ein Behälter von einer deutlich höheren Brücke als aus neun Meter Höhe stürzt. Allerdings wurden auch Tests durchgeführt, die ergänzend zu den Sicherheitsanforderungen der IAEA bzw. der Genehmigungsbehörden sind. Diese weisen auf den Erhalt der Stabilität bei größeren Fallhöhen hin. Es wäre dennoch empfehlenswert, wenn die Geschwindigkeit des Transports auf unter 48 km/h begrenzt bleibt und Strecken mit Brücken höher als 9 m vermieden werden.

Die Hitzebeständigkeit der Castoren bzw. ihres Dichtungssystems wird bei einem Brandtest mit 800 °C über eine Dauer von 30 Minuten geprüft. Es sind jedoch bei Unfällen höhere Temperaturen möglich. Nach einer Studie in den USA werden häufig Flammentemperaturen von bis zu 1.100 °C erreicht und auch Branddauern von mehr als 30 Minuten sind bei schweren Unfällen unter ungünstigen Randbedingungen durchaus möglich. Dies hat sich auch bei mehreren schweren Unfällen in Deutschland bestätigt. Der Brandtest deckt einige Szenarien nicht ab, wenn etwa größere Mengen brennbaren Materials an einem Unfall beteiligt sind. Bei einem Zusammenstoß mit einem Tanklastzug, insbesondere in einem Tunnel, ist es wahrscheinlich, dass Temperaturen über den vorgesehene 800 °C entstehen und das Feuer länger als eine halbe Stunde andauert. (UBA 2002)

In einer Risikoanalyse wurde für Deutschland eine Gesamtunfallrate von $2{,}9 \cdot 10^{-7}$ pro Kilometer ermittelt. Daraus würde sich für 152 Transporte über jeweils etwa 200 km eine Unfallwahrscheinlichkeit von etwa 0,01 (1 %) ergeben. Diese Wahrscheinlichkeit ist zwar sehr klein, aber vorhanden. In 2,3 % der Unfälle kommt es zu einem Brand.

Zusätzlich wirken Alterungseffekte auf den Behälter und die Dichtungen, deren Auswirkungen noch nicht vollständig bekannt sind. Daher verbleibt eine kleine Restunsicherheit bezüglich der Widerstandsfähigkeit. Es gibt nach heutigem Wissensstand jedoch zurzeit keine Anhaltspunkte, dass ein Zerbersten des Behälters oder ein Abfallen des Deckels in einer Unfallsituation drohen könnte.

Daher werden für einen möglichen Unfall nur ein Versagen des Doppeldichtungssystems sowie durch Strahlung nach einem Verlust der Abschirmung unterstellt. Da nicht bekannt ist, wie hoch die Dosisleistung bei einem unfallbedingten Versagen der Abschirmung ist, wird hier die zulässige Dosisleistung angenommen. Es zeigt sich, dass eine Person noch in 20 Metern Entfernung die zulässige Jahresdosis von 1 mSv bereits nach rund 34 Minuten erhalten würde.

Unter Transportbedingungen sind fast alle Spaltprodukte fest und werden an das Uranoxidgitter gebunden und sollten in den beschichteten Partikeln innerhalb der Brennelemente zurückgehalten werden. Im Jahr 1978 kam es im AVR-Reaktor jedoch zu einer unzulässigen Überhitzung der Brennelemente. Temperaturbedingtes Versagen der Brennstoffbeschichtungen führte dazu, dass sehr große Mengen an Cäsium aus dem Partikel ausgetreten sind. **Da das Cäsium bei diesen Brennelementen im porösen Graphit sitzt, ist es bei einem unfallbedingten Brand leicht mobilisierbar und daher eine Freisetzung in Unfällen möglich**. Über die Menge sind jedoch keine Abschätzungen möglich.

Die Gefahr besteht, dass die Behälter bei dem Transport zu einer Zielscheibe eines terroristischen Angriffs werden könnten. Auftragsgemäß wird untersucht, ob von einer entschlossenen terroristischen Gruppe ein Angriff mit einer **panzerbrechenden Waffe** auf die transportierten Behälter durchgeführt werden könnte.

Tragbare, panzerbrechende Waffen werden weltweit von den Streitkräften in kriegerischen Auseinandersetzungen eingesetzt. Sie befinden sich aber auch in großer Anzahl in der Hand von Terroristen, da sie einerseits einfach zu handhaben und zu transportieren sind und andererseits einen großen Schaden im Ziel erzeugen. In Deutschland wird daher seit drei Jahrzehnten auch von den Behörden ein Beschuss mit einer derartigen Waffe als mögliches Angriffsszenario auf einen Behälter mit hochradioaktivem Abfall angesehen. Ein derartiger Beschuss mit einer schultergestützten, panzerbrechenden Waffe ist auch während des Transports der Behälter in das TBL Ahaus denkbar.

Von einer panzerbrechenden Waffe können verschiedene Gefechtsköpfe abgeschossen werden. Der häufigste Gefechtskopf ist ein Hohlladungsgeschoss, dieses besteht aus einem hohlen und mit Sprengstoff ummantelten Metallkegel. In Folge des Beschusses wird die Behälterwand durchdrungen und im Inneren des Behälters wird ein Teil der Brennelemente zerstäubt. Ein Teil dieser fein zerstäubten Partikel wird aus dem Behälter und der Sicherungshaube freigesetzt und breitet sich in der Atmosphäre aus. Sie können bei Menschen, die sich zu diesem Zeitpunkt in der Nähe des Behälters aufhalten, durch Inhalation zu einer erheblichen Strahlenbelastung führen. Weiterhin können die abgelagerten Radionuklide zu Strahlenbelastungen aus Bodenstrahlung führen.

Ob die geplanten polizeilichen Maßnahmen einen ausreichenden Schutz vor einem terroristischen Anschlag gewährleisten, der auch aus einigen Hundert Metern Entfernung durchgeführt werden

kann, ist zu bezweifeln. Zusätzlich ist zu bedenken, dass insgesamt 152 Transporte stattfinden werden, so dass einer entschlossenen terroristischen Gruppe eine Reihe von Transporten zur Verfügung stehen, um das Sicherungskonzept der Polizeikräfte und den Ablauf des Transports auszukundschaften. Die dünne Sicherungshaube hält ein Hohlladungsgeschoss, dass rund 1000 mm dicken Stahl durchdringen kann, nicht wirksam auf.

Für die Berechnung der potenziellen radiologischen Auswirkungen wurde das Ausbreitungsprogramm HOTSPOT (Version 3.1.2.) verwendet. Dieses Programm wurde im renommierten US-amerikanischen Lawrence Livermore National Laboratory entwickelt. Es dient zur Ermittlung orientierender Werte.

Der Eingreifrichtwert für eine Evakuierung der Bevölkerung (100 mSv für eine effektive Dosis nach 7 Tagen) wird in Windrichtung bis in eine Entfernung von rund 160 Meter überschritten. Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ wird ab einer effektiven Dosis von 10 mSv in 7 Tagen angeordnet. Diese kann in Windrichtung bis etwa 400 Meter auftreten. In 50 Meter Entfernung zur Transportstrecke treten in Windrichtung Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen haben. In größerer Nähe oder unter anderen meteorologischen Bedingungen sind höhere Strahlenbelastungen zu erwarten. Es ist bei der Bewertung der potenziellen radiologischen Auswirkungen zu beachten, dass Personen durch die Katastrophenschutz-Maßnahme „Evakuierung“ nicht vor Strahlenbelastungen bewahrt werden können, da sie die Inhalationsdosis unmittelbar nach dem potenziellen Terroranschlag, also vor einer Evakuierung, erhalten würden.

Für die Bewertung der möglichen Auswirkungen eines Beschusses mit einer panzerbrechenden Waffe ist auch von Bedeutung, dass durch eine Ablagerung von freigesetztem Cs-137 erhebliche Bodenkontaminationen auftreten können. Eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung würde bis in eine Entfernung von rund 90 Meter erforderlich werden. Bis in eine Entfernung von 10 km sind landwirtschaftliche Interventionsmaßnahmen notwendig.

In dieser Stellungnahme wird zudem auftragsgemäß ein Szenario untersucht, in welchem mehrere Drohnen den transportierten Behälter angreifen. Diese Drohnen sollen mit Sprengstoffen und Brandbeschleuniger beladen sein, um bei einer geeigneten Abfolge des Angriffs einen Teil des Inhalts in Brand zu setzen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Graphit bereits ab 600 °C brennbar und schwer zu löschen ist.

Aufgrund der Fähigkeiten von Kamikaze-Drohnen und des rasanten Anstiegs der erzeugten Stückzahl kann ein solches Szenario nicht vollständig ausgeschlossen werden. Drohnen sind relativ leicht zu beschaffen, umzurüsten und können sehr flexibel eingesetzt werden. Die sogenannten Kamikaze-Drohnen bzw. „loitering munition“ gelten im Ukrainekrieg als „Gamechanger“. Was zu Beginn des Ukraine-Krieges erst Science-Fiction war, ist heute Realität: der massenhafte Einsatz von Minidrohnen.

Es geht über den Umfang dieser Stellungnahme hinaus, ein genaues Angriffs-Szenario zu entwickeln. Zudem soll keine Anleitung für einen Angriff bereitgestellt werden. Hier wird plausibel angenommen, dass durch diesen heutzutage noch sehr hypothetisch erscheinenden Terrorangriff etwa 40 % des Inhalts einer der beiden Kannen in die Atmosphäre freigesetzt wird.

Dieses Szenario veranschaulicht die potenziellen Gefahren des Transports: Die Gesamtdosis übersteigt in Windrichtung bis in ca. 4 km Entfernung den Eingreifrichtwert für eine Evakuierung der Bevölkerung. Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ würde bis in eine Entfernung von rund 9 km angeordnet werden müssen.

Im Wesentlichen wird die Dosis durch Inhalation der radioaktiven Stoffe bestimmt, die die Personen in Windrichtung unmittelbar nach der Freisetzung erhalten würden. Bis in eine Entfernung von rund 120 Meter sind die möglichen Inhalationsdosen tödlich (ab 7.000 mSv). Eine Dosis von 4.000 mSv, der eine Sterbewahrscheinlichkeit von 50 % zuzuordnen ist, kann bis etwa 180 Meter Entfernung auftreten. Für Personen, die sich in Gebäuden aufhalten, würde sich die Dosis nur um einen Faktor 3 reduzieren. Das bedeutet, dass die Dosen an der Strecke selbst für Menschen, die sich in Gebäuden aufhalten tödlich sein könnten.

Ein „erfolgreich“ durchgeführter Angriff mit Drohnen hat durch die mögliche Cs-137 Bodenkontamination unweigerlich schwerwiegende Folgen für die im Umfeld der Transportstrecke liegenden Gebiete. Eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung würde bis in eine Entfernung von rund 600 Meter erforderlich werden. Landwirtschaftliche Interventionsmaßnahmen würden in Entfernungen von deutlich mehr als 20 km notwendig sein.

1 Einleitung

Seit dem 30. Juni 2013 ist die am 17. Juni 1993 erteilte Genehmigung (nach § 6 AtG) für das Zwischenlager Jülich nicht mehr gültig. Im Genehmigungsverfahren für die Verlängerung der Betriebszeit konnte der damalige Betreiber, das Forschungszentrum Jülich (FZJ), nicht nachweisen, dass die Voraussetzungen für die Erteilung einer neuen Genehmigung vorliegen. Die fehlenden Nachweise betrafen vor allen Dingen die Erdbebensicherheit – insbesondere den Nachweis, dass bei einem Erdbeben keine Bodenverflüssigung eintritt.

Da die Voraussetzungen für die Erteilung einer Verlängerung der Genehmigung nicht vorlagen, hatte die zuständige atomrechtliche Aufsichtsbehörde zunächst eine weitere befristete Aufbewahrung der AVR-Brennelemente im Zwischenlager Jülich angeordnet. Am 2. Juli 2014 wurde dann die Anordnung zur Räumung des AVR-Behälterlagers Jülich erlassen. Die rund 300.000 AVR-Brennelemente des ehemaligen Forschungsreaktors in Jülich lagern allerdings weiterhin in Jülich. Es werden zwei Optionen für die Verbringung der AVR-Brennelemente in Betracht gezogen: Der Bau eines Zwischenlagers in Jülich oder der Transport in das Zwischenlager in Ahaus.[1] (LTNRW 2024a)

Zeitgleich läuft ein Genehmigungsverfahren für das bestehende AVR-Behälterlager in Jülich. Es ist eine Verlängerung der Genehmigung auf neun Jahre beantragt. Laut JEN gab es im Februar 2024 keine offenen Punkte zur nuklearen Sicherheit mehr. Neuere Ergebnisse im Juli 2022 zeigten, dass ein Erdbeben keine Auswirkungen auf die nukleare Sicherheit hat. Aber die Nachweisführung zur IT-Sicherheit sei noch nicht abgeschlossen. (JEN 2024a)

Die Landesregierung NRW hat in ihrem Koalitionsvertrag als erklärtes Ziel die Minimierung von Atomtransporten sowie das Vorantreiben des Neubaus eines Zwischenlagers in Jülich vereinbart. Im Gegensatz dazu hat sich der Haushaltsausschuss des Bundestags aus Kosten- und Zeitgründen für die Castor-Transporte ausgesprochen. Im Falle der Transportlösung würde der Bund 70 Prozent, das Land 30 Prozent der Kosten tragen.

Die atomrechtliche Aufsichtsbehörde (MWIKE) verweist auf die Zuständigkeit des BASE in der Entscheidung, ob die Brennelemente aus Jülich nach Ahaus transportiert werden. Das BASE selbst erklärt, dass es keine politische Entscheidungsgewalt hat, sondern lediglich das Genehmigungsverfahren in seiner Entscheidungsgewalt liegt und es die Genehmigung bei Erfüllung aller Voraussetzungen erteilen muss. Auf seiner Internetseite erklärt das BASE zudem: „*Über diese vom BASE zu prüfenden atomrechtliche Aspekte hinaus können andere Gründe gegen einen beantragten Transport sprechen. Dabei handelt es sich insbesondere um Fragen, die nicht vom BASE, sondern von anderen Institutionen wie insbesondere weiteren Landesbehörden bewertet werden müssen. Diese prüfen, ob ein überwiegendes öffentliches Interesse der Art des Transports, der Zeit oder der Route (in der Regel werden mehrere Alternativen beantragt) entgegensteht. Ist dies der Fall, so wird dies dem BASE von den Landesbehörden mitgeteilt*." (LTNRW 2024b)

Die Aufbewahrungsgenehmigung für die AVR-Behälter im Zwischenlager in Ahaus wurde am 21.07.2016 nach §6 AtG erteilt, diese wird allerdings unter anderem von der Stadt Ahaus beklagt. Auch vor dem Hintergrund, dass die Genehmigung für das Lager in Ahaus 2036 ausläuft und es in Ahaus keine heißen Zellen gibt, in denen etwaige Reparaturen an Castorbehältern durchgeführt werden können, wächst der lokale Widerstand.

[1]Eine dritte Option, die Verschickung des Materials in die USA, wurde auf Grund von Sicherheits- und finanziellen Bedenken 2022 verworfen.

Die JEN bzw. deren beauftragter Transporteur (Firma Orano NCS GmbH) hat gemäß § 4 AtG bei der zuständigen Genehmigungsbehörde BASE einen Antrag auf Transport der 152 Behälter von Jülich ins Transportbehälterlager Ahaus (TBL-A) gestellt.

Laut JEN haben sich die Bedingungen für einen Transport nach §4 AtG massiv geändert und die zu erbringenden Maßnahmen wurden deutlich erschwert, dennoch sei die Option Verbringen nach Ahaus die am weitesten fortgeschrittene Option. Es musste eine vollständige Neuentwicklung der Transportkonfiguration erfolgen, da seit 2018 die „Richtlinie für den Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD Beförderung)“ Anwendung findet. In ihr werden diverse Szenarien (inklusive zu unterstellender Angriffe) festgelegt, gegen die die Sicherung von Kernbrennstofftransporten auszulegen ist. Insofern werden laut JEN an den Schutz der CASTOR-Transporte gegen kriminelle Handlungen oder terroristische Sabotageakte sehr hohe Anforderungen gestellt.

Im zurzeit laufenden Genehmigungsverfahren entwickelt die JEN mit ihrem Auftragnehmer ein Sicherungskonzept, das genau diesen hohen Anforderungen aus der SEWD gerecht werden soll. Die Nachweise des Sicherheitskonzepts und der Funktionsfähigkeit der Sicherungssysteme sind soweit abgesichert, dass die Beschaffungsmaßnahmen für die Transporteinheiten sowie die Ausbildung und Bereitstellung von Personal bereits eingeleitet wurden. Die Transportgenehmigung wird zeitnah erwartet, der Beginn der Transporte ist für den Sommer 2024 geplant.[2]

Die Transporte von Jülich nach Ahaus würden als Schwerlasttransporte über die Straße per Sattelzug erfolgen. Eine intensive Prüfung kam bereits früh zu dem Ergebnis, dass Straßentransporte gegenüber Schienentransporten eindeutig zu bevorzugen sind.[3]

Pro Sattelzug kann nur ein AVR-Behälter transportiert werden. Der Sattelzug (die Transporteinheit) besteht aus einer 4-achsigen Zugmaschine und einem 9-achsigen Auflieger plus zugehöriger Aufbauten. Sowohl Zugmaschine wie auch der Auflieger sind speziell für die Transporte der AVR-Behälter konzipiert und nach den aktuellen Sicherungsanforderungen ausgelegt worden. Insgesamt verfügt die JEN über vier dieser speziellen Transporteinheiten.

