

Mögliche Auswirkungen von Terrorangriffen auf Zwischenlager für hochradioaktiven Abfall

**am Beispiel der Zwischenlager
in Ahaus und Brokdorf**

Dipl.-Phys. Oda Becker und Prof. Dr. Jutta Weber¹ (Kapitel 2.5)

Erstellt im Auftrag von .ausgestrahlt

Dezember 2024

¹ Universität Paderborn, Leiterin des Projektes: Schwarmtechnologien. Kontrolle und Autonomie in komplexen Waffensystemen im BMBF-Kompetenznetzwerk MEHUCO (<https://meaningfulhumancontrol.de/>)

Zusammenfassung

In Deutschland gibt es insgesamt 16 Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle: 12 dezentrale Zwischenlager an den Standorten der endgültig abgeschalteten Atomkraftwerke, drei zentrale Zwischenlager und das Zwischenlager Jülich. Die Genehmigungen der Zwischenlager sind auf 40 Jahre befristet und enden zwischen 2034 und 2046.

Nach aktueller Schätzung der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) wird das Standortauswahlverfahren für ein Endlager zwischen 2046 und 2068 beendet sein. Laut einer aktuellen Studie im Auftrag des Bundesamtes für die Sicherheit der kerntechnischen Entsorgung (BASE) könnte ein Standort möglicherweise sogar erst 2074 feststehen. An die Suche nach einem Standort wird sich eine mindestens 50-jährige Bau- und Betriebsphase anschließen, bis die Einlagerung in das Endlager abgeschlossen ist. Somit ist eine erhebliche Verlängerung der Zwischenlagerung erforderlich.

Für die Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle werden in Deutschland Transport- und Lagerbehälter des Herstellers GNS (Castorbehälter) verwendet. Der sichere Einschluss der radioaktiven Stoffe während der Lagerung soll durch ein Doppeldeckel-Dichtsystem mit verpressten Metalledichtungen gewährleistet werden, die in der langen Lagerzeit altern werden. Insgesamt ist es möglich, dass alterungsbedingte Effekte bei einem Angriff zu höheren Freisetzungen von radioaktiven Stoffen führen, da Alterungsschäden bei den Zwischenlagergebäuden, bei den Komponenten der Behälter und beim Inventar der Behälter zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausgeschlossen werden können. Zudem werden die gelagerten Abfälle für einen langen Zeitraum den wachsenden Gefahren durch Terrorangriffe ausgesetzt.

Die Aufbewahrung der Transport- und Lagerbehälter erfolgt in Deutschland in Zwischenlagergebäuden aus Stahlbeton. In den norddeutschen Zwischenlagern, die nach dem STEAG-Konzept (Wandstärke: 120 cm, Deckenstärke: 130 cm) gebaut sind, soll das Lagergebäude zumindest einen gewissen Schutz vor externen Einwirkungen (wie einem Flugzeugabsturz) gewährleisten. In den süddeutschen, nach dem WTI-Konzept errichteten Zwischenlagern (Wandstärke: ca. 85 cm, Deckenstärke: ca. 55 cm) sowie in den zentralen Zwischenlagern (Wand- und Deckenstärke ca. 50 cm) sollten im Wesentlichen nur die Behälter selbst den Schutz gewährleisten.

Unter Leitung des Bundesumweltministeriums wurde sich 2010 auf ein gemeinsames generisches Sicherungskonzept zur Nachrüstung der Zwischenlager verständigt. Die Lagerhallen werden entlang einiger Wände durch zusätzliche Wände aus Stahlbeton mit einer Wandstärke von 85 cm und einer Höhe von 10 m geschützt. Des Weiteren wurde durch eine vorgebaute Vereinzelungsanlage der Zugang der Hallen verändert, so dass ein Eindringen von Unbefugten erschwert wird. Ob damit allerdings jeglicher unbefugte Zugang in die Halle verhindert werden kann, ist nicht belegt. Diese Nachrüstungen an den bestehenden Zwischenlagern können die Gefährdung durch einen Terroranschlag nur geringfügig verringern. In den jeweiligen Antragsverfahren wurde nicht die Wirksamkeit dieser „Härtungsmaßnahmen“ nachgewiesen, sondern lediglich, dass von dieser Maßnahme keine negative Rückwirkung auf die Lagerung ausgeht. Da die Hallen bereits gebaut sind, ist durch Nachrüstungen nur eine bedingte Verbesserung der Situation möglich. Aufgrund der zu erwartenden langen Lagerzeiträume sollte eine deutliche Verbesserung des Schutzes der zwischengelagerten abgebrannten Brennelemente und hochradioaktiven Abfälle gegen Terrorangriffe erfolgen.

Im Rahmen der Genehmigungsverfahren für alle deutschen Zwischenlager wurden mögliche Auswirkungen eines potenziellen Hohlladungsbeschusses betrachtet. Dieser gilt als abdeckendes SEWD-Szenario, d. h. als Szenario mit den größten Auswirkungen. Dabei wurde unterstellt, dass eine Gruppe von Tätern in das Zwischenlager eindringt und **mit einem Hohlladungsgeschoss aus einer panzerbrechenden Waffe** die Behälter beschießt. Seit einer Entscheidung des

Bundesverwaltungsgerichts zur Genehmigung des Zwischenlagers Brunsbüttel von 2008 ist höchststrichterlich entschieden, dass auch gegen einen **gezielten Absturz eines Verkehrsflugzeuges** Vorsorgemaßnahmen verlangt werden.

Ein gezielter Flugzeugabsturz und der Beschuss mit einem Hohlladungsgeschoss, die heute bereits Bestandteil der Genehmigungsverfahren für Zwischenlager sind, sind jedoch nicht die einzigen denkbaren Angriffsszenarien. Der Einsatz sprengstoffbeladener **Kamikaze-Drohnen** ist Teil heutiger Kriegsrealität und könnte auch für einen Angriff auf Atomanlagen genutzt werden. In dieser Stellungnahme wurde daher auftragsgemäß ein Szenario untersucht, in dem mehrere Drohnen die gelagerten Behälter angreifen. Aufgrund der Fähigkeiten von Kamikaze-Drohnen und des rasanten Anstiegs der erzeugten Stückzahl kann ein solches Szenario nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Der Einsatz von Drohnen in militärischen Konflikten hat in den letzten Jahren rasant zugenommen und wird in den kommenden Jahren weiter zunehmen. Drohnen gelten im Ukrainekrieg bereits als „Gamechanger“. Terroristische Gruppen setzen schon seit Jahren Drohnen zur Durchführung und Koordinierung von Anschlägen ein. Laut der Einschätzung von Expert*innen werden Drohnen aufgrund der massiven Zunahme der Anzahl und der Fähigkeiten sowie wegen des leichten Zugangs, der einfachen Bedienung und der niedrigen Kosten die Waffe der Wahl für zukünftige Terroristen sein.

Mögliche Folgen eines Angriffs auf das Zwischenlager Brokdorf

Das Brennelemente-Zwischenlager Brokdorf befindet sich auf dem Gelände des endgültig abgeschalteten AKW Brokdorf nahe Glückstadt an der Elbe. Das Zwischenlager wurde am 5. März 2007 mit der Einlagerung des ersten Behälters in Betrieb genommen. Wenn alle Behälter eingelagert sind, werden dort rund 84 Behälter stehen. In Brokdorf wurden bisher ausschließlich Behälter des Typs CASTOR V/19 eingelagert. Die Einlagerung von Wiederaufbereitungsabfällen in Behältern des Typs CASTOR HAW28M ist für 2026 geplant. Auftragsgemäß werden im Folgenden nur die bereits eingelagerten Behälter des Typs CASTOR V/19 berücksichtigt.

Szenario 1: Absturz eines Verkehrsflugzeuges

In das **Zwischenlager Brokdorf** würden nach dem **Absturz eines Verkehrsflugzeuges** durch eine teilweise Zerstörung der Gebäudestruktur mit starken Rissbildungen an Wänden und Dach große Mengen Kerosin in den Lagerbereich eindringen. Dadurch wäre ein Kerosinbrand möglich, der eine deutlich höhere thermische Belastung der Behälter verursachen könnte als jene, der ein Behälter laut IAEA-Richtlinien (Brand bei 800 °C für 30 Minuten) standhalten muss. Nach Absturz eines Verkehrsflugzeuges wäre ein mehrstündiger Brand mit einer Flammentemperatur von 1.000 °C zu erwarten. Für die Ermittlung der Folgen wurde angenommen, dass ca. 50 % der max. Treibstoffmenge eines Verkehrsflugzeuges in das Zwischenlagers eindringt und innerhalb von drei Stunden verbrennt. Dabei würde die Hälfte der Dichtungen der auf der Brandfläche befindlichen Behälter versagen. Die freigesetzte Cs-137-Aktivität läge bei $2 \cdot 10^{14}$ Bq.

Als Folge des gezielten Absturzes eines Verkehrsflugzeuges auf das Zwischenlager Brokdorf wären in Windrichtung eine sofortige Evakuierung bis in eine Entfernung von rund 500 m und eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung bis in eine Entfernung von 2.000 m erforderlich.

Szenario 2: Hohlladungsbeschuss eines Castorbehälters

Bei einem **Hohlladungsbeschuss eines im Zwischenlager Brokdorf gelagerten Behälters** würde die Behälterwand durchdrungen und im Inneren des Behälters ein Teil der Brennelemente zerstäubt; dadurch entstünden feine radioaktive Partikel. Ein Teil dieser Partikel würde aus dem Behälter und dem Zwischenlager freigesetzt und würde sich in der Atmosphäre ausbreiten. Da ein Teil der

freigesetzten Partikel lungengängig ist, würden sie bei Menschen durch Inhalation zu einer erheblichen Strahlenbelastung führen. Weiterhin würden die abgelagerten Radionuklide zu Strahlenbelastungen aus Bodenstrahlung führen.

In Windrichtung wären beim Hohlladungsbeschuss eines Castorbehälters im Zwischenlager Brokdorf folgende Konsequenzen möglich: Eine Evakuierung würde bis in eine Entfernung von rund 4 km erforderlich, eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung bis in eine Entfernung von fast 2 km. Noch in 800 m Entfernung zum Zwischenlager träten Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten, mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen hätten. Bis in 500 m träten effektive Dosen von mehr als 4.000 mSv auf. Diese Dosiswerte sind einer 50%igen Sterbewahrscheinlichkeit zugeordnet.

Szenario 3: Angriff mit mehreren Drohnen

Für diese Stellungnahme wurde außerdem auftragsgemäß ein Szenario untersucht, in dem **das Zwischenlager Brokdorf mit mehreren Drohnen** angegriffen wird, die mit Sprengstoffen und Brandbeschleuniger beladen sind, um eine erhebliche Freisetzung zu verursachen. Es geht über den Umfang dieser Stellungnahme hinaus, ein genaues Szenario für einen Angriff zu entwickeln, zumal keine Anleitung für einen derartigen Angriff bereitgestellt werden soll. Die verhältnismäßig dicken Mauern des Zwischenlagers Brokdorf würden eine erhebliche Menge an Sprengstoff erfordern, um ein Loch zu erzeugen. Durch dieses vermutlich relativ kleine Loch würden dann Drohnen von außen auf die gelagerten Behälter schießen. Eventuell würde auch eine oder mehrere Drohnen in das Gebäude fliegen.

Zur Ermittlung der Folgen wird angenommen, dass nur ein Behälter so getroffen wird, dass eine erhebliche Freisetzung von radioaktiven Stoffen resultiert. Allerdings wird unterstellt, dass der Behälter zweifach getroffen wird. Zusätzlich wird unterstellt, dass die aus Zircaloy bestehenden Hüllrohre der Brennelemente teilweise in Brand geraten. Insgesamt wird abgeschätzt, dass die dreifache Menge gegenüber einem einfachen Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe freigesetzt wird.

In Windrichtung wurden für einen Drohnenangriff auf das Zwischenlager Brokdorf folgende Auswirkungen ermittelt: Eine Evakuierung würde bis in eine Entfernung von fast 12 km und eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung bis in eine Entfernung von etwa 7 km erforderlich. Noch in 8 km Entfernung zum Zwischenlager träten Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten, mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen hätten. Bis in 800 m träten effektive Dosen auf, die mit mehr als 7 Sv tödlich sein könnten.

Mögliche Folgen eines Angriffs auf das Zwischenlager Ahaus

Das Brennelemente-Zwischenlager Ahaus (BZA) ist seit 1992 in Betrieb und befindet sich auf dem Gebiet der Stadt Ahaus (westliches Münsterland), etwa 3 Kilometer östlich des Stadtzentrums. Die Lagerhalle ist unterteilt in zwei Lagerbereiche. Der Lagerbereich II dient der Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen.

Im BZA sind bisher vier Behältertypen eingelagert: drei CASTOR V/19, drei CASTOR V/52, 18 CASTOR MTR 2 aus dem Forschungsreaktor Dresden-Rossendorf (RFR) und 305 CASTOR THTR/AVR mit graphithaltigen Brennelementen des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR). Zusätzlich sollen 152 CASTOR THTR/AVR mit Brennelementen aus dem Zwischenlager Jülich in das BZA transportiert werden. Weiterhin sollen weitere Brennelemente aus den Forschungsreaktoren München (atomwaffenfähige Brennelemente), Berlin und Mainz eingelagert werden. Dabei ist es

sicherheitstechnisch wenig vorausschauend, weiter in das schlecht geschützte Zwischenlager in Ahaus zu transportieren, dessen Betriebsgenehmigung zudem bereits am 31. Dezember 2036 endet.

Szenario 1: Gezielter Absturz eines Verkehrsflugzeugs

In der Folge eines **gezielten Absturzes eines Verkehrsflugzeugs auf das Zwischenlager Ahaus** wäre eine erheblich stärkere Zerstörung des Gebäudes und damit auch größere mechanische und thermische Einwirkungen auf die Behälter zu erwarten als bei einem derartigen Absturz auf das Zwischenlager Brokdorf. Ursache ist die weniger robuste Bauweise des Lagers. Es ist nicht auszuschließen, dass negative Alterungseffekte zu der Zerstörung des Gebäudes beitragen würden.

Als Folge des Absturzes würde ein Brand von großem Ausmaß entstehen, weil durch die großflächige Zerstörung eine große Menge an Kerosin in das Lager eindringen könnte. Das Kerosin könnte sich, begrenzt durch Trümmer, Behälter und Flugzeugteile, in einem Teil des Lagerbereiches sammeln. Ein Umkippen bzw. Abstürzen der doppelt gestapelten Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR und ein Zusammenschieben von Behältern ist wahrscheinlich. Trotz der nachgerüsteten Einrichtungen zum Ableiten von Kerosin im Lagerbereich kann ein langer Brand nicht ausgeschlossen werden. Es wird abgeschätzt, dass die Dichtungen bei ca. einem Drittel der Behälter (150) versagen würden.

Unregelmäßigkeiten während des Betriebs des AVR-Reaktors haben dazu geführt, dass sehr große Mengen an Cäsium aus den versiegelten Brennstoffpartikeln ausgetreten sind und bei Hitze leicht abgelöst werden können. Die bereits eingelagerten 305 Behälter aus dem Betrieb des THTR sind teilweise mit beschädigten Brennelementen befüllt. Hier wird davon ausgegangen, dass sich bei 20 % der Behälter freisetzbare Cäsium in der Behälteratmosphäre befindet. Als Folge des Flugzeugabsturzes errechnet sich so eine Cs-137-Freisetzung von $30 \cdot 10^{12}$ Bq. Da die Inbrandsetzung des Inventars als sehr unwahrscheinlich aber nicht ausgeschlossen bewertet wird, wird zusätzlich das Inbrandsetzen des Inventars von einem der 457 CASTOR THTR/AVR Behälter unterstellt.

Bei einem gezielten Absturz eines Verkehrsflugzeuges auf das Zwischenlager Ahaus wäre in Windrichtung mit folgenden Konsequenzen zu rechnen: Eine Evakuierung wäre bis in eine Entfernung von ca. 2 km und eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung bis in eine Entfernung von 1 km erforderlich. Bis in 500 m Entfernung zum Zwischenlager treten Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten, mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen hätten. Bis in 300 m Entfernung zum Zwischenlager könnten diese tödlich sein.

Szenario 2: Beschuss mit panzerbrechender Waffe

Auch die möglichen radiologischen Auswirkungen eines Beschusses mit einem Hohlladungsgeschoss aus einer panzerbrechenden Waffe auf einen im BZA gelagerten Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR wurden abgeschätzt.

Danach wäre nach einem Beschuss eines Behälters im Zwischenlager Ahaus mit einem Hohlladungsgeschoss in Windrichtung bis in eine Entfernung von rund 160 m eine Evakuierung und bis in einer Entfernung von rund 90 m eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung erforderlich. In 50 m Entfernung zum Zwischenlager träten Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten, mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen hätten.

Szenario 3: Angriff mit bewaffneten Drohnen

In dieser Stellungnahme wurde auftragsgemäß ein Szenario untersucht, in welchem mit mehreren **Drohnen die im Zwischenlager Ahaus** gelagerten Behälter angegriffen werden. Für ein derartiges Szenario müsste zunächst ein Loch in die Außenmauer des Zwischenlagers gesprengt werden. Es ist mit Drohnen, die eine bestimmte Menge Sprengstoff geladen haben, einfach möglich, ein Loch in die

verhältnismäßig dünne Mauer des Zwischenlagers zu sprengen, durch welches dann weitere Drohnen in das Gebäude gelangen oder von außen die Behälter beschießen könnten.

Zur Ermittlung der Folgen wird davon ausgegangen, dass insgesamt drei Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR von einem derartigen Angriff so getroffen sind, dass eine erhebliche Freisetzung resultiert. Aufbauend auf einer bisherigen Studie wird hier plausibel angenommen, dass aus einem Behälter etwa 20 % des Inventars freigesetzt wird.

Die ermittelten Strahlendosen zeigen, dass bei einem Angriff mit bewaffneten Drohnen in Windrichtung eine Evakuierung bis in ca. 5 km Entfernung und eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung bis ca. 1,5 km Entfernung erforderlich würden. Bis in eine Entfernung von rund 250 m wären tödliche Inhalationsdosen möglich. Diese erhielten die Personen in Windrichtung unmittelbar nach der Freisetzung.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die zu erwartenden Strahlenbelastungen infolge eines Flugzeugabsturzes, eines Hohlladungsbeschusses oder eines Drohnenangriffs für Menschen gesundheitsschädlich und bis in eine bestimmte Entfernung sogar lebensbedrohlich wären. Es ist bei der Bewertung der potenziellen radiologischen Auswirkungen dieser Szenarien zu beachten, dass Personen durch eine Evakuierung nicht vor Strahlenbelastungen bewahrt werden können, da sie die Inhalationsdosis unmittelbar nach dem potenziellen Terroranschlag erhalten würden, also vor einer Evakuierung.