Beantragt wurden Einzeltransporte, so dass jeweils eine Transporteinheit (mit einem AVR-Behälter) von Jülich nach Ahaus transportiert werden soll. Daraus würden sich 152 Transportfahrten ergeben. Die JEN führte in Zusammenarbeit mit dem beauftragten Transportunternehmen einen Probetransport eines leeren CASTOR THTR/AVR-Behälters von Jülich nach Ahaus durch.

Am 20. November 2023 begannen in Jülich die Arbeiten zur sogenannten „Kalthandhabung“. Im Beisein der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde (MWIKE) und ihrer Gutachter demonstrierte die JEN hierbei die detaillierten Beladeschritte eines leeren AVR-Behälters auf den speziell angefertigten Tiefbetttrailer. Dabei wurde ein leerer AVR-Behälter, eingebettet in seinem Transportgestell, auf die Transporteinheit gehoben und dort installiert. Anschließend werden auf der Deckel- und Bodenseite extra angefertigte Stoßdämpfer montiert und das Transportgestell von allen Seiten verschlossen. Danach werden Strahlenschutzmessungen durchgeführt, bevor das beladene Transportgestell dann auf einen speziellen LKW-Auflieger verladen wird. Für das im

[2]Außer der Aufbewahrungsgenehmigung in Ahaus und der Transportgenehmigung nach Ahaus wird eine Genehmigung für die Abfertigung nach §9 AtG in Jülich benötigt. Diese Genehmigung wurde im Dezember 2018 beschieden und ist bis zum Dezember 2027 befristet.

[3]Wesentliche Argumente sind: Ein hohes Maß an Flexibilität in Bezug auf Zeiträume und Streckenführungen; sehr begrenzte Platzverhältnisse im Schienenbereich des AVR-Behälterlagers und Unabhängigkeit vom maximalen Lichtraumprofil der Deutschen Bahn bei der neu zu entwickelnden Transportkonfiguration.

Genehmigungsverfahren festgelegte Schutzniveau wird das Transportgestell zusätzlich mit einer neu entwickelten Sicherungseinhausung verstärkt. Durch die Maßnahmen erhöht sich das Gewicht der Transporteinheit auf rund 130 Tonnen – der leere Behälter wiegt lediglich rund 25 Tonnen. Die Länge beträgt etwa 30 Meter und die Breite mehr als 3 Meter.

Die Transportdetails (darunter auch die genauen Zeiten und die Streckenführung) wird der Transporteur mit der für die Begleitung der Transporte zuständigen Polizeibehörde abstimmen. Inwieweit darüber (auch frühzeitig) Auskunft gegeben werden kann, oder ob diese Details der Geheimhaltung unterliegen, darüber kann laut JEN zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Aussage getroffen werden. Nach derzeitiger Projektplanung rechnet die JEN mit einer Gesamtdauer von 2 Jahren ab Beginn der Transporte. Der lange Zeitraum ergibt sich aufgrund der hohen Zahl der zu transportierenden AVR-Behälter sowie verschiedener äußerer Einflüsse. So gibt es beispielsweise Zeiträume, in denen etwa aufgrund von Großereignissen keine AVR-Behälter-Transporte erfolgen können. Der genaue Zeitraum ist außerdem abhängig davon, ob einzeln oder ggf. gebündelt transportiert wird. (JEN 2024b, c)

Abbildung 1: SEWD: Transportkonfiguration, Zugmaschine 4-achsig, mit Trailer, 9-achsig (Gesamtmasse: ca. 129,00 Mg, Fahrzeuglänge: ca. 29,20 m, Fahrzeugbreite: ca. 3,00 m) (JEN 2024a)

Neben dem für die eigentliche Sicherung zuständigen Transportunternehmen trifft die Polizei des Landes NRW in Vorbereitung auf die zu erwartende Genehmigung und eine dann durchzuführende Transportbegleitung bereits jetzt die notwendigen polizeilichen Maßnahmen. So wurde die Kreispolizeibehörde (KPB) Münster für mögliche polizeiliche Einsatzanlässe im Zusammenhang mit dem Transport radioaktiver Stoffe von Jülich nach Ahaus mit der Aufgabenwahrnehmung betraut. Die KPB Münster wird nach Vorliegen der Genehmigung in einer angemessenen und zwingend benötigten Vorbereitungszeit von mindestens acht Wochen die polizeiliche Begleitung des Transportes planen.

Im Falle eines möglichen Transportes wird die KPB Münster, im Austausch mit den anderen Sicherheitsbehörden, die Lage beurteilen und die erforderlichen Kräfte festlegen. Wann aus polizeilicher Sicht eine Transportbegleitung möglich ist, hängt maßgeblich von den die polizeiliche Einsatzbewältigung bestimmenden Faktoren (Sicherheitslage, Versammlungslagen, Fußballeinsätze) und mithin auch der Verfügbarkeit polizeilicher Einsatzkräfte ab. Bereits jetzt ist abzusehen, dass für eine mögliche Transportbegleitung eine Vielzahl polizeilicher Einsatzkräfte benötigt wird. Sollten Kräfte der Polizei des Landes NRW im Einzelfall nicht auskömmlich sein, werden die Polizeien der Länder und des Bundes um Unterstützung ersucht. (MINRW 2024)

In dieser Stellungnahme werden im Auftrag der Nichtregierungsorganisation „.ausgestrahlt“ die potenziellen Gefahren, die von diesen Transporten für die Bevölkerung ausgehen, diskutiert.

Dazu werden in Kapitel 1 die Neutronenstrahlung im Umkreis der Castorbehälter und die daraus resultierenden Strahlendosen abgeschätzt. In Kapitel 2 wird die Sicherheit der AVR-Behälter

(Behältertyp CASTOR THTR/AVR) thematisiert. In Kapitel 3 werden die potenziellen Auswirkungen eines Unfalls oder eines Terrorangriffs ermittelt und bewertet.

HINWEIS: *Bei der Darstellung der Risiken möglicher Terroranschläge sollen keine Hinweise gegeben oder Überlegungen angestellt werden, die Anleitungscharakter haben und die bei der Planung und Durchführung eines Attentats „hilfreich“ sein könnten. Die Überlegungen der vorliegenden Stellungnahme sind daher bewusst sehr zurückhaltend formuliert, sensitive Details werden vermieden. Terroristen, die aufgrund ihrer Fähigkeiten, Kenntnisse und Ressourcen grundsätzlich dazu in der Lage wären, wirksame Anschläge durchzuführen, werden nachfolgend keine Hinweise finden, die sie nicht ohnehin schon haben oder die sie sich beschaffen könnten. Bei der Darstellung der Szenarien und Resultate wurde jedoch auch darauf geachtet, dass durch die Zurückhaltung bei den Formulierungen das Verständnis und die Aussagekraft der Stellungnahme nicht zu sehr beeinträchtigt werden.*

2 Mögliche Gefahren bei komplikationsfreiem Transport

In diesem Kapitel sollen die Höhe der Neutronenstrahlung im Umkreis von 5, 10 und von 20 Metern vom Castorbehälter und die daraus resultierenden Strahlendosen abgeschätzt werden. Auftragsgemäß soll abgeschätzt werden, wie lange sich in diesen Bereichen Menschen aufhalten können, ohne mit gesundheitlicher Beeinträchtigung rechnen zu müssen bzw. ohne die maximal zulässigen Dosiswerte zu erreichen.

2.1 Neutronenstrahlung

Neutronenstrahlung ist eine Form ionisierender Strahlung, die aus freien Neutronen besteht. Andere Arten ionisierender Strahlung sind Alpha-, Beta- und Gammastrahlung. Neutronenstrahlung entsteht nur selten durch natürlichen Zerfall von Atomkernen. Meist wird sie künstlich mithilfe von Neutronenquellen hergestellt; auch bei der Kernspaltung wird Neutronenstrahlung freigesetzt. Die Neutronenstrahlung wird von Luft kaum absorbiert und besitzt ein hohes Durchdringungsvermögen. Materialien mit einem hohen Wasserstoffanteil (zum Beispiel Polyethylen) werden verwendet, um die Neutronen abzubremsen. Vor allem aufgrund der starken Wechselwirkung mit biologischem Gewebe (insbesondere den darin enthaltenen Wassermolekülen) hat Neutronenstrahlung eine hohe biologische Wirksamkeit.

2.2 Gesundheitliche Folgen durch Neutronenstrahlung

Jede biologische Wirkung ionisierender Strahlung entsteht durch statistisch verteilte Energiedepositionen in den Zellen des menschlichen Körpers. Sie führt zu Ionisation in verschiedenen Molekülen der Zellen, die dadurch verändert werden können. Besonders folgenreich sind dabei Veränderungen an der Erbinformation, der DNA.

Jede Zelle verfügt über ein großes Potential zur Reparatur von Veränderungen insbesondere an der DNA. Daher werden die meisten molekularen Veränderungen folgenlos bleiben. Es ist aber möglich, dass eine Reparatur unterbleibt oder fehlerhaft verläuft und dadurch eine mutierte Zelle entsteht, die sich teilt und ihre veränderte genetische Information weitergibt. Aus einer veränderten Zelle kann sich über eine noch nicht vollständig aufgeklärte Ereigniskette eine Gruppe (ein Klon) von Zellen ohne Wachstumskontrolle bilden, die sich zu einem Krebs oder einer Leukämie entwickeln können. Wenn die molekulare Veränderung in einer Keimzelle erfolgt, kann der Defekt auf die Nachkommen vererbt werden (genetische Wirkung der Strahlung).

Die quantitative Erfassung der stochastischen Strahlenwirkung ist nicht einfach, da sich nicht erkennen lässt, ob sich ein Krebs oder eine Leukämie aufgrund ionisierender Strahlung oder aus einem anderen Grund entwickelt hat. Daher wird mit Hilfe epidemiologischer Untersuchungen von größeren Populationen, die strahlenexponiert wurden (im Wesentlichen überlebende Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki), die Zahl von Erkrankungsfällen (Inzidenz) an Krebs und Leukämie ermittelt und mit der Zahl auch ohne Strahlung auftretender Erkrankungsfälle verglichen. Der Quotient aus beiden Zahlen kann in Beziehung gesetzt werden zu der Dosis einer vorausgegangenen Strahlenexposition. Aus beiden Daten lässt sich das Strahlenrisiko als Eintrittswahrscheinlichkeit bei einer Dosis mathematisch-statistisch ausdrücken.

Im Gegensatz zu stochastischen Strahleneffekten setzen die sogenannten deterministische Effekte eine höhere Energiedeposition voraus als beim unfallfreien Transport auftreten. Es gibt dafür Schwellendosen, die für die einzelnen Gewebe, Organe und Individuen unterschiedlich sind.

Oberhalb des Bereichs der Schwellendosis ist das Ausmaß des Schadens dosisabhängig, die Eintrittswahrscheinlichkeit beträgt dagegen 100 %. (SSK 2014)

Beim Durchgang durch Materie werden schnelle Neutronen auf die Geschwindigkeit thermischer Neutronen abgebremst. Die Bremsung durch Stöße mit Atomen (elastische Streuung) verursacht eine hohe Ionisationsdichte. Die von den abgebremsten Neutronen getroffenen Atome eines beliebigen Materials werden überwiegend radioaktiv (Aktivierung). Die Aktivierungsrate hängt vom Neutronenfluss und von der Art der getroffenen Atome ab. Im neutronenbestrahlten Gewebe werden diverse Radionuklide unterschiedlicher Aktivität und Halbwertszeit erzeugt. (BERTRAM 2011)

Die internationale Strahlenschutzkommission (ICRP), auf deren Empfehlungen die deutsche Strahlenschutzverordnung beruht, hat die Äquivalenzdosis mit der Dosiseinheit Sievert eingeführt, die alle Bestrahlungsarten vergleichbar machen soll. Diese soll jeweils das Maß für die biologische Wirkung in dem bestrahlten Gewebe sein. Physikalisch ist die Dosis definiert als eine absorbierte Energie pro Kilogramm Gewebe. Die verschiedenen Strahlen haben jedoch bei gleicher Energiedosis verschiedene Wirkungen im Gewebe. Dicht ionisierende Strahlung wie Neutronenstrahlung hat aufgrund der sehr viel höheren Energieabgabe pro Wegstrecke in Zellen eine viel höhere negative Wirkung als Röntgen-, Gamma- oder Betastrahlung. Daher wird die Energiedosis mit einem Strahlungswichtungsfaktor (w_R) versehen, um die Äquivalenzdosis zu erhalten.

Die Strahlungswichtungsfaktoren w_R für Neutronen, die die Relative Biologische Wirksamkeit (RBW) repräsentieren, hängen von der Energie der Neutronen ab. Laut ICRP 103 wird für den Energiebereich von 1 eV bis 10.000 MeV eine Funktion für die w_R angegeben, die einen maximalen Wert von etwa 20 bei etwa 1 MeV hat und zu niedrigeren und höheren Energien hin bis auf einen Wert 2,5 sinkt (ICRP 2008). Die Betrachtungen über die RBW basiert auf der ICRP-Publikation Nr. 92 von 2003.

Aus der experimentellen Forschung werden für Neutronen RBW-Werte von 2 bis 300 angegeben, in ICRP 92 wird über Werte bis 100 berichtet. Hinzukommt, dass in zahlreichen Inzidenzstudien an Flugpersonal Strahlenschäden in Form von Krebserkrankungen beobachtet werden, die durch die offiziell erhobenen geringen Dosen nicht erklärbar sind.

Bei Transport- und Lagerbehältern für bestrahlte Brennelemente oder hochaktive Wiederaufarbeitungsabfälle (z. B. CASTOR) ist der Energiebereich der austretenden Neutronen zwischen 10 keV und 400 keV (BÖRST et al. 2000).[4] Die meisten Neutronen liegen in einem Bereich, in dem laut ICRP der RBW fast den höchsten Wert von 20 annimmt. In einem sehr groben Mittel lässt sich abschätzen, dass der RBW laut ICRP für die Neutronen aus dem Behälter bei 15 liegt.

Laut BUND sollte in einer konservativen Schätzung für Exposition im Niedrigdosisbereich für alle Neutronenenergien ein Wert w_R von mindestens 90 benutzt werden. Dieser Empfehlung folgend werden die angegebenen Werte für den AVR-Behälter mit einem Faktor 6 multipliziert. (BUND 2017)

[4]Für die Neutronen aus dem AVR sind keine Angaben vorhanden.

2.3 Strahlendosen in Abhängigkeit zur Entfernung

Die vom radioaktiven Inventar ausgehende Strahlung wird laut JEN (2024b) durch den Behälter fast vollständig abgeschirmt. Direkt am AVR-Behälter würde die mittlere Dosisleistung etwa 2,5 Mikrosievert pro Stunde (2,5 µSv/h), in 1 Meter Abstand nur noch knapp 1 Mikrosievert pro Stunde (1 µSv/h) betragen. (JEN 2024b)

In der folgenden Tabelle sind diese Werte sowie die Werte, bei denen die Neutronenstrahlung (wie oben hergeleitet) mit einem Faktor 6 multipliziert wird, aufgelistet. Es wurde angenommen, dass die Neutronenstrahlung die Hälfte der Dosisleistung verursacht. In die Tabelle ist auch die zulässige Dosisleistung eingetragen.

Tabelle 1: Dosisleistung am Behälter, in 1 Meter Entfernung und zulässige Dosisleistung

	Mittlere Dosisleistung am Behälter nach ICRP berechnet (µSv/h)	Mittlere Dosisleistung korrigiert mit einen Faktor 6 (µSv/h)	Zulässige Dosisleistung Transport (µSv/h)
Oberfläche	ca. 2,5	8,75	2.000
1 m	1,0	3,5	100

Die JEN weist darauf hin, dass die effektive Dosis einer Person in Deutschland durchschnittlich 2.100 Mikrosievert im Jahr (0,24 µSv/h) beträgt.[5] Dieser Hinweis auf die Umgebungsstrahlung ist nicht relevant, suggeriert er doch, dass sie keinerlei gesundheitsschädlichen Einfluss hat. Aktuelle Studie belegen jedoch den Zusammenhang zwischen der Höhe der Hintergrundstrahlung und dem Auftreten von Krebserkrankungen.

Es gibt einen linearen Zusammenhang zwischen der erhaltenen Dosis und der Wahrscheinlichkeit einer Krebserkrankung. Dabei gibt es keine Schwellendosis.[6] Bei einer sehr geringen Dosis ist auch die Wahrscheinlichkeit einer dadurch induzierten Krebserkrankungen sehr gering. Eine Erhöhung der Strahlendosis erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung. In dieser Form wird die biologische Strahlenwirkung als stochastischer Effekt bezeichnet. Es sei angemerkt, dass heutzutage – unabhängig von dem Erhalten einer Strahlendosis – die Wahrscheinlichkeit, im Laufe des Lebens an Krebs zu erkranken, bei 40-50 % liegt.