Landwirtschaftliche Interventionsmaßnahmen (z. B. vorgezogene Ernte) aufgrund hoher Cs-137-Bodenkontaminationen müssten für alle betrachteten Szenarien für Gebiete in Windrichtung bis mindestens 20 km ausgelöst werden, bei einem Angriff mit Drohnen sogar in weit größeren Entfernungen.

Ergänzend wurde untersucht, ob die potentiellen Auswirkungen mit dem **Abklingen der Kernbrennstoffe** deutlich abnehmen.

Nach einer Abklingzeit der Inventare in den Behältern von weiteren 30 Jahren sind die zu erwartenden Strahlenbelastungen nach einem Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe und einem Angriff mit Drohnen nur um rund 20 % (Zwischenlager Ahaus) bzw. um etwa 40 % (Zwischenlager Brokdorf) geringer. Die Auswirkungen nach einem Flugzeugabsturz und auch die Cs-137-Bodenkontaminationen sind bei gleichen Freisetzungsmengen nach weiteren 30 Jahren noch etwa halb so hoch.

Durch eine Alterung der Gebäude, Behälterkomponenten und Inventare können höhere Freisetzungen jedoch nicht ausgeschlossen werden, so dass gleich hohe oder gar höhere Auswirkungen durch die gleichen Angriffsszenarien nach weiteren 30 Jahren nicht ausgeschlossen sind.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
1 Einleitung	8
1.1 Zwischenlagerung in Deutschland - Lagerorte und Mengen.....	8
1.2 Verlängerung der bisher genehmigten Lagerdauer	8
1.3 Gebäude für die verlängerte Zwischenlagerung.....	9
1.4 Behälter für die verlängerte Zwischenlagerung.....	11
1.5 Inventar bei verlängerter Zwischenlagerung.....	15
2 (Unzureichender) Schutz gegen Terrorangriffe	17
2.1 Aufhebung der Genehmigung für das SZL Brunsbüttel	18
2.2 Beschuss mit panzerbrechender Waffe.....	20
2.3 Gezielter Absturz eines Verkehrsflugzeuges	24
2.4 Bedrohungssituation durch Krieg gegen die Ukraine.....	24
2.5 Terroristischer Drohnenangriff	25
3 Das Zwischenlager Brokdorf.....	30
3.1 Zwischenlagergebäude Brokdorf.....	30
3.2 Behälter und Inventar des Zwischenlager Brokdorfs.....	31
3.3 Auswirkung eines gezielten Flugzeugabsturzes	33
3.4 Auswirkung eines Beschusses mit panzerbrechender Waffe.....	38
3.5 Auswirkung eines Angriffs mit Drohnen	41
3.6 Potenzielle Auswirkungen nach 30 Jahren.....	43
4 Brennelemente-Zwischenlager Ahaus (BZA).....	44
4.1 Zwischenlagergebäude Ahaus	45
4.2 Behälter und Inventar im BZA.....	46
4.3 Auswirkung eines gezielten Flugzeugabsturzes.....	52
4.4 Auswirkung eines Beschusses mit panzerbrechender Waffe.....	55
4.5 Auswirkung eines Angriffs mit Drohnen	58
4.6 Potenzielle Auswirkungen nach 30 Jahren.....	60
5 Literatur.....	60

1 Einleitung

In dieser Stellungnahme soll diskutiert werden, welche Auswirkungen aus Freisetzungen von radioaktiven Stoffen nach einem Terrorangriff auf ein Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle resultieren könnten. Dabei wird auch betrachtet, welche neuen Risiken sich durch die Weiterentwicklung militärischer und terroristischer Angriffsstrategien und Waffen, z. B. eingesetzt im Ukraine-Krieg, für die deutschen Zwischenlager ergeben.

Die Auswirkungen möglicher Angriffe werden in dieser Stellungnahme exemplarisch an den beiden Zwischenlagern Brokdorf und Ahaus dargestellt. Es werden drei unterschiedliche Angriffsszenarien gewählt: ein Beschuss mit panzerbrechenden Waffen, ein gezielter Flugzeugabsturz und ein Angriff mit mehreren Drohnen.

Zunächst werden in Kapitel 1 einführend einige allgemeine Informationen zu den Zwischenlagern in Deutschland zusammenfassend dargestellt. In Kapitel 2 werden dann mögliche Terrorangriffe diskutiert. In Kapitel 3 und 4 werden die potenziellen Auswirkungen eines Terrorangriffs für die Zwischenlager Brokdorf und Ahaus ermittelt und bewertet.

1.1 Zwischenlagerung in Deutschland - Lagerorte und Mengen

Das Konzept der Bundesrepublik Deutschland sieht vor, die abgebrannten Brennelemente an den Standorten der Atomkraftwerke zwischenzulagern, bis sie konditioniert und endgelagert werden. So sollen Brennelementtransporte vermieden werden. Es gibt 12 dezentrale Standortzwischenlager (SZL) an den Standorten der endgültig abgeschalteten Atomkraftwerke (AKW). Des Weiteren gibt es drei zentrale Zwischenlager und das Zwischenlager Jülich.

Die dezentralen Lager sind das Brennelemente-Zwischenlager Ahaus (BZA) (genehmigt 1997), das Brennelemente-Zwischenlager Gorleben (BZG) (genehmigt 1995) und das Zwischenlager Nord. Das BZA ist seit 1992 in Betrieb, bisher sind 68 der 420 Stellplätze belegt. Weitere Einlagerungen sind geplant. Im BZG sind 113 der 420 Stellplätze mit Behältern belegt. Weitere Einlagerungen sind dort nicht geplant. Im Zwischenlager Nord werden 74 Behälter (80 Stellplätze) aufbewahrt. Das derzeitige Lager kann aber die bestehenden Anforderungen zur Sicherung nicht erfüllen und wird daher neu errichtet.

Seit 1993 existiert das Zwischenlager Jülich für die Aufbewahrung der bestrahlten kugelförmigen Brennelemente des stillgelegten AVR-Versuchsreaktors. Dort lagern 152 Transport- und Lagerbehälter des Typs CASTOR THTR/AVR. Betreiber ist die Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH (JEN). Seit dem 30. Juni 2013 fehlt dem Zwischenlager die Genehmigung. Die JEN will die Behälter schon bald in das BZA transportieren.

Die abgebrannten Brennelemente aus den deutschen Versuchs- und Demonstrationsreaktoren² lagern zurzeit im BZA (305 Behälter), im Zwischenlager Jülich (152) und im Zwischenlager Nord (4). Die aus Forschungsreaktoren stammenden bestrahlten Brennelemente lagern in 18 Behältern im BZA und an den Forschungsreaktoren in Berlin, München und Mainz. Letztere sollen ebenfalls in das BZA gebracht werden.

² Versuchs- und Demonstrationsreaktoren (inzwischen alle in Stilllegung oder bereits abgebaut): AVR (Jülich), HDR (Großwelzheim), VAK (Kahl), KKN (Niederaichbach), KNK II (Karlsruhe), MZFR (Karlsruhe), THTR-300 (Hamm), Nuklearschiff Otto Hahn (Geesthacht)

1.2 Verlängerung der bisher genehmigten Lagerdauer

Die Genehmigungen zur Aufbewahrung der abgebrannten Brennelemente und der hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in den Zwischenlagern sind auf 40 Jahre befristet. Die Genehmigungen der Behälter sind ebenfalls auf 40 Jahre befristet. Sowohl eine Verlängerung der geltenden Genehmigungen der Zwischenlager als auch eine Verlängerung der Aufbewahrungszeit der Kernbrennstoffe in den einzelnen Behältern bedürfen eines Genehmigungsverfahrens, in dem alle Nachweise neu geprüft und bewertet werden.

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) als Vorhabenträger hat im September 2017 mit dem Standortauswahlverfahren für ein Endlager begonnen. Derzeit (Oktober 2024) läuft Schritt 2 der ersten von drei Phasen des Standortauswahlverfahrens. Ziel dieses Schrittes ist die Ermittlung von Standortregionen für die obertägige Erkundung. Im jetzigen Zeitplan sollen die Standortregionen bis 2027 bestimmt werden. Die BGE stellte Ende 2022 erstmals einen Zeitplan für das Standortauswahlverfahren auf. Demnach kann nicht 2031 (wie laut Gesetz angestrebt), sondern erst 2046 bis 2068 die Entscheidung für einen Standort getroffen werden. In einer aktuellen Studie im Auftrag der BASE wurde vom Öko-Institut Darmstadt ermittelt, dass die Standortbestimmung möglicherweise erst 2074 abgeschlossen werden kann.³

Im April 2023 veröffentlichte die Entsorgungskommission (ESK) ein Positionspapier „Verlängerte Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger hoch-radioaktiver Abfälle in Abhängigkeit von der Auswahl des Endlagerstandorts“. Die Anhörung der Verfahrensbeteiligten⁴ hat laut ESK ergeben, dass ein spezifisches Regelwerk für die verlängerte Zwischenlagerung als sinnvoll angesehen wird. Dieses sollte alle Anforderungen zum Nachweis der Sicherheit über den gesamten Zwischenlagerzeitraum regeln. **Aus Sicht der ESK ist zunächst die zu berücksichtigende Zwischenlagerdauer festzulegen, da diese Einfluss auf die erforderliche Nachweisführung hat.** (ESK 2023)

Die ESK schätzte in ihrem Positionspapier eine Errichtungsdauer von ca. 20 Jahren und einer Betriebsdauer von 30 Jahren für das zu errichtende Endlager ab (ESK 2023). Die zwischen 2034 und 2046 auslaufenden Zwischenlagergenehmigungen müssten bis 2124, d. h. teilweise um etwa **90 Jahre verlängert** werden. Somit wären **Zwischenlagerzeiten von mehr als 120 Jahren** erforderlich, eventuell sogar darüber hinaus, falls es auch bei der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers Verzögerungen gegenüber den derzeitigen Annahmen geben sollte. **Dies bedeutet, dass sich die ursprünglich geplante Zwischenlagerdauer verdoppeln oder verdreifachen kann. Zum jetzigen Zeitpunkt können Alterungsschäden bei den Zwischenlagergebäuden, bei den Komponenten der Behälter und beim Inventar der Behälter nicht ausgeschlossen werden.**

Die Gesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ) ist als Genehmigungsinhaberin der Zwischenlager verpflichtet, die entsprechenden Anträge für Neugenehmigungen zu stellen. Die BGZ hat in den letzten Jahren eine Fachabteilung aufgebaut und ein Forschungsprogramm zur verlängerten Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle erarbeitet. Es wurde bereits einmal aktualisiert (BGZ 2023). Die BGZ hat mit ihrem Forschungsprogramm den erforderlichen ersten Schritt unternommen, um die notwendige Forschung zu initiieren. Das Programm ist jedoch nicht ausreichend, weder im Umfang noch in der Zielsetzung.

³ <https://www.oeko.de/blog/gemeinsame-vision-damit-die-endlagersuche-gelingt/>

⁴ Betreiber BGZ und EWN, Behälterhersteller GNS, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM); BASE, Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE)

1.3 Gebäude für die verlängerte Zwischenlagerung

Die Aufbewahrung der Transport- und Lagerbehälter erfolgt in Deutschland in Zwischenlagergebäuden aus Stahlbeton. Die primären Schutzziele (Kritikalitätssicherheit, Abschirmung, dichter Einschluss und Wärmeabfuhr) sollen von den Transport- und Lagerbehältern übernommen werden. Die Lagergebäude sollen folgende Schutzfunktionen erfüllen:

- Schutz der Transport- und Lagerbehälter vor Umwelteinflüssen,
- zusätzliche Abschirmung der ionisierenden Strahlung,
- Sicherstellung der Wärmeabfuhr von den Behältern an die Umgebung und
- Schadensvorsorge gegen Störfälle und auslegungsüberschreitende Ereignisse.

Neben der Gewährleistung der Sicherheit trägt das Lagergebäude zur Sicherung bei: So soll das Zwischenlagergebäude auch Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) bieten.

Bei Zwischenlagergebäuden handelt es sich im Wesentlichen um Lagerhallen, die aufgrund der radiologischen Anforderungen und der Auslegung gegen Einwirkungen von außen gegenüber konventionellen Bauten erhöhte Waddicken aufweisen. Hinsichtlich ihrer Bauweise lassen sich die Standortzwischenlager nach dem **WTI-Konzept** und dem **STEAG-Konzept** unterscheiden.⁵ Das WTI-Konzept ist ähnlich wie das Konzept der zentralen Zwischenlager Ahaus und Gorleben.

In den norddeutschen Zwischenlagern⁶, die nach dem STEAG-Konzept (Stärke der Wand: ca. 120 cm, Stärke der Decke: 130 cm) gebaut sind, gewährleistet das Lagergebäude zumindest einen gewissen Schutz vor Einwirkungen von außen. In den süddeutschen Zwischenlagern⁷, die nach dem WTI-Konzept (Stärke der Wand: ca. 85 cm, Stärke der Decke: ca. 55 cm) errichtet sind, sowie in den zentralen Zwischenlagern (Wand- und Deckenstärke ca. 50 cm), gewährleisten im Wesentlichen die Behälter selbst den Schutz vor Einwirkungen von außen.

Im Falle von Stör- oder Unfällen in Zwischenlagern für abgebrannte Brennelemente und hochradioaktive Abfälle ist grundsätzlich eine Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre möglich. Unter dem Gesichtspunkt potenzieller unfallbedingter Auswirkungen ist eine trockene Zwischenlagerung in Behältern gegenüber der Nasslagerung zu bevorzugen, da zum einen die Anfälligkeit für Störfälle geringer ist und zum anderen die Freisetzungsmengen radioaktiver Stoffe im Falle eines Unfalls geringer wären (da im Allgemeinen nicht gleichzeitig eine große Menge von Brennelementen vom Unfall betroffen wäre). Das gilt zumindest dann, wenn der Schutz des Gebäudes und/oder der Behälter ausreichend ist.

Obertägige Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle werden weltweit an über 150 Standorten betrieben. Die Aufbewahrung in Zwischenlagern ist auch auf internationaler Ebene grundsätzlich mit der Intention verbunden, die Abfälle zu einem späteren, aber möglichst frühen Zeitpunkt in ein in einigen hundert Metern Tiefe befindliches Endlager zu bringen. In den meisten Ländern wurde ein Zwischenlagerungszeitraum von weniger als 50 Jahren angesetzt. Für die langfristige Zwischenlagerung ist es wichtig, Überlegungen zur benötigten technischen Redundanz der Anlagen, z. B. bei schadhafte Behältern oder Hüllrohren anzustellen. Technische Konzepte könnten in diesem Fall beispielsweise eine vorherige Kapselung der Brennelemente, eine Heiße Zelle oder ggf. eine vollständig ausgerüstete Konditionierungsanlage sein. (ENTRIA 2019)

⁵ Eine bautechnische Ausnahme bildet das Zwischenlager in Neckarwestheim, das aufgrund seiner Lage in einem ehemaligen Steinbruch als Tunnellager ausgeführt ist.

⁶ Brunsbüttel, Krümmel, Unterweser, Lingen, Grohnde, Brokdorf

⁷ Gundremmingen, Grafenrheinfeld, Philippsburg, Isar, Biblis

Laut BGZ sind für das Zwischenlagergebäude keine spezifischen Forschungsaktivitäten erforderlich, da keine vom konventionellen Hochbau abweichenden Alterungsmechanismen zu berücksichtigen sind. Durch die Dimensionierung der Zu- und Abluftöffnungen in den Zwischenlagergebäuden sei sichergestellt, dass die von den Behältern abgegebene Wärmemenge in ausreichendem Maße an die Umgebung abgeführt wird. Es sei ausgeschlossen, dass die resultierenden maximalen Bauwerkstemperaturen zu einer beschleunigten Alterung beziehungsweise Schwächung des Tragwerks führen. Durch die Abschirmwirkung der Behälter sei außerdem die vom Inventar ausgehende ionisierende Strahlung so weit abgeschwächt, dass die in den Gebäudestrukturen applizierten Energiedosen hinsichtlich ihrer schädigenden Wirkung vernachlässigt werden könnten. (BGZ 2023)

In ihrem aktualisierten Forschungsprogramm ist die BGZ zwar immer noch der Auffassung, dass keine speziellen alterungsbedingten Schäden am Bauwerk auftreten, es wurde aber dennoch ein Forschungsprojekt aufgelegt: Zustandserfassung und Monitoring für die Bewertung der technischen Nutzungsdauer baulicher Anlagen von Zwischenlagern für hochradioaktive Abfälle (ZuMoBau-ZL). Das Verbundprojekt, koordiniert vom iBMB der TU Braunschweig, zielt auf die Entwicklung von Konzepten zur Lebensdauerprognose unter Nutzung von geeigneten Maßnahmen und Messtechniken im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung ab. Im Rahmen des Projekts sollen diese Erkenntnisse in Verbindung mit den zusätzlichen Anforderungen, die an ein Zwischenlager gestellt werden, zusammengetragen werden, um eine realistische Übersicht über die Alterungsprozesse und Einwirkungen auf ein Zwischenlager unter Berücksichtigung realer Betriebserfahrung zu geben. (BGZ 2023)

Im Projekt ENTRIA⁸ wurden erweiterte Anforderungen und mögliche technische Realisierungsvarianten entwickelt, um eine sichere Zwischenlagerung in Zwischenlagergebäuden über planmäßig lange Zeiträume zu gewährleisten. Laut ENTRIA (2019) dienen die erweiterten Anforderungen als Ansatzpunkte zur Konzipierung neuer Anlagen, können aber in Teilen auch auf bestehende Lagerkonzepte übertragen werden.

Für die Standfestigkeit der Gebäude im Falle eines Flugzeugabsturzes ist die steigende Gefahr durch Alterungseffekte zu beachten: Eine Studie untersucht mit numerischen Simulationen den Einfluss der Alterung auf die Auswirkungen eines Einschlags eines Militärflugzeugs auf ein AKW. Die Ergebnisse zeigen, dass die Alterung einer Anlage die Anfälligkeit für großflächige oder lokalisierte Penetrationen erhöht. Je größer die Degradation der Materialien ist, desto geringer ist das Restwiderstandsvermögen und desto größer das Risiko einer Wandperforation. Bei der gleichen Stoßkraft wird die Festigkeit des gealterten Gebäudes (nach der vorher festgelegten Auslegungszeit) um bis ca. 30 % reduziert. (FRANO 2021) Diese Untersuchung zu Atomkraftwerken ist auch auf ein Zwischenlager zu übertragen.