Für diese Stellungnahme wird davon ausgegangen, dass eine international als „trivial“ bezeichnete Dosis von 10 µSv einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Gesundheit hat. Es wird daher auftragsgemäß abgeschätzt, nach welcher Zeit Menschen in einer Entfernung von 5, 10 und 20 Metern vom transportierten Behälter diese Dosis erhalten würden. Eine Dosis von 10 µSv würde ein Mensch in einer Entfernung von 5 Metern in ca. 11 Stunden, in 10 Metern in ca. 29 Stunden und in 20 Metern in etwa 57 Stunden erhalten. Bei der Berechnung wurde die biologische Wirkung der Neutronenstrahlung – wie vom BUND gefordert – korrigiert.

Auftragsgemäß wird weiterhin abgeschätzt, wie lange sich in diesen Bereichen Menschen aufhalten können, ohne die maximal zulässige Jahresdosis von 1 mSv für die Bevölkerung zu erhalten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Grenzwert nicht mit der vollständigen Ungefährlichkeit einer Dosis

[5]Hinzu kommen noch künstliche Strahlenquellen, etwa durch technische oder medizinische Anwendungen, die im Schnitt noch einmal rund 1.700 Mikrosievert (0,19 µSv/h) ausmachen. Daraus ergibt sich eine mittlere effektive Dosis von knapp 4.000 Mikrosievert pro Jahr (0,46 µSv/h), die im Durchschnitt jeder Mensch in Deutschland erhält.
[6]LNT-Modell = Linear-No-Threshold-Modell

gleichzusetzen ist. Allerdings würden extrem wenig Menschen, die eine derart geringe Dosis erhalten, dadurch gesundheitliche Folgen zu befürchten haben. Diese Dosis von 1 mSv würde ein Mensch in einer Entfernung von 5 Metern in 48 Tagen, in 10 Metern in ca. 119 Tagen und in 20 Metern in etwa 238 Tagen erhalten.[7] In der folgenden Tabelle sind die oben genannten Ergebnisse noch einmal dargestellt.

Tabelle 2: Dosisleistung in Abhängigkeit zur Entfernung des Behälters und Aufenthaltszeit bis zum Erhalten einer Dosis von 10 µSv bzw. 1 mSv

Entfernung zum Behälter (m)	Dosis-leistung nach ICRP (µSv/h)	Dosisleistung Neutronen korrigiert (µSv/h)	Dosisleistung korrigiert (µSv/h)	Aufenthalts-zeit in Stunden bis Erhalten einer Dosis von 10 µSv	Aufenthalts-zeit in Tagen bis Erhalten einer Dosis von 1 mSv
2	0,6	1,8	2,1	5	20
5	0,25	0,75	0,875	11	48
10	0,1	0,3	0,35	29	119
20	0,05	0,15	0,175	57	238

Zum Schutz eingesetzter Polizeikräfte ist beabsichtigt, ein Strahlenschutzkonzept unter Beachtung der gesetzlichen Vorgaben für die Transporte zu erstellen. Hierzu wird für die Einsatzkräfte, die in unmittelbarer Nähe der Transportbehälter eingesetzt werden, eine Strahlenschutzüberwachung durchgeführt. Ziel ist es, jede unnötige Strahlenbelastung zu vermeiden. Dazu wird die maximale Aufenthaltsdauer im Nahbereich der Transportbehälter festgelegt. Für die Strahlenschutzüberwachung ist vorgesehen, alle Einsatzkräfte, bei denen ein Einsatz im Nahbereich des Transportbehälters zu erwarten ist, zur Bestimmung der tatsächlichen Personendosis mit Dosimetern auszustatten. Die verwendeten Dosimeter werden im Anschluss von der zuständigen amtlichen Messstelle ausgewertet. Auch außerhalb des Strahlenschutzüberwachungsbereiches ist vorgesehen, dass der lagebedingt größtmögliche Abstand zu den Transportbehältern eingehalten wird. (MINRW 2024)

[7]Es sei weiterhin darauf hingewiesen, dass akute Strahlenschäden erst bei einer kurzzeitigen Bestrahlung mit einer Dosis von ca. 500 mSv eintreten. Diese Dosis wäre in 5 Metern Entfernung erst nach rund 65 Jahren erreicht. Dies wird hier aber nur zur Veranschaulichung angegeben., denn akute Strahlenschäden treten nach einer in einer kurzen Zeit erhaltenen Dosis ab einer bestimmten Höhe auf.

3 Sicherheit der AVR-Behälter

In diesem Kapitel werden die Sicherheitstests der AVR-Behälter vom Typ CASTOR THTR/AVR thematisiert. Es soll bewertet werden, ob die Annahmen in den Sicherheitsnachweisen über die Unfallszenarien konservativ sind und ob mögliche Risiken abgedeckt sind. In der Auftragsbeschreibung werden beispielhaft für ggf. nicht abgedeckte Risiken die mögliche Sturzhöhe von Brücken entlang von Transportstrecken oder terroristische Angriffe genannt. Es soll auch diskutiert werden, welche neuen Risiken sich durch die stetige Weiterentwicklung militärischer oder terroristischer Angriffsstrategien/-waffen für Castor-Transporte ergeben haben. Als Beispiele werden die Drohnenangriffe im Krieg gegen die Ukraine dargestellt.

3.1 Der Behältertyp THTR/AVR

Die Behälter vom Typ CASTOR® THTR/AVR werden zur Aufbewahrung der kugelförmigen Brennelemente des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR) in Hamm-Uentrop sowie des AVR-Reaktors in Jülich verwendet. Insgesamt 457 dieser Behälter sind beladen und zwischengelagert. Zusätzlich zu den 152 Behältern im Zwischenlager Jülich, die in das Zwischenlager Ahaus transportiert werden sollen, sind 305 Behälter aus dem THTR bereits im Zwischenlager Ahaus eingelagert. Hersteller der Behälter ist die deutsche Firma GNS (Gesellschaft für Nuklear-Service mbH).

Dieser Behältertyp ist deutlich kleiner als andere CASTOR-Behälter.[8] Der CASTOR THTR/AVR ist ca. 2,70 m lang und besteht aus Sphäroguss (Gusseisen mit Kugelgraphit). Jeder Behälter wiegt beladen etwa 27 t, in Transportkonfiguration etwa 32 t. Für den Transport und die Handhabung der Behälter sind kopf- und bodenseitige Tragzapfen an den Behältern verschraubt.

Die Abmessungen des CASTOR THTR/AVR sind:

- Außendurchmesser: 1.380 mm
- Gesamthöhe: 2.785 mm
- Schachtdurchmesser: 640 mm
- Schachthöhe: 2.014 mm
- Wandstärke: 370 mm
- Bodenstärke: 370 mm
- Primärdeckel: 250 mm
- Sekundärdeckel: 70 mm
- Schutzplatte: 66 mm

[8] Die Behälter vom Typ CASTOR®V sind etwa 6 m lang und haben einen Durchmesser von rund 2,50 m. Im beladenen Zustand haben diese Behälter eine Masse von bis zu 117 t.

Jeder der Behälter enthält zwei Brennelementkannen mit jeweils etwa 950 Brennelementkugeln, d.h. insgesamt maximal 1.900 Brennelementkugeln.

Die Abmessungen der AVR-Kanne mit ca. 950 Brennelementen:

- Außendurchmesser 559 mm
- Höhe 1.000 mm
- Wandstärke
  - im Mantelbereich 6,3 mm
  - im Deckel/Boden 13 mm

Die Brennelemente entwickeln Wärme; diese wird über die Behälterwand und von dort an die Umgebung abgegeben. Die Oberflächentemperatur der Behälter liegt bei einer Außentemperatur von 21 °C unter 30 °C.

Abbildung 2: 152 beladene CASTOR®THTR/AVR-Behälter im AVR-Behälterlager

Die Behälter der Bauart CASTOR THTR/AVR sind mit einem Doppeldeckel-Dichtsystem mit Metalldichtungen verschlossen. Die Behälter haben einen Sicherheitsnachweis für 40 Jahre. Für eine anschließende Nutzung ist ein neuer Sicherheitsnachweis zu erbringen. Mit der Einlagerung der Behälter mit den AVR-Brennelementen in Jülich wurde im Jahr 1993 begonnen, das heißt im Jahr 2033 ist für die ersten Behälter ein solcher Nachweis neu zu erbringen. In der folgenden Tabelle sind die jeweiligen Jahre der Beladung der AVR-Behälter dargestellt.

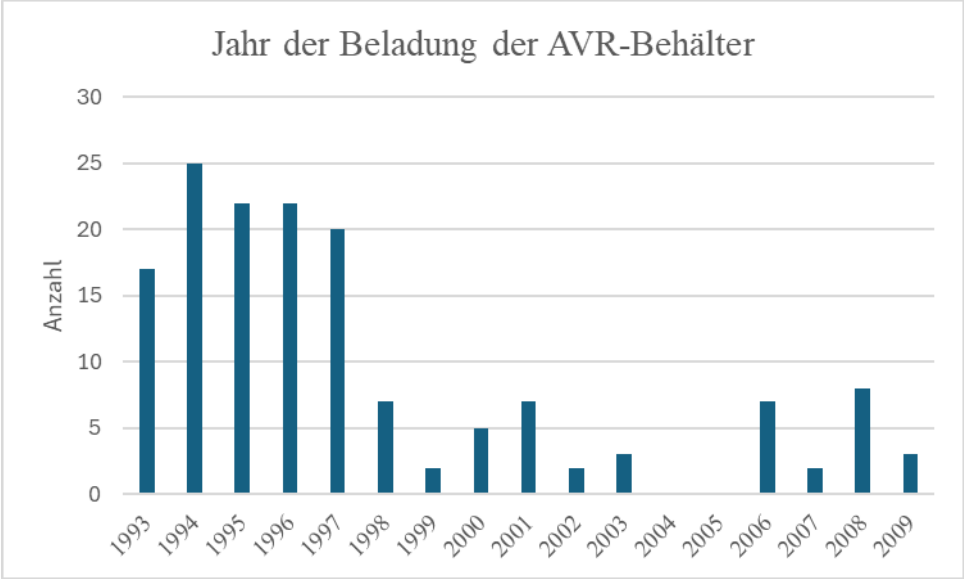

Abbildung 3: Anzahl der im Jahr beladenen AVR-Behälter

3.2 Sicherheitsanforderungen für Transport- und Lagerbehälter

Der Behälter vom Typ CASTOR® THTR/AVR hat eine Typ B(U)-Zulassung, d.h. er ist zugelassen für den Transport und die Lagerung von bestrahlten Kernbrennstoffen. Die Zulassung wird für die Bauart des Versandstücks (Behälter mit dem zu transportierenden Inhalt) vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) erteilt. Als Gutachter wird die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) beauftragt.

Um eine entsprechende Zulassung für den Behälter von der Genehmigungsbehörde zu erhalten, sind im Zulassungsverfahren für den Behälter eine Vielzahl von Anforderungen zu erfüllen und nachzuweisen, die sich aus dem internationalen Transportrecht bzw. den Transportregularien der International Atomic Energy Agency (IAEA) ableiten. Dazu gehören Auslegungsnachweise und Tests für die Stabilität und den sicheren Einschluss des Inventars, die gesicherte Wärmeabfuhr, die Kritikalitätssicherheit (d.h. Schutz gegen Kettenreaktion) und eine ausreichende Abschirmung (auch unter Unfallbedingungen).

Für Behälter zum Transport bestrahlter Brennelemente wurden von der IAEA Anforderungen bezüglich der mechanischen und thermischen Belastbarkeit aufgestellt, die in das deutsche Verkehrsrecht für Gefahrguttransporte übernommen wurden. Daher sind sie bindend für in Deutschland transportierte Behälter. Danach müssen B(U)-Behälter folgenden Unfallszenarien standhalten:

- einem Aufprall auf ein unnachgiebiges Fundament aus 9 m Höhe,
- einem Aufprall aus 1 m Höhe auf einen 20 cm hohen Stahldorn (Durchmesser 15 cm), auf unnachgiebiges Fundament montiert,
- einem Feuer mit einer Temperatur von 800 °C über 30 Minuten,
- dem Druck bei 15 m Wassertiefe für 8 Stunden und
- dem Druck von 200 m Wassertiefe für 1 Stunde.

Die ersten drei Tests müssen nacheinander am selben Behälter erfolgen. Der Nachweis, dass ein Behältertyp diese Anforderungen erfüllt, kann mit praktischen Tests (an Prototypen, Originalbehältern oder skalierten Modellen), mit Bezugnahme auf Ergebnisse aus früheren praktischen Versuchen mit ähnlichen Behältern oder mit Berechnungen durchgeführt werden. Der Sicherheitsnachweis wird unter Einbeziehung von Stoßdämpfern an Kopf und Boden des Behälters geführt.

Darüber hinaus muss im Rahmen der verkehrsrechtlichen Zulassung für den Behälter ein Nachweis zur Sprödbruchsicherheit geführt werden. Während bei den o. g. Anforderungen die Prüfung der Konstruktion im Vordergrund steht, soll mit dem Sprödbruchsicherheitsnachweis die Eignung des Werkstoffs geprüft werden. Dies geschieht in der Regel mit ingenieurtechnischen Berechnungen auf Grundlage von Kennwerten, die mit praktischen Standardprüfungen der Werkstofftechnik gewonnen werden. Damit wird nachgewiesen, dass der Werkstoff bei mechanischem Lasteintrag einen ausreichenden Widerstand gegen ein vollständiges Durchreißen der Behälterwand bietet. (UBA 2002)

3.3 Versuche mit CASTOR-Behältern

Zur Bauartprüfung der CASTOR-Behälter arbeitet die BAM mit dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) zusammen. Die BAM beurteilt die mechanische und thermische Sicherheit, die Einhaltung der zulässigen Grenzwerte bei der Freisetzung sowie die qualitätssichernden Maßnahmen bei Auslegung und Fertigung und unternimmt verschiedene Versuche und Berechnungen zur Unfallsicherheit der Behälter. (BAM 2022)

Die mechanische Prüfung besteht aus Fallversuchen zur Gewährleistung der oben genannten IAEA-Anforderungen: In der ersten Fallprüfung muss der Behälter aus neun Metern Höhe auf ein unnachgiebiges Fundament fallen, und zwar so, dass es zum größtmöglichen Schaden kommt. In der zweiten Fallprüfung fällt der Behälter aus einem Meter Höhe auf einen festen Stahldorn von 15 Zentimetern Durchmesser und 20 Zentimetern Höhe. Auch hier wird der Behälter in verschiedenen Positionen so ausgerichtet, dass ein größtmöglicher Schaden entsteht. Die mechanischen Prüfungen und die thermische Prüfung (Brand bei 800 °C für 30 Minuten) sind kumulativ mit demselben Prüfmuster durchzuführen.

Die CASTOR-Behälter werden außerdem einer Wassertauchprüfung unterzogen. Sie müssen dabei eine Stunde lang einem Überdruck von zwei Megapascal (MPa) standhalten. Das entspricht dem Druck in 200 Metern Tiefe.

Größere Behälter werden auf dem BAM-Testgelände Technische Sicherheit (BAM-TTS) in Horstwalde bei Berlin geprüft. Weltweit erstmalig wurde 1978 ein Brennelement-Transportbehälter des Typs CASTOR Ia in Originalgröße getestet. In diesem Versuch wie auch allen weiteren bisherigen Fallversuchen erwiesen sich die CASTOR-Behälter als unfallsicher. In über 30 Jahren hat die BAM über 100 Fall- und Brandprüfungen mit CASTOR-Behältern und vergleichbaren Behältern sowie mehr als 100 Prüfungen mit anderen Typ-B-Behältern durchgeführt. (BAM 2022)

Laut BAM lassen sich nicht alle potenziellen Unfälle experimentell simulieren. Deshalb werden ergänzend zu den experimentellen Prüfungen die Beanspruchungen an den Behältern durch die Finite-Element-Methode (FEM) am Computer simuliert. Aus den Berechnungen lässt sich ableiten, wann das Material an seine Belastungsgrenzen kommt. Dabei werden beispielsweise Spannungen oder Verformungen an Stellen sichtbar, die im realen Versuch nicht zugänglich wären. Für die Berechnungen werden die Ergebnisse aus den experimentellen Erprobungen herangezogen.

Ob die in der Berechnung ermittelten Sicherheitsreserven des Behälters tatsächlich ausreichen, lässt sich wiederum im Experiment überprüfen. So wurde beispielsweise einem CASTOR-VHLW-Behälter ein zwölf Zentimeter tiefer Riss zugefügt. Bei einem Fall aus 14 Metern Höhe blieb der Behälter dennoch intakt.

Zu den Tests gehörte auch die Simulation eines Flugzeugabsturzes auf einen Behälter, allerdings wurde dafür kein AVR-Behälter, sondern ein anderer Behältertyp verwendet. Die Auslegung gegen Flugzeugabsturz wurde nachgewiesen, indem ein Stahlwellenprojektil mit einer Masse von 1000 Kilogramm und einer Geschwindigkeit von 300 m/s auf einen Prüfbehälter geschossen wurde.[9]

Es wird oft in Frage gestellt, ob die verkehrsrechtliche Zulassung eines Behältertyps hauptsächlich auf Grundlage eines rechnerischen Sicherheitsnachweises zulässig ist. In jedem Fall würden praktische Test mit Originalbehältern eine höhere Sicherheit gewährleisten.