1.4 Behälter für die verlängerte Zwischenlagerung

Für die trockene Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle werden in Deutschland Transport- und Lagerbehälter (TLB) verwendet. Der von der GNS entwickelte Behältertyp CASTOR® macht mehr als 90 Prozent der bei der BGZ eingelagerten Transport- und Lagerbehälter aus, der verbleibende Anteil entfällt auf Behälter vom Typ TN® der Firma Orano NPS.

Die Castorbehälter werden andererseits auch fast nur in Deutschland eingesetzt. Insofern ist nationale Forschung besonders wichtig. Bis zum 30. Juni 2024 sind in Deutschland 1.435 Castorbehälter

⁸ ENTRIA („Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen“) war eine interdisziplinäre Forschungsplattform, im Rahmen derer von 2013 bis 2017 Universitätsinstitute und Großforschungseinrichtungen die Entsorgungsproblematik untersuchten.

beladen und eingelagert worden. Nur 267 Castorbehälter wurden außerhalb Deutschlands verwendet. (GNS 2024b)

Die Castorbehälter zeichnen sich durch einen metallischen Behälterkörper aus. Die Behälter sind während der Lagerung mit einem überwachten Doppeldeckel-Dichtsystem ausgestattet. Beide Deckelsysteme (Primär- und Sekundärdeckelsystem) sind unabhängig voneinander mit dem Behälterkörper verschraubt. Die Positionierung des Inventars im Behälterschacht erfolgt über einen sogenannten Tragkorb.

Mit zunehmender Lagerdauer ist generell von einer alterungsbedingten Veränderung der Materialien bzw. des Zustandes von Behälterkomponenten auszugehen.⁹ Alterungseffekte können negative Auswirkungen auf die Sicherheit der Zwischenlagerung haben sowie einen Abtransport von Brennelementen zur Endlagerung verzögern.

Alterungseffekte können an zahlreichen Behälterkomponenten auftreten. Sicherheitstechnisch relevant sind Material- und Zustandsänderungen an Metall- und Elastomer-Dichtungen, an dem Tragkorb zur Aufnahme von Brennelementen, am Dichtheitsüberwachungssystem (Druckschalter) und an den Polyäthylen-Strukturen zur Neutronenabschirmung. Direkt prüfbar von außen sind aber nur die Verschraubungselemente, Korrosionserscheinungen an Mantelflächen und Tragbolzen, die Dichtheitsüberwachung, die Oberflächendosisleistung und das Temperaturprofil.

Für die verlängerte Zwischenlagerung ist die BGZ zu der Einschätzung gekommen, dass insbesondere temperaturgetriebene Alterungsmechanismen aufgrund der abnehmenden Nachzerfallswärmeleistung im weiteren Verlauf der Zwischenlagerung an Einfluss verlieren und keine grundsätzlichen Veränderungen gegenüber der bisherigen Bewertung für 40 Jahre zu erwarten sind. Ähnlich sei es bei der Auswirkung der ionisierenden Strahlung. Eine Verlängerung der Aufbewahrungsdauer ließe laut BGZ keine Veränderung in der Sicherheitsbewertung erwarten. Bei diesen Einschätzungen geht die BGZ allerdings von relativ kurzen Verlängerungen aus.

Das Alterungsverhalten des Moderatormaterials sei laut BGZ bereits im Rahmen der aktuellen Genehmigungen abdeckend beschrieben worden und könne auf die verlängerte Zwischenlagerzeit extrapoliert werden. Daher wird zum Moderatorverhalten kein spezifischer Forschungsbedarf abgeleitet. (BGZ 2023)

Die BGZ erklärt, dass die **Deckelschrauben** zentrale Behälterkomponenten zur Gewährleistung des Schutzziels des sicheren Einschlusses der radioaktiven Stoffe sind. Bei der Schraubenrelaxation würden aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus nur minimale Veränderungen erwartet, die durch die Auslegung der Schraubverbindung abgedeckt seien. Daher sieht sie auch für die Deckelschrauben keinen Forschungsbedarf, um alterungsbedingten Schäden ggf. vorzubeugen. (BGZ 2023)

Der **Tragkorb** soll durch seine konstruktive Auslegung eine stabile Positionierung des Inventars im Behälterinnenraum gewährleisten. Da die Unterkritikalität basierend auf den bestehenden Genehmigungen nur für einen Zeitraum von 40 Jahren gewährleistet wird, müsste daher belegt werden, für wie lange die Integrität des Tragekorbs und der Hüllrohre und damit die Unterkritikalität nach bisherigem Kenntnisstand gewährleistet ist. Die BGZ sieht bisher keinen Forschungsbedarf.

Der sichere Einschluss der radioaktiven Stoffe während der Lagerung soll durch das Doppeldeckel-Dichtsystem mit verpressten **Metалldichtungen** gewährleistet werden. In der Dichtbarriere kommen ausschließlich Metалldichtungen vom Typ Helicoflex® des französischen Herstellers Technetics zum Einsatz. Diese Dichtungen bestehen aus einem Spiralfederkern und einem Edelstahlmantel, der von einem äußeren Liner aus Aluminium oder Silber überzogen ist. Um das Langzeitverhalten der

⁹ Unter Alterung ist die zeitliche irreversible Änderung der chemisch-physikalischen Eigenschaften eines Materials zu verstehen.

eingesetzten Metalldichtungen zuverlässig bewerten zu können, müssen die Kennwerte einer gealterten Dichtung bekannt sein. (BGZ 2023)

Das Projekt MSTOR (Metal Seals under long-term storage conditions) ist eine Erweiterung der vorhandenen experimentellen Basis zum temperaturabhängigen Alterungsverhalten von Metalldichtungen und Ableitung eines Prognosemodells für Dichtungskennwerte. Die Laufzeit ist von 2021 bis 2031, gegebenenfalls länger. Eine Prognostizierung des Dichtungsverhaltens ist für die Bewertung im Rahmen der verlängerten Zwischenlagerung und des anschließenden Abtransports wesentlich. Das Vorläuferprojekt RuDrift zeigt, dass Messergebnisse bei hohen Temperaturen nicht direkt auf geringere Temperaturbereiche übertragbar sind. Ob für die nun erforderlichen langer Lagerzeiten ein Versagen einer Dichtung oder gar ein vielfaches Versagen von Dichtungen sicher auszuschließen ist, ist heutzutage nicht nachgewiesen.

Die Einhaltung der spezifizierten Leckagerate (10^{-8} Pa m³/s) unter möglichen Unfall- oder Störfallbedingungen ist bisher ebenfalls nicht gewährleistet. Lageänderungen des Deckelsystems sind nicht vollständig ausgeschlossen. Die BGZ untersucht 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 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 (MShift¹⁰). Auch im Vorhaben MLift¹¹ 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.

Ein Nachweis, ob nach einer langfristigen Zwischenlagerung die **Metalldichtungen** des Doppeldeckeldichtsystems noch in der Lage sind, einen sicheren Abtransport zu gewährleisten und auch die Handhabung der Behälter noch sicher möglich ist, muss deutlich vor Ablauf der Zwischenlagerzeit geführt werden. Nur so können ggf. Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Die Alterung könnte auch negative Auswirkung auf das Dichtungsverhalten bei mechanischen Einwirkungen infolge eines Flugzeugabsturzes haben. Ebenfalls bisher ungeklärt ist die thermische Widerstandsfähigkeit von gealterten bzw. stark gealterten Dichtungen. Hierzu ist bisher kein Forschungsvorhaben initiiert.

Der **Druckschalter** ist in der äußeren Dichtbarriere des Doppeldeckeldichtsystems montiert, mit dem darunterliegenden Sperrraumvolumen verbunden und an das Behälterüberwachungssystem angeschlossen. Sollte der Druck im Sperrraum während der Lagerung durch einen Defekt in einem der beiden Deckel fallen, meldet das Behälterüberwachungssystem den Defekt.¹² Der Druckschalter könnte zwar das Nachlassen der Dichtung nach einem Flugzeugabsturz melden, ob er aber bei einem Brand noch funktioniert, ist nicht nachgewiesen. Vor allem aber besteht die Frage, wie die Abdichtung erfolgen soll, wenn mehrere Behälter gleichzeitig undicht werden.

Das geplante **Dosisleistungs- und Temperaturmessprogramm OBSERVE** zielt darauf ab, die gesamte Mantelfläche von ausgewählten Behältern zu verschiedenen Zeitpunkten über einen längeren Zeitraum messtechnisch zu erfassen und darüber eine direkte und integrale Aussage zum

10 MShift – Leckagerate gealterter Metaldichtungen bei einer Deckelquerverschiebung

11 MLift – Leckagerate nach dem Wiederverpressen gealterter Metaldichtungen

12 Beim Druckschalter handelt es sich um ein komplexes Bauteil. Es ist zu erwarten, dass bei einer Lagerzeit der Behälter von deutlich über 40 Jahren die Ausfallrate der Druckschalter ansteigen wird.

Alterungsverhalten der Behälter beziehungsweise des Inventars abzuleiten. Dazu sollen die gemessenen Dosisleistungs- und Temperaturverläufe mit den rechnerisch ermittelten Prognosewerten verglichen werden. Im ersten Projektabschnitt bis Ende 2022 wurden zunächst Sensitivitätsstudien durchgeführt. Diese haben laut BGZ gezeigt, dass sich sowohl Änderungen an der Brennstoffanordnung als auch Lücken in der Neutronenabschirmung ab einem gewissen Umfang mittels engmaschiger Dosisleistungsmessungen an der Manteloberfläche detektieren lassen. (BGZ 2023)

Insgesamt ist der Umfang des BGZ-Forschungsprogramms zu Behältern sehr gering. Die meisten Effekte von potenziell negativ von Alterung betroffenen Behälterkomponenten werden als vernachlässigbar bewertet: Begrenzte Forschungsvorhaben werden nur zu Metalldichtungen durchgeführt. Zusätzlich erfolgen Optimierungsarbeiten für die Druckschalter und ein Forschungsvorhaben zu Dosisleistungs- und Temperaturverteilungen auf der Behälteroberfläche.

Die Herstellung der Castor-Behälter erfolgte auf der Grundlage eines nach DIN ISO 9000 ff. zertifizierten Qualitätsmanagementsystems. Dennoch zeigten sich bereits jetzt **Qualitätsmängel**.

Für die Handhabung der Castorbehälter sind deckel- und bodenseitig je zwei aus Edelstahl gefertigte Tragzapfen in den Behältermantel eingepasst und an diesen angeschraubt. Im Zwischenlager des abgeschalteten Atomkraftwerks Unterweser war 2014 zunächst an vier Behältern ein Mangel aufgefallen: Bei den Tragzapfen, mit deren Hilfe die Castoren angehoben, umgestellt und verladen werden können, war die vorgeschriebene Ultraschallprüfung entweder nicht erfolgt oder nicht ausreichend dokumentiert worden. Daraufhin hatte die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) alle Castorbehälter in den Zwischenlagern überprüft und festgestellt, dass bundesweit 315 beladene und in den Zwischenlagern aufbewahrte Behälter unzureichend überprüfte Tragzapfen haben.

Ein weiterer systematischer Qualitätsmangel betraf das sogenannte Blockmaß¹³ der Behälter. Die BGZ stellte im November 2020 fest, dass das Blockmaß eines Castorbehälters im Zwischenlager Unterweser in geringem Umfang von der Toleranz des Blockmaßes im Deckelsystem abwich. Die BGZ überprüfte daraufhin die Dokumentation aller in ihren Zwischenlagern eingelagerten Castorbehälter. Dabei stellte sie fest, dass es an einem Behälter im Zwischenlager Unterweser reale Abweichungen bei der Blockmaß-Toleranz gibt. Zuvor hatte die BGZ bereits im Zwischenlager Philippsburg an zwei Behältern und an einem Behälter in Brokdorf derartige Fälle entdeckt. (BGZ 2020f, BGZ 2021f)

Diese Fälle belegen, dass umfangreiche Mängel in der Qualitätssicherung der Behälter bestehen können. Insgesamt sind Material- und Komponentenschäden nicht auszuschließen, die insbesondere bei einer langfristigen Zwischenlagerung negative Auswirkungen auf die Sicherheit haben können. Dies gilt insbesondere für einen Flugzeugabsturz oder einen anderen terroristischen Anschlag. Zudem könnten Qualitätsmängel an den Behältern ein späteres Abtransportieren zum Endlagerstandort erheblich verzögern. Qualitätsmängel an Behälterkomponenten wirken sich bei einem deutlich längeren Lagerzeitraum stärker aus und müssen daher neu bewertet werden.

Insgesamt sind nach heutigem Wissensstand alterungsbedingte Schäden an Behälterkomponenten nicht auszuschließen. Insbesondere ist nicht auszuschließen, dass aus nicht berücksichtigten alterungsbedingten Effekten erhöhte Freisetzungen in Unfallsituationen resultieren.

Der innere Deckel (Primärdeckel) und der äußere Deckel (Sekundärdeckel) der Behälter haben je eine Metalldichtung. Wird eine Undichtigkeit am Primärdeckel festgestellt, kann diese nicht im Zwischenlager behoben werden, da der Behälter nach Abnahme des Primärdeckels gegenüber der

¹³ Das Blockmaß ist ein Maß für die Stärke der Verpressung zwischen Behälter und Deckel.

Gebäudeatmosphäre und damit zur Biosphäre insgesamt offen wäre. Für eine Instandsetzung des Systems gibt es nach Angaben der Bundesregierung zwei Möglichkeiten:

- Reparaturkonzept mit Aufbringen eines dritten Deckels, dem sogenannten Fügedeckel, über dem Sekundärdeckel zur Wiederherstellung des Doppeldichtsystems oder
- Verbringung des Behälters in eine „Heiße Zelle“ zum Austausch der Primärdeckeldichtung nach Öffnung des Behälters.

Das Reparaturkonzept mit Fügedeckel wurde bereits bei der Genehmigung der Standortzwischenlager kontrovers diskutiert. Ein wesentlicher Kritikpunkt am Konzept ist, dass der Fügedeckel im Störfall nicht die Qualität einer notwendigen zweiten Barriere besitzt, denn die Störfallsicherheit des Fügedeckels ist nicht gegeben. Dadurch kann es bei bestimmten Störfällen (z. B. Flugzeugabsturz) zu weit höheren Freisetzungen kommen, als sie in den Genehmigungsverfahren unterstellt wurden. (NEUMANN 2014)

Aufgrund der notwendigen langen Lagerzeiten sollten an allen langfristigen Zwischenlagerstandorten während der gesamten zu erwartenden Betriebszeit „Heiße Zellen“ vorhanden sein, in denen ggf. der Austausch von Primärdeckeldichtungen sowie die Überprüfungen von Inventar und Einbauten im Behälterinnenraum möglich sind. Bemerkenswert ist, dass auch die IAEA im Rahmen der 2019 durchgeführten ARTEMIS-Mission geraten hat, einen Notfallplan für die Reparatur von Lagerbehältern und die Umlagerung abgebrannter Brennelemente im Falle einer Beschädigung aufzustellen.¹⁴

1.5 Inventar bei verlängerter Zwischenlagerung

Bei Brennelementen aus AKW soll das intakte Hüllrohr den Austritt radioaktiver Partikel verhindern, denn Brennstoff wird in seiner Form und am Ort fixiert. Die Dichtheit und die Integrität der Hüllrohre der Brennelemente (BE) sind im Zwischenlagerbetrieb nicht direkt prüfbar. Hüllrohre werden jedoch stetig durch Strahlung, Nachzerfallsleistung und Innendruck (Druckbeaufschlagung, freigesetzte Spaltgase, Helium) thermisch und mechanisch belastet. Diese Belastungen führen zur Versprödung durch Strahlung, zu Wasserstoffeinlagerungen und zur Verformung durch Kriechen und zur Herabsetzung der Duktilität des Hüllrohres bei Temperaturabnahme.

Für die Nachweisführung bezüglich der verlängerten Zwischenlagerung müssen prinzipiell sowohl zusätzliche experimentelle Daten generiert als auch analytische Verfahren implementiert und validiert werden. Internationale Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gibt es zu vielen der sicherheitsrelevanten Themen, jedoch nicht immer in den für die BE aus deutschen AKW repräsentativen Parameterbereichen. (BGZ 2023)

Für lange Zwischenlagerzeiten (mehr als 40 Jahre) liegen bisher keine ausreichenden Erfahrungen vor. Möglicherweise werden Schadensmechanismen, die für eine 40-jährige Lagerzeit ausgeschlossen wurden, die Integrität des Inventars gefährden. Der Stand von Wissenschaft und Technik muss daher durch gezielte Forschung weiterentwickelt werden.

¹⁴ Vom 22. September bis zum 4. Oktober 2019 fand die erste IAEA-Überprüfungsmission für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle und abgebrannter Brennelemente (ARTEMIS-Mission) in Deutschland statt. Als international angesehene „Gute Praxis“ befanden die internationalen Expert*innen die Einrichtung eines unabhängigen Beirats zur Öffentlichkeitsbeteiligung, des Nationalen Begleitgremiums (NBG). Insgesamt wurden drei Empfehlungen sowie 12 Hinweise ausgesprochen. Zu den Hinweisen gehört auch folgender Punkt: Die Regierung sollte erwägen, einen Notfallplan für die Reparatur von Lagerbehältern und die Umlagerung abgebrannter Brennelemente im Falle einer Beschädigung aufzustellen.

Für das Inventar erfolgte bisher der Kenntnisgewinn primär über Beteiligung an internationaler Forschung. Die Versuche und Erkenntnisse sind nur bedingt übertragbar auf die deutsche Zwischenlagerung, weil in Deutschland höher angereicherte BE eingesetzt werden. Eine direkte Validierung mit aktuell frei verfügbaren Daten ist nur bedingt möglich. Für Brennstoffe mit hohem Abbrand (mehr als 45 GWd/t) sowie für MOX-Brennstoff und im Allgemeinen für lange Lagerzeiten (mehr als 40 Jahre) liegen keine ausreichenden Erfahrungen vor. Je höher die Temperatur, desto stärker ist der Einfluss von Alterungseffekten. Daher werden die Alterungseffekte von hochabgebrannten Brennelementen stärker sein als von vor Jahrzehnten eingesetzten Brennelementen, die jetzt seit längerer Zeit in Zwischenlagern aufbewahrt werden.

Die Untersuchung des Langzeitverhaltens der eingelagerten BE aus den AKW ist für die BGZ ein Forschungsschwerpunkt. Die BGZ führt nun in Schweden mit dem Projekt „LEDA“ (Longterm Experimental Dry Storage Analysis) ein eigenes Forschungsprogramm zum Hüllrohrverhalten unter Bedingungen der verlängerten Zwischenlagerung durch. Die zu untersuchenden Brennstabsegmente repräsentieren laut BGZ bestmöglich die in Deutschland eingesetzten Brennstäbe. Ergebnisse wurden noch nicht öffentlich.