Mit dem CASTOR THTR/AVR wird bezüglich Art und Umfang der Prüfungen von der BAM erklärt, dass Prüfungen des Sicherheitsberichts mit Übertragbarkeitsanalysen mit CASTOR VHLW (Fallversuche) sowie u.a. mit Festigkeitsberechnungen, thermodynamischen Analysen, Freisetzungsbetrachtungen und einem Qualitätssicherungsprogramm erfolgt sind. Es sind also keine experimentellen Untersuchungen gemäß den IAEA-Anforderungen mit diesem Behältertyp erfolgt.

Die zu transportierenden Castoren müssen laut verkehrsrechtlicher Zulassung einem Sturz aus neun Metern Höhe standhalten. Es ist aber nicht bei allen Transportstrecken ausgeschlossen, dass ein Behälter von einer deutlich höheren Brücke stürzt. Dass dann die Integrität immer noch gewährleistet ist, kann niemand garantieren, allerdings wurden auch Tests durchgeführt, die ergänzend zu den Sicherheitsanforderungen der IAEA bzw. der Genehmigungsbehörden sind. Diese weisen auf den Erhalt der Stabilität bei größeren Fallhöhen hin. In ergänzenden Versuchen wurde ein 1:2-Modell eines Brennelement-Transportbehälters mehrmals aus etwa 200 Metern Höhe von einem Hubschrauber abgeworfen. Die sicherheitsrelevanten Abschirmungen und Dichtungen wurden dabei nicht beeinträchtigt.

Dieser Test wurde zwar nicht mit dem Behältertyp durchgeführt, aber ein anderer Extremtest, der mit einem CASTOR THTR/AVR erfolgte, belegte dessen Widerstandsfähigkeit:

Dieser Test wurde im April 1999 von der BAM durchgeführt. Es wurde ein mögliches Unfallszenario experimentell simuliert, bei dem ein CASTOR THTR/AVR der Explosion eines mit Propan gefüllten Kesselwagens ausgesetzt wurde. Der Versuchsaufbau wurde so lange einer den IAEA-Anforderungen entsprechenden Feuertemperatur von 800 °C ausgesetzt, bis der Innendruck des Gases zum Bersten des Tankwagens und zur nachfolgenden Explosion des Gases führte. Der mit 5,1 Mg gefüllte Propangastank explodierte nach 17,5 Minuten und verursachte dabei einen Feuerball, eine Druckwelle und Trümmerflug. Der Feuerball des explodierenden Wagens war über 150 Meter hoch, Einzelteile des Propantanks flogen bis zu 200 Meter weit. Der CASTOR-Behälter wurde sieben Meter weit von seinem Prüfstand geschleudert, drehte sich über die Längsachse und drang mit dem Deckel voran einen Meter tief in den Boden ein. Die Dichtungen des Behälters hielten der Explosion stand, obwohl der Versuch ohne die schützenden Stoßdämpfer durchgeführt wurde. Dieser Versuch zeigt einen hohen Sicherheitsstandard für diesen CASTOR-Typ. (BAM 2022)

[9]Ob dieser Versuch zur Simulierung eines Flugzeugabsturzes abdeckend ist, wird im Rahmen dieser Stellungnahme nicht bewertet.

Zu bedenken ist aber die Alterung der Materialien, insbesondere der Dichtung des Behälters. Die Einhaltung der spezifizierten Leckagerate (10^{-8} Pa m^3/s) ist nur innerhalb des Arbeitsbereichs der Dichtung sichergestellt. Unter möglichen Unfall- oder Störfallbedingungen sind Lageänderungen des Deckelsystems jedoch nicht mehr gänzlich ausgeschlossen. Die BGZ untersucht daher in zwei Forschungsvorhaben das Verhalten von gealterten Dichtungen unter Unfallbedingungen. Laut BGZ ist für den in die Alterungsbetrachtungen einzubeziehenden (Ab-)Transport nach der verlängerten Zwischenlagerung[10] unter anderem ein Fall in beliebiger Orientierung aus 9 m Höhe auf ein unnachgiebiges Fundament zu unterstellen. Bei den daraus resultierenden Lasten können die Großdeckel zum Beispiel bei einem horizontalen Fall aufgrund ihrer großen Trägheit verrutschen (MShift[11]). Auch im Vorhaben MLift[12] wird das Verhalten von gealterten Metalldichtungen unter Unfall- beziehungsweise Störfallbedingungen untersucht. Während im Vorhaben MShift der Lastfall einer Deckelquerverschiebung betrachtet wird, steht im Vorhaben MLift der Lastfall eines kurzzeitigen axialen Abhebens des Deckels im Mittelpunkt. (BGZ 2023) Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben liegen noch nicht vor.

3.4 Vergleich der IAEA-Anforderungen mit Unfallszenarien

Die von der IAEA festgelegten Anforderungen werden vielfach als unzureichend kritisiert. Hauptkritikpunkt ist neben der oben dargestellten Möglichkeit, den Sicherheitsnachweis ohne praktische Tests mit Originalbehältern durchzuführen, die nicht ausreichende Abdeckung möglicher Unfalleinwirkungen.

Die IAEA-Anforderungen orientieren sich an den bei schweren Unfällen auftretenden Belastungen, erfüllen aber nicht den Anspruch, jede mögliche Unfallbelastung abzudecken. Das wurde in verschiedenen Studien belegt. Laut einer probabilistischen Risikoanalyse der Genehmigungsbehörde in den USA (US-NRC) decken die IAEA-Anforderungen etwa 99,94 % aller denkbaren mechanischen Unfalleinwirkungen ab. (DROSTE 2001)

Die Hitzebeständigkeit der Castoren bzw. ihres Dichtungssystems wird bei einem Brandtest mit 800 °C über eine Dauer von 30 Minuten geprüft. Es sind jedoch bei Unfällen höhere Temperaturen möglich. Nach einer Studie in den USA werden häufig Flammentemperaturen von bis zu 1.100 °C erreicht und auch Branddauern von mehr als 30 Minuten sind bei schweren Unfällen unter ungünstigen Randbedingungen durchaus möglich. Dies hat sich auch bei mehreren schweren Unfällen in Deutschland bestätigt.[13] Der Brandtest deckt einige Szenarien nicht ab, wenn etwa größere Mengen brennbaren Materials an einem Unfall beteiligt sind. Bei einem Zusammenstoß mit einem Tanklastzug, insbesondere in einem Tunnel, ist es wahrscheinlich, dass Temperaturen über den vorgesehenen 800 °C entstehen und das Feuer länger als eine halbe Stunde andauert. (UBA 2002)

Unfallstatistik

Die GRS ermittelte 2009 die Gesamtunfallrate (Unfälle pro gefahrene Kilometer) in Deutschland. Dazu wurden Daten aus den Jahren 2000 und 2005 herangezogen. Die Daten basieren auf der amtlichen Unfallstatistik sowie auf den Ergebnissen der Verkehrszählungen 2000 und 2005. Die

[10] Das wäre nach einer mehr als 40-jährigen Lagerzeit, die Behälter in Jülich haben noch keine Lagerzeit von 40 Jahren aber bereits von 31 Jahren.
[11] MShift – Leckagerate gealterter Metalldichtungen bei einer Deckelquerverschiebung, Laufzeit 2022-2024
[12] MLift – Leckagerate nach dem Wiederverpressen gealterter Metalldichtungen, Laufzeit 2023-2031
[13] LKW-Unfälle mit langanhaltendem Feuer in Beelitz (November 1996) bzw. Aufprall mit 123 km/h in Bad Brückenau (Februar 1998).

Auswertung umfasst das gesamte Bundesgebiet, um eine ausreichende Fallzahl für die Ermittlung der Unfallrate zu haben. Bezüglich der Fahrzeugkategorie konnte ein kompatibler Datenbestand allerdings nur bei Ausweitung des betrachteten Verkehrsaufkommens auf „LKW mit mehr als 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht mit Anhänger sowie Sattelfahrzeuge“ bereitgestellt werden.[14] (GRS 2009)

Für die Auswertung wurden „Unfälle mit Personenschaden“ sowie „schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden“ herangezogen.[15] Unter den genannten Voraussetzungen wurde für die Verwendung bei der Risikoanalyse eine Gesamtunfallrate von $2{,}9 \cdot 10^{-7}$ pro Kilometer ermittelt. Daraus würde sich für 152 Transporte über jeweils etwa 200 km eine Unfallwahrscheinlichkeit von etwa 0,01 (1 %) ergeben. Diese Wahrscheinlichkeit ist zwar sehr klein, aber vorhanden.

Die GRS ermittelte, dass mit rein mechanischen Unfalleinwirkungen in fast 98 % aller Unfälle zu rechnen ist, wobei die Hälfte aller Unfälle in den Geschwindigkeitsbereich bis 35 km/h fällt. Bedingt durch die geltenden Geschwindigkeitsvorgaben für LKW liegen nur in knapp 5 % der Unfälle Geschwindigkeiten von über 80 km/h vor. In 2,3 % der Unfälle kommt es zu einem Brand.[16]

Unfälle treten auch bei radioaktiven Transporten auf: Die GRS veröffentlichte 2020 das Ergebnis einer systematischen Erfassung und Bewertung der Sicherheitsrelevanz von Vorkommnissen beim Transport radioaktiver Stoffe in Deutschland. Für den Zeitraum von 1995 bis 2019 wurden bundesweit insgesamt 1.028 Vorkommnisse im Zusammenhang mit der Beförderung radioaktiver Stoffe auf öffentlichen Verkehrswegen identifiziert und ausgewertet. Bei den erfassten Transportvorkommnissen handelt es sich überwiegend um eher geringfügige Regelverstöße gegen die Bestimmungen der Transportvorschriften sowie um unsachgemäße Handhabungs- und Betriebsabläufe. Klassische Verkehrsunfälle und Brände auf dem Beförderungsweg machen dagegen nur einen kleineren Anteil (2,5 %) der Transportvorkommnisse aus. Fünf davon waren mit Aktivitätsfreisetzung verbunden.[17] (GRS 2020)

Es sind Unfallsituationen denkbar, die durch die IAEA-Anforderungen nicht abgedeckt scheinen. Aufprallgeschwindigkeiten können bei Unfällen viel höher sein als solche durch die vorgeschriebenen Tests. Zum Beispiel wird bei einem Fall aus 9 m Höhe nur eine Aufprallgeschwindigkeit von weniger als 50 km/h erreicht. In der Praxis kommen aber viel höhere Geschwindigkeiten vor, auch könnte das Typ-B-Versandstück von einer hohen Brücke fallen. Die Erklärung, dass der 9-m-Fall auch diese Beanspruchungen abdeckt, liegt laut Bundesverkehrsministerium darin, dass bei dem Falltest ein unnachgiebiges Fundament verwendet wird, und so die Fallenergie vom Behälter voll aufgenommen werden muss. Es wird erklärt, dass bei Aufprall auf harten Untergrund die Aufprallgeschwindigkeit zwischen 65 und 120 km/h; und bei Aufprall auf weichen Untergrund zwischen 100 und 300 km/h betragen könnte, um vergleichbare Schäden zu erzeugen. (BMVBS 2013) Diese relativierende Aussage ist ungerechtfertigt. Denn zum einen sind Sicherheitsabstände erforderlich, diese sollen die Sicherheit

[14]Insofern wird die ermittelte Unfallrate auch durch leichtere Fahrzeuge als für den Abfalltransport vorgesehen beeinflusst, jedoch nicht durch die für besonders hohe Unfallraten bekannten Kleintransporter.

[15]Die letzteren umfassen alle Unfälle, bei denen als Unfallursache eine Ordnungswidrigkeit oder eine Straftat anzunehmen ist und mindestens ein Kraftfahrzeug aufgrund des Unfallschadens von der Unfallstelle abgeschleppt werden muss. Ein schwerwiegender Unfall mit Sachschaden liegt auch vor, wenn ohne Rücksicht auf die Art des Sachschadens ein Unfallbeteiligter unter Alkoholeinwirkung gestanden hat.

[16]Angaben zur Brandtemperatur sind nicht vorhanden.

[17]Die Untersuchungsergebnisse zeigen keine Hinweise auf grundlegende Defizite bei der Beförderung radioaktiver Stoffe. Es zeigt sich jedoch Verbesserungspotenzial bei der Vermeidung von recht häufig auftretenden administrativen Fehlern oder mangelnder Sorgfalt durch entsprechende Schulung, Weiterbildung etc. des involvierten Transportpersonals.

trotz Unsicherheiten in den Berechnungen gewährleisten und zum anderen können in realen Unfällen unvorhergesehene Schäden auftreten.

Fazit

Mit dem Behältertyp CASTOR THTR/AVR wurden keine Falltests gemacht, sondern es erfolgte nur modellhaftes Übertragen von Fallversuchen mit einem anderen Behältertyp. Zwar wurde ein sehr eindrucksvoller Extremtest mit einer Propangasexplosion durchgeführt, dabei fiel der Behälter allerdings auf Sandboden. Zudem war er dabei nicht einmal einem 30-minütigen 800 °C heißen Feuer ausgesetzt. Zusätzlich wirken Alterungseffekte auf den Behälter und die Dichtungen, deren Auswirkungen noch nicht vollständig bekannt sind. Daher verbleibt eine kleine Restunsicherheit bezüglich der Widerstandsfähigkeit. Es gibt nach heutigem Wissensstand aber zurzeit keine Anhaltspunkte, dass ein Zerbersten des Behälters oder ein Abfallen des Deckels in einer Unfallsituation drohen könnte. Es wäre dennoch empfehlenswert, wenn die Geschwindigkeit des Transports auf unter 48 km/h begrenzt bleibt und Strecken mit Brücken höher als 9 m vermieden werden.

Annähernd keine Unfallsituationen sind denkbar, in denen die mechanischen Einwirkungen höher sein können als durch die IAEA-Anforderungen abgedeckt. Die zusätzlich durchgeführten Falltests geben zusätzliche Sicherheit. Die thermischen Einwirkungen können allerdings in Extremsituationen höher sein und zu einem Versagen der Dichtungen führen. Daher werden in Kapitel 3 Freisetzungen aus einem Versagen des Doppeldichtungssystems und durch Strahlung nach einem Verlust der Abschirmung unterstellt.

3.5 Angriff mit panzerbrechenden Waffen

Die Gefahr besteht, dass Castoren bei einem Transport zu einer Zielscheibe eines terroristischen Angriffs werden könnten. Auftragsgemäß wird untersucht, ob von einer entschlossenen terroristischen Gruppe ein Angriff mit einer panzerbrechenden Waffe auf die transportierten Behälter durchgeführt werden könnte und die Auswirkungen eines derartigen Angriffs zu erheblichen Freisetzungen führen würden.

An dieser Stelle ist die Frage zu prüfen, ob es einer terroristisch motivierten Gruppe grundsätzlich möglich ist, einen Anschlag auf die transportierten Behälter „erfolgreich“ durchzuführen. Dazu ist zu prüfen, ob es möglich ist, sich den transportierten Behältern ausreichend zu nähern, um diese wirkungsvoll zu beschießen. Dabei sind die Randbedingungen des Transports mit den Leistungsmerkmalen eines entsprechenden Waffensystems gegenüberzustellen. Weiterhin ist zu prüfen, ob die Behälter durch konstruktive Maßnahmen gegen einen Hohlladungsbeschuss ausreichend geschützt sind.

Vorbemerkung: Eine Woche nach den Terroranschlägen am 11.09.2001 verfasste das deutsche Bundeskriminalamt (BKA) einen kurzen Bericht zur Sicherheit der kerntechnischen Anlagen in Deutschland. Das BKA kam zu dem Schluss, dass Anschläge auf kerntechnische Einrichtungen nicht im Bereich des Wahrscheinlichen liegen, gleichwohl aber eine hohe abstrakte Gefahr existiere. Im Jahr 2007 vertrat das BKA dann aber eine andere Auffassung. Die Wahrscheinlichkeit für Anschläge auf kerntechnische Einrichtungen sei zwar als gering anzusehen, muss aber in

Betracht gezogen werden.[18] Es gibt keinen Grund zu der Annahme, dass sich die Gefährdungssituation geändert hat.

Panzerbrechende Waffen

Tragbare, panzerbrechende Waffen werden weltweit von den Streitkräften in kriegerischen Auseinandersetzungen eingesetzt. Sie befinden sich aber auch in großer Anzahl in der Hand von Terroristen, da sie einerseits einfach zu handhaben und zu transportieren sind und andererseits einen großen Schaden im Ziel erzeugen. In Deutschland wird daher seit drei Jahrzehnten auch von den Behörden ein Beschuss mit einer derartigen Waffe als mögliches Angriffsszenario auf einen Behälter mit hochradioaktivem Abfall angesehen. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens von Zwischenlagern wurde von behördlicher Seite als Störmaßnahme bzw. sonstige Einwirkung Dritter (SEWD) der Beschuss mit einem Hohlladungsgeschoss aus einer panzerbrechenden Waffe auf einen dort aufbewahrten Behälter unterstellt. Das Gleiche gilt für Transporte von Behältern mit hochradioaktivem Material. Ein derartiger Beschuss mit einer schultergestützten, panzerbrechenden Waffe ist auch während des Transports der Behälter in das TBL Ahaus denkbar.[19]

Die Verwendung von stärkeren Schutzpanzerungen bei militärischen Panzerfahrzeugen führte in den letzten Jahrzehnten zu immer leistungsstärkeren Panzerfäusten und tragbaren, schultergestützten Panzerabwehrlenkwaffen (ATGW = Anti-Tank Guided Weapons).