Die ESK weist darauf hin, dass für den Fall, dass noch Wissenslücken hinsichtlich des Inventars und seiner Eigenschaften für die zu führenden Genehmigungsverfahren bestehen, hierfür in Deutschland nur noch bis 2027 nicht in Behälter geladene Brennelemente zur Verfügung stehen. Insofern müssten Entscheidungen für derartige Untersuchungen zügig getroffen werden. (ESK 2023)

Für die Sicherheitsbewertung der langen Lagerzeiten müssen zuverlässige Prognosen aufgestellt werden. Dazu müssen für eine geeignete repräsentative Auswahl von Behältern Untersuchungen im Behälterinneren erfolgen. Die Frage ist, ob jetzt eine Überwachung an den letzten noch zu beladenden Behältern installiert werden könnte oder sollte, wie dies z. B. in den USA erfolgte.

Zurzeit wird an einer Untersuchung der Behälterinventare von außen mittels kosmischer Myonen geforscht. Diese nicht invasive Untersuchung ist ein noch relativ junges Forschungsfeld. Sie könnte eine gute Möglichkeit zur Überwachung der Behälter darstellen. Allerdings ist die Machbarkeit der Myonenradiografie zur Behälterüberwachung ist noch nicht gezeigt.

Zu bedenken ist zur Bewertung des langfristigen Zustands der Hüllröhre auch, dass Vorkommnisse im Betrieb der deutschen Reaktoren – wie die erhöhten Oxidschichtdicken an Brennelement-Hüllrohren – Auswirkungen auf die gelagerten Inventare in der Zwischenlagerung haben. Es traten im Reaktorbetrieb im letzten Jahrzehnt vielfach Brennelementschäden auf, die die Eigenschaften der Hüllröhre beeinflussen und Zweifel an den Prognosen über die Langzeitsicherheit aufkommen lassen. Zudem zeigten sich Fehler bei der Dokumentation der Beladung der Behälter.

Die Art und Weise des Betriebs im Reaktor (wie erhöhte Oxidschichtdicken an Brennelement-Hüllrohren) hat Auswirkungen auf den Zustand der Brennelemente während der Zwischenlagerung. Während ihrer Einsatzzeit im Reaktor kommt es immer zur Bildung dünner Oxidschichten auf der Oberfläche der Brennelement-Hüllröhre. Die Schichtdicken liegen normalerweise zwischen 10 und 15 µm. In der Spezifikation der Brennelemente wurde ein Wert von max. 100 µm festgelegt. Im AKW Brokdorf wurden im Jahr 2017 BE mit Schichtdicken von bis zu 150 µm im oberen Bereich aufgefunden.

Insgesamt können alterungsbedingte Schäden beim Inventar aus Störfällen aber auch im sogenannten Normalbetrieb zu höheren Freisetzen resultieren als bisher in Sicherheitsanalysen unterstellt wird.

2 (Unzureichender) Schutz gegen Terrorangriffe

Eine große Menge (mehr als 10.000 Tonnen Schwermetall) an hochradioaktivem Material muss in Deutschland noch für einen langen Zeitraum oberirdisch gelagert werden. Neben den Fragen der Sicherheit sind auch Aspekte der Sicherung von großer Bedeutung. Unter dem Begriff der Sicherung von Atomanlagen wird in Abgrenzung zum Begriff der Sicherheit der Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (kurz SEWD) verstanden. Besonders relevant aus dem Bereich Sicherung ist der Schutz gegen Terroranschläge.

Die Basis für die Sicherung von Zwischenlagern bildet zunächst der Transport- und Lagerbehälter selbst. Es wurde bei Konzeptionierung und Inbetriebnahme davon ausgegangen, dass dieser einen ausreichenden Schutz gegen die zu unterstellenden gewaltsamen Einwirkungen bietet. Das Zwischenlagergebäude musste daher baulich nicht so robust ausgeführt werden wie die sicherheitsrelevanten Gebäude eines Atomkraftwerkes.

Die Szenarien und die festgelegten Sicherungsmaßnahmen werden regelmäßig überprüft und zwischen dem BMU, den atomrechtlichen Aufsichts- und Genehmigungsbehörden, den Innenbehörden des Bundes und der Länder, dem BASE, den Sicherheitsbehörden des Bundes sowie Sicherheitsexpert*innen abgestimmt.

Unter Leitung des Bundesumweltministeriums verständigten sich die o. g. Behörden mit den Betreibern 2010 auf ein gemeinsames generisches Sicherungskonzept zur Nachrüstung der Zwischenlager.

Für alle Zwischenlager wurde daraufhin in einer Änderungsgenehmigung zur bestehenden Genehmigung eine „Erweiterung des baulichen Schutzes gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD)“ beantragt. Laut BMU hatte sich zu bestimmten Angriffsszenarien im Nahbereich der Transport- und Lagerbehälter, die zu Schutzzielverletzungen führen können, die Bewertung und Erkenntnislage derart verändert, dass die Sicherungsmaßnahmen optimiert werden mussten. Dazu sollten bauliche Maßnahmen und – bis zu deren Umsetzung – temporäre Maßnahmen durchgeführt werden. Einzelheiten zu den neuen Erkenntnissen, den Lastannahmen¹⁵ und den Sicherungsmaßnahmen unterliegen der Geheimhaltung und können daher laut Bundesregierung öffentlich nicht genannt werden, um ihre Wirksamkeit nicht zu gefährden. (BMUB 2012)

Das neue Sicherungskonzept für die Zwischenlager wurde in der 2012 veröffentlichten Richtlinie zur Sicherung von Zwischenlagern gegen SEWD festgeschrieben. Ein wesentliches Charakteristikum des veränderten Sicherungskonzepts ist, dass die Betreiber nunmehr das Eindringen einer mit Hilfsmitteln ausgestatteten Tätergruppe in das Lagergebäude und somit das Einwirken auf die Behälter von innerhalb des Lagergebäudes zu verhindern haben. Zentraler Bestandteil des Sicherungskonzepts ist eine lückenlose Barrierelinie bestehend aus Baustrukturen aus Stahlbeton und Öffnungsverschlüssen (Türen, Toren, Gitter) zum Schutz des inneren Sicherungsbereichs, die unter Zuhilfenahme der in den Lastannahmen beschriebenen Hilfsmittel nicht innerhalb der Verzugszeit (bis zum Eintreffen der Polizeikräfte) überwunden werden kann.

Es geht bei den beantragten und inzwischen meist durchgeführten Nachrüstungen nicht um einen Schutz vor bestimmten Szenarien. Mit den Nachrüstungen wurde im Wesentlichen das Ziel verfolgt, die Außenwände der SZL bis in eine spezifische Mindesthöhe so weit zu verstärken, dass sie der **geforderten Barriereklasse** entsprechen. Die erforderliche Klassifikation der Außenwände wurde für die Lagergebäude nach dem STEAG-Konzept¹⁶ bereits durch die vorhandene Baustruktur erreicht. Für

¹⁵ In den sogenannten Lastannahmen werden u.a. Täterverhalten und Tatabsichten, zu unterstellende Waffen und Hilfsmittel festgelegt. Gegen diese Szenarien muss eine Atomanlage ausreichend geschützt sein.

¹⁶ Nordlager: Brokdorf, Unterweser, Brunsbüttel, Lingen, Krümmel, Grohnde

diese Zwischenlager sollten Verstärkungen am Sozial- und Betriebsgebäude erfolgen. Für Lagergebäude nach WTI-Konzept¹⁷ waren in Bereichen mit geringer Wandstärke in einem bestimmten Abstand zur Außenwand Stahlbetonwände geplant, um die erforderliche Barriereklasse zu erreichen. Der Bereich zwischen Zusatzwand und Lagergebäude sollte überdacht werden.

Die Lagerhallen sollten entlang einiger Wände durch eine zusätzliche Mauer geschützt werden. Die zusätzlichen Schutzwände sollten aus Stahlbeton mit einer Wandstärke von 85 cm und einer Höhe von 10 m ausgeführt werden. Des Weiteren sollten, sofern erforderlich, bei allen Lagergebäuden die Gitter in Lüftungs- und anderen Öffnungen ausgetauscht sowie Außentüren und Tore der Lagergebäude so ersetzt werden, dass auch sie die erforderliche Barriereklasse aufweisen.

Auch der Zugang der Hallen sollte verändert werden, um ein Eindringen von Unbefugten zu erschweren. Der Personenzugang zum SZL soll durch eine vorgebaute Vereinzelungsanlage an der Gebäudelängsseite erfolgen. Eine Vereinzelungsanlage erschwert insbesondere den unbefugten Zugang. Ob damit allerdings jeglicher unbefugte Zugang in die Halle verhindert werden kann, ist nicht belegt. Der Umfang und die Zielsetzung der Nachrüstungen sind nicht öffentlich. Diese Nachrüstungen an den bestehenden Zwischenlagern können die Gefährdung durch einen Terroranschlag wahrscheinlich geringfügig verringern.