Moderne panzerbrechende Waffen könnten auch gegen CASTOR-Behälter gerichtet werden – je effektiver die Waffen sind, desto folgenreicher könnte ein derartiger Angriff sein. Die Steigerung der Leistungsparameter der Waffensysteme zog dementsprechend eine potenziell stärkere Gefährdung der Behälter nach sich.

Die verbesserte Schutztechnologie der Panzerfahrzeuge führte zur Vergrößerung der Durchschlagsleistung der Hohlladungsgeschoss, vor allem durch eine Erhöhung der Sprengstoffmenge. Dadurch wird das Schadensausmaß eines Beschusses – auch auf einen Behälter – signifikant erhöht. Die Hohlladungsgeschosse, die von Panzerfäusten oder panzerbrechenden Lenkwaffen (ATGWs) abgefeuert werden, haben eine Durchschlagsleistung von 700 bis 1400 mm in Panzerstahl. Daher durchdringen sie die deutlich dünnere Wand des Behälters aus Gusseisen (370 mm) ohne Schwierigkeiten.

Die Waffensysteme wurden auch mit dem Ziel weiterentwickelt, Panzer durch einen Treffer vollständig zu vernichten. Dies wurde durch eine Verstärkung der zerstörenden Wirkung auch senkrecht zur Schussrichtung erreicht. Dadurch würde bei einem Beschuss des Behälters im Inneren eine größere Zerstörung der Brennelemente bewirkt werden.

Die Weiterentwicklung der Waffensysteme zum Bekämpfen von stehenden und fahrenden Zielen in größerer Entfernung führte zu einer deutlichen Steigerung der Ersttrefferwahrscheinlichkeit. Dies wurde durch vereinfachte Steuerungsmöglichkeiten realisiert.[20]

---

[18]Die entsprechenden Aktenvermerke wurden im Rahmen der Klage von Greenpeace gegen Atomkraftwerke in Deutschland bekannt und liegen vor.

[19]Die folgende Darstellung beruht auf einer Vielzahl von Studien zu diesem Thema, die die Autorin mit Beratung von mehreren Waffenexperten in den letzten zehn Jahre erstellt hat.

[20]Die Panzerabwehrlenkwaffen der ersten Generation verwenden ein sogenanntes „manual command-to-line-of-sight"-(MCLOS)-Leitsystem, bei dem der Schütze Flugkörper und Ziel zusammen im Auge behalten muss. Viele der heute verwendeten Waffensysteme (der zweiten Generation) arbeiten mit dem halbautomatischen SACLOS-Steuersystem

Das geringere Gewicht und die leichte Bedienbarkeit der modernen Waffensysteme vereinfachen die Handhabung und damit die Durchführung eines Angriffs. Die technische Möglichkeit einer schnellen Schussfolge und eine gute Nachladbarkeit ermöglichen einen mehrfachen zielgenauen Beschuss eines Ziels, auch eines transportierten Behälters. Die Zielgenauigkeit und damit die Trefferwahrscheinlichkeit sind sehr hoch, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Schuss der Behälter auch folgenschwer getroffen wird, liegt bei nahezu 100 %.

Die Weiterentwicklung der Waffensysteme zielte auch auf die Erhöhung der Reichweiten ab. Tragbare panzerbrechende Lenkwaffen haben heutzutage Reichweiten von bis zu 5.000 Metern. Die optimale Distanz liegt zwischen 50 und 400 Metern. Es ist daher davon auszugehen, dass im Bereich der Transportstrecke eine geeignete Position existiert, von der ein erfolgreicher Beschuss eines Behälters möglich ist.

Von einer panzerbrechenden Waffe können verschiedene Gefechtsköpfe abgeschossen werden. Der häufigste Gefechtskopf ist ein Hohlladungsgeschoss, dieses besteht aus einem hohlen und mit Sprengstoff ummantelten Metallkegel. Beim Aufprall auf das Ziel wird der Sprengstoff gezündet. Der sich bildende Metallstrahl (Hohlladungsstachel) trifft mit sehr hoher Geschwindigkeit (mehrere Tausend Meter pro Sekunde) auf das Ziel. Dabei entsteht ein derartig hoher Druck, dass sich – physikalisch gesehen – der Panzerstahl wie eine Flüssigkeit verhält und so vom Stachel problemlos durchdrungen werden kann. Die Öffnung, die ein solcher Strahl erzeugt, ist verhältnismäßig klein. Der Metallstrahl und Partikel der durchschlagenden Panzerung verursachen jedoch im Inneren des Panzers verheerende Schäden (z.B. Zerstörung der technischen Geräte, Tötung der Besatzung und Zündung von Munition).[21]

In Folge des Hohlladungsbeschusses eines Behälters wird die Behälterwand durchdrungen und im Inneren des Behälters wird ein Teil der Brennelemente zerstäubt, dadurch entstehen feine radioaktive Partikel. Ein Teil dieser Partikel wird aus dem Behälter freigesetzt und breitet sich in der Atmosphäre aus. (BUND 2023)

Im Rahmen der Genehmigungsverfahren der Standortzwischenlager wurde für die Ermittlung der radiologischen Folgen eine Studie der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) verwendet. (GRS 2003) Diese 2003 veröffentlichte Studie beruht auf Beschussversuchen aus dem Jahr 1992. Die Beschussversuche erfolgten vor fast drei Jahrzehnten und daher mit Hohlladungen, die – gemessen an späteren Geschosstypen – eine geringe Durchschlagsleistung hatten. Daher sind die damals ermittelten Freisetzungsmengen als zu gering anzusehen. Unter Berücksichtigung der Wirkungsweise eines Hohlladungsgeschosses und der in den letzten Jahrzehnten erhöhten Zerstörungsleistung sind deutlich höhere Freisetzungsmengen zu erwarten als die für die GRS-Studie zugrunde gelegte Freisetzungsmenge. Aufgrund der um mindestens eine, aber vermutlich um mehrere Größenordnungen höhere Freisetzungsmenge sind auch entsprechend höhere radiologische Folgen zu erwarten.

(semiautomatic command-to-line-of-sight). Die dritte Generation der ATGWs verwendet Infrarotlaser: nach Zielpeilung durch den Schützen erreichen die Geschosse das Ziel automatisch („fire and forget“).

[21]Heutzutage werden meist Tandemgeschosse verwendet, die aus zwei hintereinander angeordneten Hohlladungen bestehen. Diese wurden zur Zerstörung von reaktivem Panzerschutz entwickelt: Die Vorhohlladung bringt die reaktive Panzerung zur vorzeitigen Reaktion, die Haupthohlladung detoniert Sekundenbruchteile später und durchschlägt die Panzerung. Für einen „wirkungsvollen“ Beschuss eines Behälters ist der Einsatz eines Tandemgeschosses nicht erforderlich. (Reaktiver Panzerschutz enthält kleine Sprengladungen, um die Explosionswirkung der Hohlladung zu zerstreuen und dadurch die Wirkung erheblich zu vermindern.)

Der Grad der Zerstörung im Behälter und damit das Ausmaß der radioaktiven Freisetzungen hängen nach Aussagen von zu diesem Thema befragten Waffenexperten von dem verwendeten Hohlladungsgeschoss ab. Die Genehmigungsbehörde behauptete hingegen, dass die Leistungsfähigkeit der im Beschussversuch 1992 verwendeten Waffe so groß gewesen sei, dass sie auch mit heutigen Waffen und damit ausgeführten Angriffen vergleichbar sei. Denn wesentlich sei nur, dass das Hohlladungsgeschoss die Behälterwand durchdringe. Die Versuche seien insoweit abdeckend gewesen.

Bei den deutschen Beschussversuchen erzeugten zwei typgleiche Hohlladungsgeschosse zwar unterschiedliche Schadensbilder im Behälter, dennoch wurde die gleiche Menge an radioaktiven Stoffen freigesetzt. Aus dieser Tatsache wurde abgeleitet, dass bei beiden Treffern die Freisetzung nur aus dem ersten Brennelement stammt. (LUNA 2001) Vermutlich ist dieser Beschussversuch der Grund, weshalb die Behörde (fälschlich) behauptet, die Freisetzungsmenge sei unabhängig vom Hohlladungsgeschoss.

Mit der Leistungssteigerung der Hohlladungsgeschosse steigt auch die freigesetzte Menge für einen potenziellen Behälterbeschuss deutlich an. Denn zum einen ist der zerstörte Brennelement-Bereich im Behälter größer, dadurch wird ein größeres Volumen an Brennstoff pulverisiert und durch die größere Explosionswirkung vor dem Behälter werden mehr Partikel aus dem Behälter freigesetzt. Die Behörde geht bei der Ermittlung der radiologischen Folgen von der Freisetzung von etwa einem Gramm aus. Diese Freisetzungsmenge ist als deutlich zu gering anzusehen. Bei Kenntnis der Wirkungsweise eines Hohlladungsgeschosses ist dieser geringe Anteil nicht nachvollziehbar. Er kann nur in den Versuchsrandbedingungen der Beschussversuche 1992 sowie dem verwendeten Hohlladungsgeschoss begründet sein.

Diese Sichtweise der Autorin dieser Stellungnahme hat das OVG Schleswig in seinem Urteil bezüglich der Aufhebung der Genehmigung für das Standortzwischenlager Brunsbüttel bestätigt (OVG 2013): In dem Urteil erklärte der Senat: (Rd. 185) *Bei ihren Untersuchungen im Genehmigungsverfahren hat die Beklagte lediglich die Auswirkungen eines Angriffs mit bis zum Jahr 1992 auf dem Markt befindlichen panzerbrechenden Waffen berücksichtigt und eine Ermittlung der potentiell weitergehenden Auswirkungen moderner, zum Genehmigungszeitpunkt bereits existierender Waffen unterlassen. Hierin liegt ein weiteres Ermittlungsdefizit, weil die Beklagte für die Erteilung der Genehmigung davon ausgehen musste, dass die zu diesem Zeitpunkt auf dem Markt für Streitkräfte befindlichen Waffentypen innerhalb des Genehmigungszeitraums auch für terroristische Angreifer als nichtstaatliche Akteure verfügbar sein würden ….*

In den deutschen Beschussversuchen wurde der Mehrfachbeschuss eines Behälters nicht untersucht. Durch einen zweiten Hohlladungsbeschuss würde das bereits durch den ersten Schuss pulverisierte, aber im Behälter abgesetzte radioaktive Material durch die vorhandene Öffnung des Behälters freigesetzt. In US-amerikanischen Experimenten wurde eine etwa sechsmal höhere Freisetzung bei einer doppelten Behälterdurchdringung ermittelt. Aufgrund von Synergie-Effekten sind die Gesamtfreisetzungen bei einem mehrfachen Beschuss eines Behälters deutlich höher als bei nur einem Treffer bzw. als bei der Summe der gleichen Anzahl von Einzeltreffern.

Es muss insgesamt davon ausgegangen werden, dass potenzielle Attentäter einfach und kostengünstig an eine tragbare panzerbrechende Waffe inkl. Hohlladungsgeschosse gelangen können. Tragbare panzerbrechende Waffen sind leicht zu transportieren und zu verbergen. Sie sind sehr haltbar und wenig störanfällig. Ihr Einsatz erfordert nur eine geringe, schnell zu leistende

Ausbildung. Da sie vor allem extrem wirkungsvoll gegen verschiedene Ziele sind, sind sie auf dem illegalen Schwarzmarkt in großer Zahl verfügbar und kosten in der Regel verhältnismäßig wenig.

Ob die geplanten polizeilichen Maßnahmen gleichzeitig einen ausreichenden Schutz vor einem terroristischen Anschlag gewährleisten, der auch aus einigen Hundert Metern Entfernung durchgeführt werden kann, ist zu bezweifeln. Eine wichtige Erkenntnis aus dem Einsatz in Krisengebieten ist, dass zivile Konvois nicht wirkungsvoll geschützt werden können. Es kann nur der Versuch unternommen werden, die Wahrscheinlichkeit eines potenziellen Anschlags etwas zu minimieren – z. B. durch Geheimhaltung und kurzfristige Routenänderung sowie starken Begleitschutz zur Abschreckung.

Zusätzlich ist zu bedenken, dass insgesamt 152 Transporte stattfinden werden, so dass einer entschlossenen terroristischen Gruppe eine Reihe von Transporten zur Verfügung stehen, um das Sicherungskonzept der Polizeikräfte und den Ablauf des Transports auszukundschaften.

Zur Vorbereitung und Durchführung eines derartigen Angriffs können Drohnen verwendet werden. Derartige Minidrohnen können wie in der militärischen Anwendung der „Aufklärung“ dienen. [22] Die Drohnen können detailliertes Bildmaterial des Geländes, aber auch der Ressourcen und Strategien der Sicherungskräfte liefern. Dadurch könnte die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Angriffs erheblich gesteigert werden und so diesen für eine terroristische Gruppe „attraktiver“ machen.

Zudem existiert die Erfahrung, dass es bei den bisher durchgeführten Castor-Transporten, insbesondere im Wendland, politisch motivierten Aktivistinnen und Aktivisten möglich war, trotz Sicherung der Transportstrecke durch ein massives Polizeiaufgebot, in die Nähe oder sogar auf die Transportstrecke zu gelangen und diese zu blockieren.

Die dünne Sicherungshaube hält ein Hohlladungsgeschoss, das rund 1000 mm Stahl durchdringen kann, nicht wirksam auf. Bei dem Transport von abgebrannten Brennstoffen vom AKW Obrigheim zum SZL Neckarwestheim wurde bereits eine Sicherungshaube verwendet. Am 16.05.2017 wurde die Beförderung von 15 Behältern aus dem AKW Obrigheim in das SZL Neckarwestheim genehmigt. Bei den Transporten wurden Behälter vom Typ CASTOR 440/84 mvK eingesetzt. Die Behälter wurden zwischen dem 28. Juni 2017 und dem 19. Dezember 2017 in fünf Transporten mit jeweils drei Castor-Behältern auf dem Neckar vom AKW Obrigheim zum Zwischenlager Neckarwestheim befördert.

Für diese Transporte wurde im Vorfeld von der Behörde ermittelt, welche möglichen Strahlenbelastungen bei dem Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe resultieren würden. Für die Ermittlung der Strahlenbelastungen wurde erneut die als zu gering bewertete Freisetzungsmenge aus dem Behälter in Höhe von einem Gramm unterstellt. Sie wurde, laut Urteil zur Aufhebung der Genehmigung für das SZL Brunsbüttel, fehlerhaft ermittelt.

Aber selbst mit dieser zu geringen Freisetzungsmenge hätte ein Beschuss in der Umgebung der transportierten Behälter zu einer erheblichen Strahlenbelastung für die Bevölkerung geführt. Ohne zusätzlichen Schutz wären die radiologischen Auswirkungen nach einem potenziellen Beschuss oberhalb der zulässigen Inhalationsdosis gewesen. Daher wurden die Behälter mit einer Einhausung transportiert. Die Funktion der Einhausung war, die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umwelt so weit zu reduzieren, dass eine erhebliche Freisetzung radioaktiver Stoffe

[22] Die militärische Aufklärung beschafft und sammelt Informationen über potenzielle oder tatsächliche Gegner und wertet diese aus.

ausgeschlossen gewesen wäre und damit ein hinreichender Schutz der Bevölkerung gegeben gewesen wäre.

Bei einem Beschuss sollten sich Lamellenfenster der Einhausung automatisch schließen, so dass die radioaktiven Stoffe nur durch das Einschussloch hätten freigesetzt werden können und nur ein Teil der durch den Hohlladungs-Beschuss aus dem Behälter freigesetzten radioaktiven Stoffe in die Atmosphäre hätte freigesetzt werden können. Die Höhe der Freisetzung sollte ca. 1 % der nach einem Beschuss aus dem Behälter freigesetzten Stoffe betragen.

Es ist allerdings nicht plausibel, dass der automatische Verschluss der Lamellen tatsächlich schnell genug hätte erfolgen können, um eine Freisetzung derart wirkungsvoll und zuverlässig zu begrenzen. Die Freisetzung der radioaktiven Stoffe nach dem Beschuss erfolgt extrem schnell (im Milli-Sekunden-Bereich). Es ist nicht vorstellbar und wird auch technisch nicht näher erläutert, wie sich die Lamellen so schnell hätten schließen sollen. Das Auslösen sowie insbesondere das dichte Schließen der Lamellen innerhalb eines Zeitraums von weniger als einer Sekunde ist technisch nicht vorstellbar. Insofern wären die radioaktiven Partikel nach einem Beschuss freigesetzt worden, bevor die Lamellen vollständig dicht geschlossen gewesen wären.

Die Auslösung des Schließmechanismus im Bereich von etwa 15 Milli-Sekunden ist zwar möglich, eine derart schnelle Auslösung wird z. B. bei Airbags angewendet. Das mechanische Schließen der Lamellen unter einer Sekunde ist aber technisch eine Herausforderung. Dabei macht insbesondere das schnelle und dichte Schließen der Lamellen Schwierigkeiten, denn die Lamellen könnten bei einem schnellen Aufprall auf das Wandmaterial zurückprellen. Insofern ist ein relativ „langsames“ Schließen technisch erforderlich, wenn ein vollständiges und dichtes Schließen beabsichtigt wird.

Weiterhin ist zu bezweifeln, dass die Lamellen so dicht hätten schließen können, dass die sehr kleinen radioaktiven Partikel nicht mehr hätten freigesetzt werden können. Relevant für die Höhe der radiologischer Auswirkungen ist nicht, welche Menge an radioaktiven Partikeln insgesamt, sondern welche Menge an lungengängigen Partikeln freigesetzt wird. Lungengängige Partikel haben einen Durchmesser von unter 5 Mikrometer (µm), das entspricht 0,005 mm. Bei geschlossenen Fenstern liegt der Schutzfaktor eines Gebäudes gegenüber einer inneren Exposition durch Inhalation zwischen 2 und 5.[23] Insofern ist es nicht plausibel, dass die Einhausung der CASTOR-Behälter beim Transport von Obrigheim nach Neckarwestheim den Austritt der radioaktiven Partikel um einen Faktor 100 (entsprechend der angegebenen Menge von 1 %) reduziert hätten.

Annähernd die gesamte Wandfläche der Einhausung besteht aus Lamellen. Es scheint lediglich eine Abschätzung zu sein, dass nur 1 % der aus dem Behälter freigesetzten radioaktiven Partikel aus der Einhausung in die Umwelt freigesetzt worden wäre. Praktische Versuche oder wissenschaftliche Untersuchungen sind offenbar nicht erfolgt, was angesichts des Gefährdungspotenzials zwingend erforderlich gewesen wäre.

Insgesamt ist weder plausibel noch belegt, dass die Automatik die Lamellen schnell und insbesondere ausreichend dicht schließen kann. Das galt für die Transporte nach Obrigheim und gilt vermutlich auch für die möglichen Transporte nach Ahaus. Insofern muss davon ausgegangen werden, dass die Freisetzung radioaktiver Stoffe aus der Einhausung beim Transport eines

[23]Das heißt, die mögliche Strahlenbelastung durch Inhalation würde sich bei einem Aufenthalt im Gebäude gegenüber einem Aufenthalt im Freien um den Faktor 2 bis 5 reduzieren.

Behälters vergleichbar mit der Freisetzung aus der Lagerhalle eines Standort-Zwischenlagers ist. (BUND 2023)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass ein erfolgreicher Hohlladungsbeschuss auf die transportierten Behälter von Jülich nach Ahaus als möglich zu erachten ist, insbesondere da die Behälter nicht durch konstruktive Maßnahmen ausreichend geschützt sind und ein Beschuss auch aus einigen Hundert Metern Entfernung möglich ist.

3.6 Potenzieller Angriff mit „Kamikaze-Drohnen“

Drohnen sind relativ leicht zu beschaffen, umzurüsten und können sehr flexibel eingesetzt werden. Drohnen – also unbemenschte Systeme zu Wasser, zu Luft oder auf dem Boden – gibt es schon lange – sie wurden für die Aufklärung schon im Vietnamkrieg eingesetzt. Ihre heutige ‚Durchschlagskraft‘ resultiert aus ihrer (partiellen) Autonomie, ihrer datengestützten Vernetzung sowie ihrer präzisen Steuerung. Zudem sind sie deutlich günstiger als Raketen. Die sogenannten Kamikaze-Drohnen bzw. ‚loitering munition‘ gelten im Ukrainekrieg als ‚Gamec Changer‘.[24] Gleichzeitig gibt es – Stand 2023 – fast 360.000 privat genutzte, teleoperierte zivile Drohnen in Deutschland. Viele dieser Drohnen könnten zu Kamikaze-Drohnen umgebaut werden, indem eine Ladung Sprengstoff integriert wird.

Drohnen-Systeme können von LKWs gestartet und dadurch mehr oder weniger überall eingesetzt werden. Obwohl sie kleinere Sprengköpfe als Präzisionsraketen tragen, können sie sich aufgrund ihrer geringen Größe der Radarerfassung entziehen. Außerdem können sie in „Schwarm“-Formationen eingesetzt werden, die die Luftverteidigung überwältigen können. Die meisten Radar-Systeme sind nicht dafür gebaut, kleine Drohnen zu entdecken.

Was zu Beginn des Ukraine-Krieges erst Science-Fiction war, ist heute Realität: der massenhafte Einsatz von Minidrohnen. Sie verändern die Kriegsführung grundlegend. Besonders die ukrainischen Kamikaze-Drohnen beweisen ihre tödliche Präzision. Seit Anfang April 2024 sind mehrere Videos in Umlauf gekommen, welche die ukrainische Taktik bei Tonenke illustrieren.

Bei all diesen Kriegshandlungen kamen sogenannte „First Person View“- (FPV)-Drohnen zum Einsatz – ein Drohnentyp, der zu Beginn des Krieges gegen die Ukraine noch fast unbekannt war. Seit dem vergangenen Sommer hat er sich rasant verbreitet. Die Abkürzung bezieht sich auf das wichtigste Charakteristikum dieser Drohnenart: Der Pilot verfolgt das Geschehen mit einer Videobrille, an die in Echtzeit Aufnahmen der Drohnenkamera übermittelt werden. Er hat also eine Perspektive, als wenn er selber mitfliegen würde. FPV-Drohnen wurden ursprünglich zu Vergnügungszwecken entwickelt, aber die Kriegsparteien erkannten bald ihren Nutzen. Sie zeichnen sich gegenüber anderen Drohnen durch eine höhere Geschwindigkeit, extreme Wendigkeit und ihren niedrigen Preis aus. Die in der Ukraine eingesetzten, tellergroßen Quadrokopter (Drohnen mit vier Rotoren) kosten nur rund 300 bis 400 Euro. Sie sind genügend leistungsfähig, um einen mehrere Kilogramm schweren Sprengsatz einige Kilometer weit zu transportieren und damit ein feindliches Ziel zu bekämpfen.

[24]Die militärische Forschung fokussiert heute auf adaptive Schwärme autonomer Drohnen. Im Oktober 2017 kündigte z. B. das US-Verteidigungsministerium einen der ‚'signifikantesten Tests autonomer Systeme'‘ an – den Flug eines Schwarms von 103 Perdix-Drohnen, die in der Lage sein sollen, Schwarmverhalten zu zeigen, Formation zu fliegen, gemeinsam ‚Entscheidungen‘ zu finden und Probleme zu lösen. Allerdings gibt es bisher (noch) keine autonomen, adaptiven und lernenden Drohnenschwärme.

Dokumentiert sind mehrere Fälle, in denen FPV-Drohnen den modernsten und schwersten Panzer zerstörten, den das russische Militär im Ukraine-Krieg einsetzt: den T-90M. Meist sind jedoch mehrere Anläufe nötig, um einen Kampfpanzer außer Gefecht zu setzen. Erleidet ein Panzer durch einen ersten Angriff eine Panne und kommt zum Stehen, können weitere Drohnen oder Artillerieangriffe die Zerstörung vollenden. Mehr als zwei Drittel der russischen Panzer, die das ukrainische Militär in den letzten Monaten zerstörte, wurden laut Medienangaben unter Berufung auf eine Nato-Quelle mithilfe solcher Drohnen ausgeschaltet. Anfang 2023 verkündete das Militär in der Ukraine, es wolle 1.000 Stück dieser Technologie anschaffen. Ende 2023 erreichte die monatliche Produktion laut offiziellen Angaben bereits 50.000 Stück. Inzwischen beabsichtigt Kiew, im Laufe von 2024 insgesamt 2 Millionen FPV-Drohnen herzustellen. (NZZ 2024)

Auch in anderen Kriegsgebieten wurden und sollen Drohnen eingesetzt werden, wie die beiden folgenden Beispiele zeigen:

Nach Angaben der israelischen Armee feuerte der Iran im April 2024 mehr als 200 Drohnen und Raketen auf Israel ab. Iranische Medien berichteten, dass die „große Mehrheit“ der Raketen und Drohnen abgefangen worden sei. Bei den eingesetzten Drohnen handelte es sich mutmaßlich um iranische Kamikaze-Drohnen, vom Typ Shahed 136“. Einmal gestartet, können diese Drohnen für eine gewisse Zeit über einem potenziellen Zielgebiet schweben, während sie Bild- oder Sensorsignale senden, um ein Ziel zu identifizieren oder auf Befehle zu warten. Wird ein Ziel geortet oder der Befehl erteilt, stürzen sie sich darauf und detonieren mit einem integrierten Sprengsatz. Ihre Fähigkeit, quasi zu „warten“ bevor sie zuschlagen, unterscheidet sie von traditionellen Raketen und macht sie besonders effektiv in asymmetrischen Kriegsführungen. Sie werden daher auch als „herumlungernde Munition“ („loitering Munition“) bezeichnet. (MOPO 2024)

Das State Departement der USA hat den Verkauf von Einweg-Kampfdrohnen an Taiwan in zwei separaten Verträgen genehmigt.[25] Taipeh plant die Beschaffung von 720 Exemplaren der Switchblade 300 im Gesamtwert von 60,2 Millionen Dollar. Dabei handelt es sich um ein Einweg-System zur Bekämpfung von Personal und gepanzerten Fahrzeugen, das sich bis zu 20 Minuten in der Luft aufhalten kann, bis ein Ziel zugewiesen wird (loitering Munition). Die von einem Elektromotor angetriebene Drohne kann eine Geschwindigkeit von bis zu 161 km/h und eine maximale Höhe von 4572 Meter erreichen. Bei einer Gesamtmasse von 3,27 Kilogramm beträgt die Nutzlast 1,68 Kilogramm. (FLUGREVUE 2024)

In dieser Stellungnahme soll auftragsgemäß ein Szenario untersucht werden, in dem mehrere Drohnen den transportierten Behälter angreifen. Aufgrund der dargestellten Fähigkeiten von Kamikaze-Drohnen und der rasante Anstieg der erzeugten Stückzahl kann ein solches Szenario nicht vollständig ausgeschlossen werden.

[25]Mit einem "Höllenszenario" hoffen die USA, China von einer Invasion Taiwans abzuhalten. Ströme von Kampfdrohnen sollen im Ernstfall die Meerenge von Taiwan in eine Höllenlandschaft für die angreifenden chinesischen Streitkräfte verwandeln. Dies berichtet die Washington Post unter Berufung auf ein Gespräch mit dem Kommandeur des US Indo-Pacific Commands.

4 Auswirkung eines Unfalls oder eines Angriffs

In diesem Kapitel soll untersucht werden, welche Mengen relevanter radioaktiver Stoffe (z. B. Cäsium) freigesetzt werden könnten, wenn es zu einem Unfall oder einen Angriff auf einen der geplanten Castor-Transporte kommt. Dazu werden drei Szenarien betrachtet, a) ein Unfall mit Brand, b) ein Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe und 3) ein Angriff mit mehreren Drohnen. Dabei wird auch thematisiert, ob ein Grafitbrand resultieren kann.Abschließend werden die möglichen Gebiete berechnet, die betroffen sein könnten und die dort erforderlichen kurzfristigen und langfristigen Maßnahmen beschrieben.

4.1 Inventar eines Behälters

Das Versuchskernkraftwerk mit einem heliumgekühlten und graphitmoderierten Hochtemperaturreaktor und kugelförmigen Brennelementen wurde Mitte 1967 von der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) GmbH in Betrieb genommen. Im Dezember 1988 wurde der Reaktor nach einem ca. einundzwanzigjährigen Betrieb abgeschaltet und Anfang 1994 im Rahmen der Stilllegungsarbeiten mit der Entladung des Kerns begonnen. Die Entladung der Brennelemente wurde Mitte 1998 abgeschlossen.

Im AVR-Reaktor wurden während der Betriebszeit zur Brennelententwicklung unterschiedliche Brennelemente getestet, die auch unterschiedliche Anreicherungen hatten. In den ersten Jahren wurden ausschließlich Brennelemente mit hoch angereichertem Uran, so genannte HEU-BE, eingesetzt, später dann auch Brennelemente mit niedrigeren Anreicherungen, (LEU-BE). Der Anreicherungsgrad bei den HEU-BE lag über 90%, bei den LEU-BE betrug er weniger als 20%. Die HEU-BE wurden im Reaktor relativ hoch abgebrannt, der Abbrand der LEU-BE schwankt, was auf unterschiedliche Betriebs- und Einsatzzeiten im Kern zurückzuführen ist.

Bei den bestrahlten Brennelementen handelt es sich um kugelförmige Brennelemente (Durchmesser 60 mm), die aus einer im Zentrum liegenden Graphitmatrix (Durchmesser 50 mm) und einer äußeren Graphitschale (Dicke 5 mm) bestehen. Die im Zentrum liegende Graphitmatrix enthält den Brennstoff in Form beschichteter Partikel („coated particles“) bis zu 40.000 Stück pro Brennelement. Diese bestehen aus einem Brennstoffkern aus karbidischen oder oxidischen Uran- und/oder Thoriumverbindungen und den Brennstoffkern umgebenden Beschichtungen zur Rückhaltung der Spaltprodukte. Die Beschichtungen bestehen aus einer porösen Pufferschicht, die entweder mit zwei Schichten aus Pyrokohlenstoff oder zwei Schichten aus Pyrokohlenstoff mit eingefügter Siliziumkarbidschicht umgeben ist. Ein Brennelement hat eine Masse von ca. 214 g.

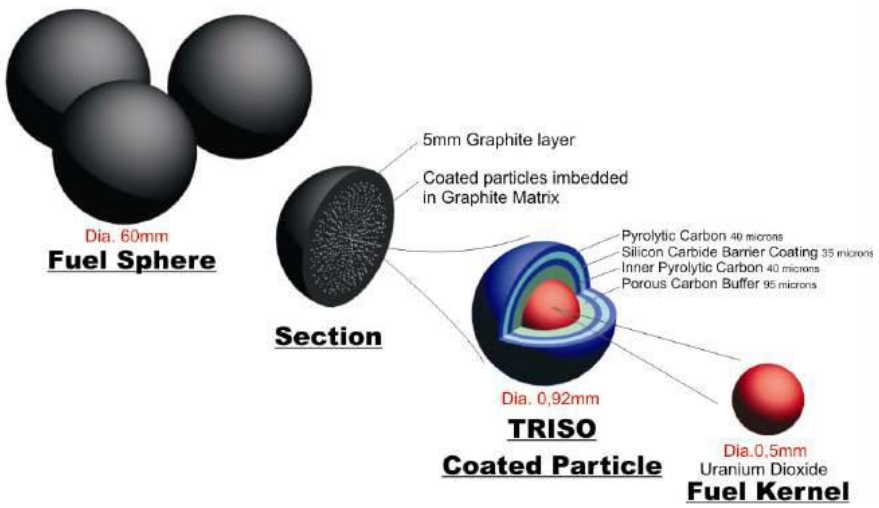

Abbildung 1: AVR-Brennelemente (JEN 2024a)

Die Brennstoffpartikel bestehen aus spaltbarem Uran (U-235) sowie dem nicht spaltbaren U-238. Ein Teil der Partikel der HEU-Brennelemente enthält Thorium (Th-232) statt U-238. Da alle Brennelementkugeln (unterschiedlich lange) im Reaktor waren, enthalten sie – neben unverbrauchtem Kernbrennstoff – u.a. Plutonium (Pu-239, entstanden aus U-238) und Uran-233 (entstanden aus Th-232) sowie die Spaltprodukte.[26]

In einem Forschungsbericht des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wird das Inventar einiger relevanter Elemente für vier unterschiedliche Brennelementkugeln angegeben. Die Cs-137-Aktivität liegt zwischen 1,03E11 und 1,37E11 Bq. Daraus ergibt sich ein maximales Cs-137-Inventar eines Behälters von rund 2,6E14 Bq. (KIT 2013) Eine grobe Abschätzung zeigt, dass die maximale Cs-137-Aktivität pro Volumenelement im CASTOR THTR/AVR etwa um einen Faktor 12 kleiner ist als die maximale Aktivität von Cs-137 in einem Behälter des Typs CASTOR V/19.

Jeder Behälter enthält zwei Kannen mit je 950 Brennelementen, d.h. jeder Behälter enthält 1900 Brennelemente. Insgesamt sollen 288.161 AVR-Brennelemente in den 152 Behältern transportiert werden. In der folgenden Tabelle sind die mittleren Aktivitäten für relevante Nuklide aus den Angaben im o.g, Forschungsbericht abgeschätzt. Dabei wurden die Abnahme der Aktivität durch radioaktiven Zerfall berücksichtigt.[27]

[26] Spaltprodukte aus der Kernspaltung sind instabil und daher radioaktiv; sie senden ionisierende Strahlung aus (Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung). Diese Strahlung ist – je nach Spaltprodukt – unterschiedlich energiereich und hat unterschiedliche Reichweiten.

[27] Die Angabe in KIT (2003) zu den Inventaren beziehen sich auf Aktivitäten aus den Jahren 1990 bis 2000. Hier wird abschätzend von einer weiteren Abklingzeit von 30 Jahren ausgegangen und die Aktivitäten unter Berücksichtigung ihrer Halbwertzeiten ermittelt.

Tabelle 3: Nuklide im Behälter berechnet aus KIT (2013)

Nuklid	Aktivität Kanne (Bq)	Aktivität Behälter (Bq)
Th-232	3,20E+07	6,40E+07
U-233	5,65E+10	1,13E+11
U-234	6,29E+09	1,26E+10
U-235	8,40E+06	1,68E+07
U-236	4,06E+08	8,11E+08
U-238	8,66E+05	1,73E+06
Pu-238	1,46E+12	2,92E+12
Pu-239	2,29E+09	4,58E+09
Pu-241	3,22E+11	6,44E+11
Cs-134	3,03E+09	6,07E+09
Cs-137	5,32E+13	2,13E+14

4.2 Unfallbedingte Freisetzung

Wie in Kapitel 3.4 dargelegt, gibt es nach heutigem Wissensstand zurzeit keine Anhaltspunkte, dass ein Zerbersten des Behälters oder ein Abfallen des Deckels in einer Unfallsituation drohen könnte. Unfallsituationen, in denen die mechanischen Einwirkungen höher sein können als solchem die durch die IAEA-Anforderungen abgedeckt werden, sind kaum denkbar. Die zusätzlich durchgeführten Falltests geben weitere Sicherheit. Die thermischen Einwirkungen können allerdings in Extremsituationen höher sein und zu einem Versagen der Dichtungen führen.

Daher werden im Folgenden die radiologischen Freisetzungen aus einem Versagen des Doppeldichtungssystems sowie durch Strahlung nach einem Verlust der Abschirmung unterstellt.

Die IAEA-Anforderungen verlangen keine vollständige Beibehaltung der Intaktheit des Behälters, sondern nur, dass bestimmte Schäden begrenzt sein müssen. So darf sich die abschirmende Wirkung des Behälters um den Faktor 100 verringern, d.h. von 0,1 mSv/h auf 10 mSv/h in 1 m Entfernung. Diese Werte sorgen nach Meinung der IAEA für eine Strahlenbelastung, die der Bevölkerung zugemutet werden kann. Hierzu ist festzustellen, dass ein großflächiger Abschirmverlust selbst bei Berechnung der Strahlendosis nach ICRP bereits nach sechs Minuten Aufenthalt in 1 m Entfernung des Behälters, die Überschreitung der zulässigen ganzjährigen Strahlenbelastung (1 mSv/a) für Personen aus der Bevölkerung bedeutet. (UBA 2002)

Da nicht bekannt ist, wie hoch die Dosisleistung bei einem unfallbedingten Versagen der Abschirmung ist, wird hier die zulässige Dosisleistung angenommen.

In der folgenden Tabelle sind die Dosisleistungen in Abhängigkeit von der Entfernung dargestellt. Zur Ermittlung der Dosisleistungen wurde die Neutronenstrahlung (wie oben hergeleitet) erneut mit einem Faktor 6 multipliziert. Es wurde wieder angenommen, dass die Neutronenstrahlung die Hälfte der Dosisleistung verursacht. Es ist auch die Zeitdauer aufgeführt, bis die zulässige Jahresdosis für die Bevölkerung (1 mSv) erreicht wäre. Es zeigt sich, dass eine Person noch in 20 Metern Entfernung die zulässige Jahresdosis nach rund 34 Minuten erhalten würde.

Tabelle 4: Zulässige Dosisleistung nach Unfall in Abhängigkeit von der Entfernung des Behälters sowie Aufenthaltszeit bis zum Erhalten einer Dosis von 1 mSv

Entfernung zum Behälter (m)	Dosisleistung nach ICRP (mSv/h)	Dosisleistung Neutronen korrigiert (mSv/h)	Dosisleistung korrigiert (mSv/h)	Aufenthaltszeit in Minuten bis Erhalten einer Dosis von 1 mSv (min)
1	10	30	35	1,7
2	6	18	21	2,9
5	2,5	7,5	8,75	6,9
10	1	3	3,5	17,1
20	0,5	1,5	1,75	34,3

Zudem ist eine Freisetzungsrate aus dem Behälter von 10^{-6} A2/h zulässig. Dabei ist A2 die auf eine Nuklidsorte bezogene maximal zulässige Aktivität in einem Behälter.

Unter Transportbedingungen sind fast alle Spaltprodukte fest und werden an das Uranoxidgitter gebunden und in den beschichteten Partikeln innerhalb der Brennelemente zurückgehalten. Unter diesen Bedingungen werden nur die gasförmigen Spaltprodukte Krypton (Kr-85) und Tritium (H-3) aus den Brennelementen freigesetzt. Da die Brennelemente mit einer Beschichtung aus pyrolytischem Kohlenstoff versehen sind und sich durch die Bestrahlung der Brennelemente in erheblichem Umfang Kohlenstoff-14 (C-14) bildet, wird dieser auch berücksichtigt.

Im Jahr 1978 kam es im AVR-Reaktor zu einer unzulässigen Überhitzung der Brennelemente. Temperaturbedingtes Versagen der Rückhaltefunktion der Brennstoffbeschichtungen führte dazu, dass sehr große Mengen an Cäsium (und Strontium) aus den Partikeln ausgetreten sind. Dies wurde auch in dem Bericht der AVR-Expertengruppe bestätigt. Das Cäsium befindet sich im porösen Graphitmoderator der Brennelementkugeln, und kann bei Hitze leicht abgelöst werden. **Da das Cäsium bei diesen Brennelementen im porösen Graphit sitzt, ist es leicht mobilisierbar und daher eine Freisetzung bei Unfällen möglich**.

Es ist nicht bekannt, welche Mengen Cs-137 oder anderer Nuklide sich in der Behälteratmosphäre befinden und bei einem Brand mit Versagen der Dichtungen freigesetzt werden können. Daher wird hier die zulässige Freisetzungsrate angenommen. Weiterhin wird eine Freisetzung von 10 Stunden unterstellt. Die zulässigen Freisetzungen für die Nuklide und die daraus resultierenden Strahlenbelastungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 5: Zulässige Freisetzungen laut IAEA nach einem Unfall und die daraus resultierenden Strahlenbelastungen

Nuklid	A2 (TBq)	Zulässige Freisetzungs-rate (MBq/h)	Freisetzung in 10 Stunden (MBq)	Strahlenbelastung nach 10 h in 50 Meter (µSv)	Strahlenbelastung nach 10 h in 100 Meter (µSv)
H-3	40	40	400	0,48	0,47
C-14	3	3	30	8,8	6,7
Kr-85	10	10	100	0,0019	0,0019
Cs-137	0,6	0,6	6	0,31	0,2
Gesamt				9,59	7,38

Es ist aber sowohl vorstellbar, dass deutlich größere Mengen freigesetzt werden und auch, dass es deutlich länger dauert bis der Behälter nach einem Unfall geborgen und/oder abgedichtet werden kann. Bei den hier angenommenen Freisetzungen bleibt die Strahlenbelastung knapp unter der trivialen Dosis von 10 µSv.

4.3 Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe

Im Folgenden werden die möglichen radiologischen Auswirkungen eines Beschusses mit einem Hohlladungsgeschoss aus einer panzerbrechenden Waffe auf einen transportierten Behälter (CASTOR THTR/AVR) in die Umgebung abgeschätzt.

Infolge eines Hohlladungsbeschusses des Behälters wird die Behälterwand durchdrungen und im Inneren des Behälters wird ein Teil der Brennelemente zerstäubt; dadurch entstehen feine radioaktive Partikel. Ein Teil dieser Partikel wird aus dem Behälter sowie der Sicherungshaube freigesetzt und breitet sich in der Atmosphäre aus. Da ein Teil der freigesetzten Partikel lungengängig ist, können sie bei Menschen, die sich zu diesem Zeitpunkt in der Nähe des Behälters aufhalten, durch Inhalation zu einer erheblichen Strahlenbelastung führen. Weiterhin können die abgelagerten Radionuklide zu Strahlenbelastungen aus Bodenstrahlung führen.

Ergebnis der GRS-Studie

Untersuchungen im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zum Hohlladungsbeschuss eines zu transportierenden AVR-Behälters sind nicht bekannt und können daher hier nicht verwendet werden. Anhaltspunkte für die Höhe der Freisetzung bzw. die radiologischen Folgen liefern Untersuchungen der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) zum Hohlladungsbeschuss eines gelagerten Behälters der Bauart CASTOR® V/19 mit abgebrannten Brennelementen in einem Standortzwischenlager.

Durch den Hohlladungsbeschuss zerstäuben Brennelemente in einem bestimmten Innenbereich des Behälters. Da dieser Bereich kleiner ist als die Höhe des Behälters, ist die Gesamthöhe des Behälters für die Menge der Freisetzung nicht wesentlich. Aus dem gleichen Grund ist die unterschiedliche Gesamtaktivität der Behälter zur Ermittlung der Freisetzungen nach einem Hohlladungsbeschuss unwesentlich. Die in einem Volumenelement vorhandene Gesamtaktivität eines CASTOR THTR/AVR ist geringer als in einem Volumenelement eines CASTOR V/19. Da allerdings die Abmessungen des CASTOR THTR/AVR deutlich geringer sind, müssen insgesamt vergleichbare Freisetzungen durch einen Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe erwartet

werden, da eine höhere Zerstörung im Behälterinneren aufgrund der geringeren Wandstärke zu erwarten ist. Diese grobe Abschätzung liefert Werte zur Orientierung.

Für die folgenden Abschätzungen wird eine Studie der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) zu den radiologischen Folgen nach einem Hohlladungsbeschuss im Standortzwischenlager Unterweser auf einen CASTOR® V/19 verwendet. (GRS 2003) Diese 2003 veröffentlichte Studie beruht auf Beschussversuchen aus dem Jahr 1992. Es ist anzunehmen, dass die heutzutage in Folge eines potenziellen Hohlladungsbeschusses auftretenden Strahlendosen deutlich höher sind.

Wie bereits erwähnt, sind die transportierten Behälter während des Transports nur durch ein dünnes Haubensystem geschützt. Dieses hält ein Hohlladungsgeschoss, dass rund 1.000 mm dicken Stahl durchdringen kann, nicht wirksam auf. Jedoch wird durch die Luft zwischen Haubensystem und Behälter die Wirkung des Hohlladungsstachels geringfügig gemindert. Zudem wird das Haubensystem einen gewissen Teil der aus dem Behälter oder den Behältern freigesetzten radioaktiven Partikeln zurückhalten. Eine detaillierte quantitative Betrachtung dieser Phänomene geht weit über den Umfang dieser Stellungnahme hinaus. Es wird hier plausibel angenommen, dass nach einem „erfolgreichen“ Beschuss aus dem Haubensystem die gleiche Menge an radioaktiven Stoffen freigesetzt wird, wie aus einem Lagergebäude (aus welchem ebenfalls nur ein gewisser Teil der aus dem Behälter freigesetzten radioaktiven Partikel in die Atmosphäre freigesetzt wird).

Maßgeblich zur Bewertung der potenziellen Strahlenfolgen von SEWD-Ereignissen in den Genehmigungsverfahren ist der Eingreifrichtwert des Katastrophenschutzes für eine Evakuierung der Bevölkerung (100 mSv) am Ort der nächsten Wohnbebauung. Dieser wird die zu erwartende effektive Strahlendosis aus der Inhalationsdosis und der Dosis aus Bodenstrahlung nach sieben Tagen gegenübergestellt. Der Notfallschutz hat bezüglich der stochastischen Effekte das Ziel, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens zusätzlicher Krebs- und Leukämiefälle durch eine Strahlenexposition der Bevölkerung mit Hilfe geeigneter Maßnahmen so gering wie möglich zu halten. Dabei muss allerdings vermieden werden, dass es auf Grund der Durchführung der Maßnahmen zu unakzeptablen Nachteilen für bestimmte Bevölkerungsgruppen kommt.[28]

Der maximale Wert der effektiven Dosis für die nächstgelegene Wohnbebauung in einer Entfernung von 800 m wird im GRS-Gutachten mit 213 mSv angegeben. (GRS 2003) Eine Person, die sich näher an der Transportstrecke aufhält, kann potenziell eine wesentlich höhere Dosis erhalten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es oberhalb einer Strahlendosis von 500 mSv bereits zu akuten Strahlenschäden kommen kann.[29]

Laut GRS-Berechnung hat sich für die ungünstige Wetterkategorie in einer Entfernung von 1 km eine Strahlenbelastung von 190 mSv und in einer Entfernung von 2 km ein Wert von 127 mSv ergeben.

Der ungünstigen Wetterlage ist die Wetterdiffusionskategorie F zuzuordnen. Bei gleicher Freisetzungsmenge sind die radiologischen Folgen abhängig von den Wetterbedingungen während der Ausbreitung der radioaktiven Stoffe. Die Diffusionskategorie gibt das Maß der Luftturbulenzen an. Die Kategorie D steht für mittlere Luftturbulenzen. Wetterbedingungen mit geringeren

[28]Es sollte z. B. im Rahmen der Planung von Evakuierungsmaßnahmen überlegt werden, ob die Evakuierung kranker älterer Personen nicht mit einem höheren Risiko verbunden ist, als dies durch die Strahlung hervorgerufen werden kann.
[29]Ab einer Strahlendosis von 500 mSv können akute Strahlenfolgen (Strahlenkrankheit) auftreten. Bereits eine vierfache Dosis (2.000 mSv) führt bei einigen Personen, eine zehnfache Dosis (5.000 mSv) bei den meisten Personen zum Tode.

Luftturbulenzen (Kategorie F = stabile Wetterlage) führen zu einer geringeren Verteilung der radioaktiven Stoffe in der Luft und damit zu einer höheren Konzentration von radioaktiven Stoffen.

Die ermittelte Inhalationsdosis für eine Entfernung von 100 m beträgt selbst bei der von der Behörde unterstellten zu geringen Freisetzungsmenge und bei einer Freisetzung bei Diffusionskategorie D rund 134 mSv. Personen würden den Hauptanteil der Dosis (131 mSv) durch Inhalation der radioaktiven Stoffe unmittelbar nach dem potenziellen Terroranschlag, also vor einer möglichen Evakuierung, erhalten.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die zu erwartenden Strahlenbelastungen nach einem erfolgreichen Behälterbeschuss entlang der Transportstrecke, in Folge eines Hohlladungsbeschusses deutlich oberhalb des Eingreifrichtwerts für den Katastrophenschutz liegt, der als Maßstab für SEWD-Ereignisse gilt. Es muss bei der Einschätzung des Risikos eines Anschlags auf die transportierten Behälter berücksichtigt werden, dass die Inhalationsdosis der dominierende Teil der effektiven Dosis für einen Integrationszeitraum von sieben Tagen ist. Diese Dosis erhält die in Ausbreitungsrichtung stehende Person bereits wenige Minuten nach erfolgtem Beschuss (z. B. bei einer Entfernung von 1000 m unter einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s nach 200 s. Die Strahlenbelastung selbst erfolgt etwa innerhalb einer Minute.)

Wenn die Ermittlung der Freisetzung durch Berücksichtigung eines leistungsstärkeren Hohlladungsgeschoss oder/und durch mehrere Treffer eines Behälters erfolgen würde, wäre der als Maßstab geltende Wert (effektive Dosis aus Bodenstrahlung in sieben Tagen und Inhalationsdosis in Höhe von 100 mSv) selbst in einer Entfernung von mehreren Kilometern zur Strahlungsquelle überschritten.

Berechnungen mit dem Programm HOTSPOT

Ergänzend erfolgten für diese Stellungnahme eigene abschätzende Berechnungen der radiologischen Auswirkungen eines Hohlladungsbeschusses. Für die quantitative Abschätzung der Freisetzungsmenge wird hier davon ausgegangen, dass durch den Hohlladungsstrahl zunächst ein konischer Schusskanal durch die Behälterwand entsteht, und dann im Behälter in einem Raumbereich Brennelemente zerstäubt werden, die mit einem liegenden Kegelstumpf beschrieben werden können. Aus geometrischen Überlegungen leitet sich ab, dass in diesem Raumbereich 5 % des Brennstoffs einer Kanne zerstäubt werden. Weiterhin wird angenommen, dass ein Anteil von 10 % des zerstäubten Brennstoffes aus dem Behälter und der Haube in die Atmosphäre freigesetzt wird. In der folgenden Tabelle sind die entsprechenden Freisetzungsmengen dargestellt.

Tabelle 6: Freisetzungsmenge nach Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe

Radionuklid	Aktivität (Bq)
Th-232	1,60E+05
U-233	2,82E+08
U-234	3,15E+07
U-235	4,20E+04
U-236	2,03E+06
U-238	4,33E+03
Pu-238	7,31E+09
Pu-239	1,15E+07
Pu-241	1,61E+09
Cs-134	1,52E+07
Cs-137	2,66E+11

Für die Berechnung der potenziellen radiologischen Auswirkungen wurde das Ausbreitungsprogramm HOTSPOT (Version 3.1.2.) verwendet. Dieses Programm wurde im renommierten US-amerikanischen Lawrence Livermore National Laboratory entwickelt. Es dient zur Ermittlung orientierender Werte. Die Ausbreitungen werden für die mittlere Wetterdiffusionsklasse D und eine mittlere Windgeschwindigkeit von 4 m/s durchgeführt. Niederschlag während der Freisetzung wird nicht unterstellt.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für die ermittelte effektive Dosis nach 7 Tagen aufgeführt. Der Eingreifrichtwert von 100 mSv für eine Evakuierung von 100 mSv wird in Windrichtung bis in eine Entfernung von rund 160 Meter überschritten. Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ wird ab einer effektiven Dosis von 10 mSv in 7 Tagen angeordnet. Diese kann in Windrichtung bis etwa 400 Meter auftreten.

In 50 Meter Entfernung zur Transportstrecke treten in Windrichtung Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen haben. In größerer Nähe oder unter anderen meteorologischen Bedingungen sind höhere Strahlenbelastungen zu erwarten. Die hier ermittelten Strahlendosen sind vergleichbar mit den oben dargestellten Strahlendosen, die von der GRS für das SZL Unterweser ermittelt worden sind.

Tabelle 7: Strahlendosen in 50 bis 1.000 m Entfernung vom Behälter nach Beschuss mit panzerbrechender Waffe

Entfernung (m)	Inhalationsdosis (mSv)	Dosis durch Bodenstrahlung (mSv)	Effektive Dosis nach 7 Tagen (mSv)
50	506	9	515
100	149	1	150
200	41	<1	41
500	7	<1	7
1.000	2	<1	2

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die zu erwartenden Strahlenbelastungen für die Personen in der Nähe der Transportstrecke in Folge eines derartigen Hohlladungsbeschusses gesundheitsschädlich, vielleicht sogar lebensbedrohlich sind. **Es ist bei der Bewertung der potenziellen radiologischen Auswirkungen zu beachten, dass Personen durch diese Katastrophenschutz-Maßnahme nicht vor Strahlenbelastungen bewahrt werden können, da sie die Inhalationsdosis unmittelbar nach dem potenziellen Terroranschlag erhalten würden, also vor einer Evakuierung, erhalten würden.**

Bodenkontamination

Für die Bewertung der möglichen Auswirkungen eines Beschusses mit einer panzerbrechenden Waffe ist auch von Bedeutung, dass durch eine trockene und/oder nasse Ablagerung von freigesetztem Cs-137 erhebliche Bodenkontaminationen auftreten können. Dieses relativ langlebige Radionuklid (Halbwertszeit ca. 30 Jahre) führt zu einer langfristigen Bodenkontamination. Dekontaminationen auf bebautem Gebiet sind möglich, allerdings sind sie sehr aufwendig, in bewachsenen Bereichen ist eine Dekontamination noch aufwendiger und hat nur beschränkte Wirkung.

Aus den durchgeführten Ausbreitungsrechnungen wurde die mögliche Cäsium-137-Bodenkontamination, die in Windrichtung resultieren könnte, abgeschätzt. Für eine Entfernung von 100 m zum Behälter wurde z. B. eine Cs-137- Bodenkontamination von mehr als 9.000 kBq/m² ermittelt. In der folgenden Tabelle sind die Cs-137- Bodenkontaminationen in Abhängigkeit von der Entfernung aufgeführt.

Tabelle 8: Cs-137- Bodenkontaminationen nach Beschuss mit panzerbrechender Waffe in Abhängigkeit von der Entfernung

Entfernung (m)	Cs-137 Bodenkontamination (kBq/m²)
50	48.000
100	9.700
200	2.100
500	280
1.000	67
10.000	0,77
20.000	0,24

Die ermittelten Cs-137 Bodenkontaminationen wurden den Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung gegenübergestellt.

- Eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung ist ab einer Cs-137- Bodenkontamination von 12.000 kBq/m² erforderlich. Diese Maßnahme würde bis in eine Entfernung von rund 90 Metern erforderlich werden.
- Bei Cs-137- Bodenkontaminationen mit mehr als 0,65 kBq/m² müssen landwirtschaftliche Interventionsmaßnahmen (darunter vorgezogene Ernte, Schließen von Glashäusern und Abdecken von Pflanzen, das Verbringen von Tieren in Ställe) ausgelöst werden. (SSK 2010) Für eine Entfernung von 10 km wurde eine Cs-137- Bodenkontamination von ca. 0,77 kBq/m² abgeschätzt, sodass derartige Maßnahmen bis zu dieser Entfernung erforderlich würden.

Ein „erfolgreich“ durchgeführter Beschuss eines transportierten Behälters mit einer panzerbrechenden Waffe hat schwerwiegende Folgen für die im Umfeld der Transportstrecke liegenden Gebiete. Insgesamt ist davon auszugehen, dass nach einem „erfolgreichen“ Beschuss die Bodenkontaminationen so hoch sind, dass eine langfristige Beeinträchtigung resultierten wird.

4.4 Angriff mit Drohnen

In dieser Stellungnahme soll auftragsgemäß ein Szenario untersucht werden, in dem mit mehreren Drohnen ein transportierter Behälter angegriffen wird. Diese Drohnen sollen mit Sprengstoffen und Brandbeschleuniger beladen sein, um bei einer geeigneten Abfolge des Angriffs den Behälter einer Explosion auszusetzen und ein Teil des Inhalts in Brand zu setzen. Aufgrund der in Kapitel 3.6 dargestellten Fähigkeiten von Kamikaze-Drohnen einerseits und des rasanten Anstiegs der erzeugten Stückzahl anderseits kann ein solches Szenario nicht vollständig ausgeschlossen werden. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass das Graphit bereits ab 600 °C brennbar ist. Brennender Graphit ist nur schwer zu löschen, weil er mit Wasser zu brennbaren Gasen reagiert. Graphitstaub setzt die Entzündungstemperatur der Kugeln herab.

Es geht über den Umfang dieser Stellungnahme hinaus, ein genaues Angriffs-Szenario zu entwickeln. Zudem soll keine Anleitung für einen Angriff bereitgestellt werden. Insofern wird hier plausibel angenommen, dass durch diesen heutzutage noch sehr hypothetisch erscheinenden

Terrorangriff etwa 40 % des Inhalts einer der beiden Kannen in die Atmosphäre freigesetzt wird. In der folgenden Tabelle sind die entsprechenden Freisetzungen dargestellt.

Tabelle 9: Abgeschätzte Freisetzungsmenge nach einem Drohnenangriff

Nuklid	**Freisetzung (Bq)**
Th-232	1,28E+07
U-233	2,26E+10
U-234	2,52E+09
U-235	3,36E+06
U-236	1,62E+08
U-238	3,46E+05
Pu-238	5,85E+11
Pu-239	9,17E+08
Pu-241	1,29E+11
Cs-134	1,21E+09
Cs-137	2,13E+13

Für die Berechnung der potenziellen radiologischen Auswirkungen wurde hier ebenfalls das Ausbreitungsprogramm HOTSPOT (Version 3.1.2.) verwendet. Ebenso wurden die Ausbreitungsrechnungen für die Wetterdiffusionsklasse D und eine mittlere Windgeschwindigkeit von 4 m/s durchgeführt. Niederschlag während der Freisetzung wird nicht unterstellt. Die ermittelten Strahlendosen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 10: Strahlendosen in Entfernungen von 50 bis 20.000 m Entfernung vom Behälter nach Angriff mit Drohnen

Entfernung (m)	**Inhalation (mSv)**	**Bodenstrahlung (mSv)**	**Effektive Dosis nach 7 Tagen (mSv)**
50	42.143	730	42.873
100	11.330	147	11.477
200	3.187	32	3.219
500	597	5	602
1.000	185	1	186
10.000	6	<1	6
20.000	2	<1	2

Die Gesamtdosis übersteigt bis in ca. 4 km Entfernung den Eingreifrichtwert für eine Evakuierung der Bevölkerung von 100 mSv. Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ zum Schutz der Bevölkerung vor Strahlenbelastungen würde bis in eine Entfernung von rund 9 km angeordnet werden müssen.

Im Wesentlichen wird die Dosis durch Inhalation der radioaktiven Stoffe bestimmt, die die Personen in Windrichtung unmittelbar nach der Freisetzung erhalten würden. Der Hauptbeitrag der Inhalationsdosis wird durch das Nuklid Plutonium-238 erzeugt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bis in eine Entfernung von rund 120 Meter die möglichen Inhalationsdosen tödlich (ab 7000 mSv) sind. Einer Dosis von 4.000 mSv ist eine 50%ige Sterbewahrscheinlichkeit zuzuordnen. Diese Dosen können bis etwa 180 Meter Entfernung auftreten.

Für Personen, die sich in Gebäuden aufhalten, würde sich die Dosis um einen Faktor 3 reduzieren. Das bedeutet, dass die Dosen an der Strecke selbst für Menschen, die sich in Gebäuden aufhalten, tödlich sein könnten.[30] Dieses Szenario veranschaulicht die potenziellen Gefahren des Transports.

Bodenkontaminationen

Für die Bewertung der möglichen radiologischen Auswirkungen eines Drohnenangriffs ist auch von Bedeutung, dass durch eine trockene und/oder nasse Ablagerung von freigesetztem Cs-137 erhebliche und langfristige Bodenkontaminationen auftreten können. Wie bereits erwähnt, sind Dekontaminationen möglich, allerdings sehr aufwendig und haben nur eine beschränkte Wirkung.

Aus den durchgeführten Ausbreitungsrechnungen wurden die mögliche Cs-137-Bodenkontamination abgeschätzt, die in Windrichtung resultieren könnte. In der folgenden Tabelle sind die Cs-137- Bodenkontaminationen in Abhängigkeit von der Entfernung aufgeführt.

Tabelle 11: Cs-137- Bodenkontaminationen nach Angriff mit Drohnen in Abhängigkeit von der Entfernung

Entfernung (m)	Cs-137- Bodenkontamination (kBq/m²)
50	3.800.000
100	780.000
200	170.000
500	22.000
1.000	5.300
10.000	61
20.000	19

[30]Die Dosen sind bis in eine Entfernung von rund 60 Meter tödlich; in einer Entfernung von 100 Meter ist eine Sterbewahrscheinlichkeit von 50 % zuzuordnen.

Ein Vergleich der ermittelten Cs-137- Bodenkontaminationen mit den entsprechenden Katastrophenschutzmaßnahmen zeigt, dass in Windrichtung folgende Maßnahmen erforderlich werden:

- Eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung, ab einer Cs-137- Bodenkontamination von 12.000 kBq/m², würde bis in eine Entfernung von rund 600 Metern erforderlich werden.
- Bei Cs-137- Bodenkontaminationen mit mehr als 0,65 kBq/m² müssen landwirtschaftliche Interventionsmaßnahmen (darunter vorgezogene Ernte, Schließen von Glashäusern und Abdecken von Pflanzen, das Verbringen von Tieren in Ställe) ausgelöst werden. Für eine Entfernung von 20 km wurde eine Cs-137- Bodenkontamination von ca. 19 kBq/m² abgeschätzt. Für größere Entfernungen liefert das Programm keine ausreichend guten Werte, insofern erfolgte keine entsprechende Berechnung. Es muss aber davon ausgegangen werden, das landwirtschaftliche Interventionsmaßnahmen in Entfernungen von deutlich mehr als 20 km erforderlich werden.

Ein „erfolgreich“ durchgeführter Angriff mit Drohnen hat unweigerlich schwerwiegende Folgen für die im Umfeld der Transportstrecke liegenden Gebiete. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Bodenkontaminationen so hoch sind, dass eine langfristige Beeinträchtigung in Gebieten bis in deutlich mehr als 20 km Entfernung resultieren wird.

5 Literatur

BAM (2022): Behälter für radioactive Stoffe Beispiele für Behälterprüfungen; Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung; 02.02.2022

BGZ (2023): Das Forschungsprogramm der BGZ; Gesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ) 2003

BERTRAM (2011): Zur besonderen Gefährlichkeit der Neutronenstrahlung, Anlässlich einer Veranstaltung „Umweltkrise und medizinische Wissenschaft" in der Evangelischen Akademie Loccum vorgetragen *Von Rolf Bertram*

BMVBS (2013): Beförderung radioaktiver Stoffe; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; 2013

BÖRST (et al. 2000): Strahlungsmessungen an Transport- und Lagebehältern zur Beförderung von hochaktiven Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitung und von bestrahlten Brennelementen. Börst, F.-M., Rimpler, A., Scheib, H.; Bundesamt für Strahlenschutz, BfS-ET-32/00, Salzgitter, Juli 2000

BUND (2017): BUND-Stellungnahme zum Entwurf des Strahlenschutzgesetzes; Überarbeitete Fassung; Berlin, 20. Februar 2017

BUND (2023): Aktuelle Probleme und Gefahren bei deutschen Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle**;** Studie von Diplom-Physikerin Oda Becker im Auftrag des BUND; Juni 2023

DROSTE (2001): Bauartprüfung, Qualitätssicherung und Sonderversuche mit CASTOR-Behältern; B. Droste; Fachtagung Standortnahe Zwischenlager; 14.–15. März 2001

FLUGREVUE (2024): USA genehmigen Export zur Invasions-Abwehr - Taiwan kauft tausend Kamikaze-Kampfdrohnen; Patrick Hoevler, 20.06.2024; https://www.flugrevue.de/militaer/usa-genehmigen-export-zur-invasions-abwehr-taiwan-kauft-tausend-kamikaze-kampfdrohnen/

GRS (2003): Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS): Radiologische Folgen durch die Freisetzung radioaktiver Stoffe aufgrund der Einwirkung Dritter auf Transport und Lagerbehälter CASTOR V/19 im Zwischenlager des Kernkraftwerks Unterweser (KKU); GRS-A-2980; Mai 2003

GRS (2009): Transportstudie Konrad 2009, GRS - 256 Sicherheitsanalyse zur Beförderung radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad; F.-N. Sentuc, W. Brücher et al.; Dezember 2009 mit Corrigendum vom April 2010

GRS (2020): Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH Erfassung und Auswertung von Vorkommnissen bei der Beförderung radioaktiver Stoffe; Abschlussbericht zu AP 5; Annegret Günther; September 2020

ICRP (2008): International Commission on Radiological Protection: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP-Publication 103, Ann. ICRP 37 Nos. 2-4 (2008)

JEN (2024a): Die Räumung des AVR-Behälterlagers in Jülich - Entsorgung der AVR-Brennelemente; Mitarbeitenden-Information JEN und FZJ, 29. Februar 2024

JEN (2024b): AVR-Brennelemente Fragen & Antworten, Stand 24. Juni 2024; https://www.jen-juelich.de/projekte/avr-brennelemente/fragen-antworten

JEN (2024c): Pressemitteilung: AVR-Brennelemente: Arbeitsschritte mit leerem AVR-Behälter werden erprobt; Update - 23. November 2023; https://www.jen-juelich.de/projekte/avr-brennelemente/pressemitteilung-avr-brennelemente-arbeitsschritte-mit-leerem-avr-behaelter-werden-erprobt

KIT (2013): Karlsruhe Institute of Technology (KIT): Radionuclide Source Term for Irradiated Fuel from Prototype, Research and Education Reactors, for Waste Forms with Negligible Heat Generation and for Uranium Tails; KIT Scientific Reports 7635; Bernhard Kienzler, Marcus Altmaier, Christiane Bube, Volker Metz; Karlsruhe 2013. http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000032099.

LTNRW (2024a): Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage 3142 vom 5. Januar 2024 der Abgeordneten Nina Andrieshen SPD; Drucksache 18/7623; Strahlende Zukunft – Wie steht es um zukünftige Castortransporte durch NRW? LANDTAG NORDRHEIN-WESTFALEN; 18. Wahlperiode Drucksache 18/8008; 09.02.2024

LTNRW (2024b): Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage 3395 vom 28. Februar 2024 der Abgeordneten Nina Andrieshen SPD Drucksache 18/8269; Begrenzung der Castortransporte; LANDTAG NORDRHEIN-WESTFALEN; 18. Wahlperiode Drucksache 18/8647; 27.03.2024

LUNA (2001): R.E. Luna et al: Betrachtung zur Sabotage von Behältern für abgebrannte Brennelemente; WM.01 Conference, 25. Februar–1. März 2001; Tuscon, AZ.

MINRW (2024): Schriftlicher Bericht des Ministers des Innern für die Sitzung des Innenausschusses am 14.03.2024 zu dem Tagesordnungspunkt „Wie soll ein reibungsloser Abtransport von Brennelementen des Forschungsreaktors Jülich sichergestellt werden?" Antrag der Fraktion der SPD vom 01.03.2024; Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen: 12. März 2024

MOPO (2024a): Angriff auf Israel: Was sind Kamikaze-Drohnen und wieso sind sie so heimtückisch Berliner Morgenpost? 14.04.2024, https://www.morgenpost.de/politik/article242091732/Was-sind-Kamikaze-Drohnen-und-wie-toedlich-sind-sie.html

NZZ (2024): Billig, klein, tödlich: Kamikaze-Drohnen machen den Soldaten in der Ukraine das Leben zur Hölle; Neue Züricher Zeitung, Andreas Rüesch 20.04.2024, https://www.nzz.ch/international/ukraine-krieg-kamikaze-drohnen-machen-das-soldatenleben-zur-hoelle-ld.1825600

OVG (2013): Schleswig-Holstein Oberverwaltungsgericht; Urteil 4 KS 3/08, verkündet am 19. Juni 2013

SSK (2010): Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen (Maßnahmenkatalog); Strahlenschutzkommission (SSK)Heft 60, 2010

SSK (2014): Radiologische Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei Ereignissen mit Freisetzungen von Radionukliden, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Verabschiedet in der 268. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 13./14. Februar 2014

UBA (2002): Grenzüberschreitende UVP gemäß Art. 7 UVP-RL zum Standortzwischenlager Grafenrheinfeld**;** Bericht an das Österreichische Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft sowie an die Landesregierungen von Oberösterreich und Vorarlberg Federal Environment Agency – Austria Wien, Februar 2002