Nachrüstmaßnahmen waren für alle deutschen Zwischenlager erforderlich und wurden auch an allen Standorten beantragt. Vierzehn Jahre später sind noch immer nicht an allen Standorten die erforderlichen Nachrüstungen umgesetzt, die letzten Genehmigungen wurden erst am 7. Juli 2022 für das SZL Brokdorf und am 25. April 2024 für das SZL Grohnde erteilt. (BASE 2024a, c)¹⁸ Nach den bisherigen Erfahrungen vergehen von der Erteilung der Genehmigung bis zum Abschluss der Umsetzung der Härtingsmaßnahmen etwa vier Jahre¹⁹. (DBT 2018e)

In den jeweiligen Antragsverfahren wurde nicht die Wirksamkeit der Härtingsmaßnahmen nachgewiesen, sondern lediglich, dass von den Maßnahmen keine negative Rückwirkung auf die Lagerung ausgeht. Da die Hallen bereits gebaut sind, ist durch Nachrüstungen nur eine bedingte Verbesserung der Situation möglich. Die Halle, die in Lubmin neu gebaut wird, wird einen deutlich besseren baulichen Schutz gegen SEWD-Ereignisse gewährleisten. Mit einer Gebäudestärke von 1,80 Meter soll das neue Zwischenlager in Lubmin (ESTRAL) dickere Wände und Decken als bisherige Zwischenlagergebäude haben.²⁰ Ob das ausreichend ist, kann nur durch entsprechende Analysen und Sicherheitsanforderungen gezeigt werden.

2.1 Aufhebung der Genehmigung für das SZL Brunsbüttel

Dass die Sicherheit der deutschen Zwischenlager nicht ausreichend nachgewiesen ist, zeigt die Aufhebung der Genehmigung für das SZL Brunsbüttel. Mit Urteil des Oberverwaltungsgerichts (OVG) Schleswig (4 KS 3/08) am 19. Juni 2013 wurde die Genehmigung für das SZL Brunsbüttel

17 Grafenrheinfeld, Isar, Gundremmingen, Philippsburg, Biblis, Gorleben, Ahaus

18 Zudem fehlen immer noch bei drei der 16 Zwischenlager die Genehmigungen; für die Lager in Brunsbüttel und Jülich, die zurzeit keine gültige Betriebsgenehmigung haben, sowie für das Zwischenlager Nord.

19 Für das Zwischenlager Ahaus sind die Nachrüstmaßnahmen vollständig und für das Zwischenlager Brokdorf fast vollständig umgesetzt. Für die hier betrachteten Szenarien haben die Nachrüstmaßnahmen keinen Einfluss, da davon ausgegangen wird, dass eine terroristische Gruppe mit panzerbrechenden Waffen auch nach Fertigstellung der Maßnahmen noch in der Lage ist, in die Halle einzudringen. Angriffe aus der Luft mit Drohnen oder Flugzeugen sind immer noch genauso möglich.

20 Für das Zwischenlager Nord sind die geplanten „Härtungen“ nicht durchführbar, daher ist ein Neubau der Halle geplant. Im Mai 2019 beantragte die EWN GmbH den Bau eines neuen Zwischenlagers für Castoren in Lubmin. Die Castoren werden frühestens Ende 2027 umgelagert werden können.

aufgrund einer Klage eines Anwohners aufgehoben; eine Revision wurde nicht zugelassen. (OVG 2013)²¹ Da im Wesentlichen die gleichen Sicherheitsnachweise während der Genehmigungsverfahren für die anderen Zwischenlager geführt wurden, bestehen dort die gleichen Defizite.

In der Klage ging es um die Frage, ob die möglichen Auswirkungen eines gezielten Flugzeugabsturzes und eines Beschusses mit panzerbrechenden Waffen im Genehmigungsverfahren ausreichend geprüft wurden. Das Gericht stellte dabei mehrere Ermittlungs- und Bewertungsdefizite fest. Die Gewährleistung des erforderlichen Schutzes gegen SEWD ist Genehmigungsvoraussetzung gemäß Atomgesetz (§ 6 (2) Nr. 4) für Zwischenlager.

Zwar ist ein Gericht nicht für die Prüfung der Sicherheit einer kerntechnischen Anlage zuständig, aber faktisch bedeutet die Feststellung von Ermittlungs- und Bewertungsdefiziten in den Sicherheitsanalysen im Genehmigungsverfahren, dass die Sicherheit nicht nachgewiesen ist. Bei einer genauen Betrachtung des entsprechenden Urteils wird deutlich, dass sich der Senat des OVG inhaltlich tief in die Materie eingearbeitet hat. Der Senat hat die Aufhebung des Urteils fachlich begründet.

Am 16. November 2015 wurde ein Antrag auf eine neue Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen nach § 6 des Atomgesetzes (AtG) in dem bestehenden SZL Brunsbüttel gestellt. Sie soll wie die ursprüngliche Genehmigung bis zum 4. Februar 2046 gelten. Im Laufe des Genehmigungsverfahrens musste eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) mit Öffentlichkeitsbeteiligung durchgeführt werden. Die Einwendungen wurden in einem Erörterungstermin am 14./15. Juni 2017 mit der Antragstellerin und den zuständigen Behörden diskutiert. Aber gerade zu den Themen (gezielter Flugzeugabsturz und Behälter-Beschuss mit panzerbrechender Waffe), die der Grund für die Aufhebung der Genehmigung waren, wurden in den ausgelegten Unterlagen keine Informationen gegeben. Die Bevölkerung soll der Behörde trauen, die – wie sich im Klageverfahren herausgestellt hat – schon bei der ursprünglichen Genehmigung fehlerhaft ermittelt und bewertet hat.

Zur Erfüllung der Genehmigungsvoraussetzungen hat die Antragstellerin nachzuweisen, dass bei möglichen Störfällen der erforderliche Schutz gewährleistet ist. Im Bereich der Sicherung befinden sich die Unterlagen zur konventionalen Anlagensicherung, zur IT-Sicherung und zum gezielten Flugzeugabsturz aktuell noch immer in Prüfung. Laut BASE (2024b) sind auch die Unterlagen zu inventar-, behälter- und lagerspezifischen Sicherheitsnachweisen noch in Prüfung.

Zusätzlich zum laufenden Genehmigungsverfahren für die Neugenehmigung wurde am 7. Februar 2020 ein Antrag auf Genehmigung nach § 6 AtG zur Aufbewahrung für einen befristeten Zeitraum von fünf Jahren gestellt. Die Genehmigung würde der Überbrückung des Zeitraums bis zu einer vollständigen Umsetzung der im Antrag von 2015 beschriebenen Maßnahmen dienen. Offenbar müssen für das Zwischenlager Brunsbüttel zum Erlangen einer neuen Genehmigung zahlreiche Nachweise geführt werden, um die Sicherheit nachzuweisen. Die gleichen Sicherheitsnachweise müssten auch für anderen Zwischenlager geführt werden. Da im Wesentlichen die gleichen Nachweise für Inventar, Behälter und Gebäude geführt wurden, bestehen an anderen Zwischenlagern die gleichen Defizite.

Die Entscheidung der Betreiberin, wegen der offenbar erheblichen bzw. nicht leicht zu behebbenden Lücken in den Sicherheitsnachweisen zusätzlich eine kurze Verlängerung des ungenehmigten Lagers für fünf Jahre zu beantragen, ist unter Sicherheitsaspekten fragwürdig und insbesondere in Hinblick auf die ausstehenden Verlängerungen kritisch zu sehen.

²¹ Das SZL Brunsbüttel wurde am 5. Februar 2006 mit der Einlagerung des ersten Behälters in Betrieb genommen. Inzwischen sind dort 20 Behälter gelagert. Weitere Einlagerungen sind zurzeit nicht geplant.

Auch unabhängig von dem Urteil zur Aufhebung der Genehmigung des Zwischenlagers Brunsbüttel muss, insbesondere aufgrund der zu erwartenden langen Lagerzeiträume, eine deutliche Verbesserung des Schutzes der zwischengelagerten abgebrannten Brennelemente und hochradioaktiven Abfälle gegen Terrorangriffe erfolgen.

2.2 Beschuss mit panzerbrechender Waffe

Im Rahmen der Genehmigungsverfahren für das SZL Brunsbüttel sowie für alle anderen Zwischenlager für Kernbrennstoffe in Deutschland wurden mögliche Auswirkungen eines potenziellen Hohlladungsbeschusses betrachtet. Dieser gilt als abdeckendes SEWD-Szenario, d. h. als Szenario mit den größten Auswirkungen. Dabei wurde unterstellt, dass eine Gruppe von Tätern in das Zwischenlager eindringt und mit panzerbrechenden Waffen die Behälter beschädigt. Ein Beschuss mit einem Hohlladungsgeschoss könnte die Wand eines metallischen Behälters durchschlagen und in seinem Inneren Brennstoff zerstäuben. Der Beschuss würde weiterhin einen Druckaufbau im Inneren des Behälters bewirken. Dadurch würde eine beträchtliche Menge an radioaktivem Material in das Lagergebäude und von dort in die Atmosphäre freigesetzt.

Das o.g. Urteil des OVG Schleswig bezieht sich zwar ausschließlich auf die Zwischenlagerung hochradioaktiver Brennelemente im SZL Brunsbüttel, jedoch sind die Annahmen und Untersuchungen für den als abdeckend betrachteten Terrorangriff (Beschuss mit Hohlladungsgeschoss) an allen Zwischenlagern gleich. Das betrifft auch das Szenario eines absichtlich herbeigeführten Absturzes eines Verkehrsflugzeugs. Die vom OVG Schleswig gerügten Bewertungs- und Ermittlungsfehler des Genehmigungsverfahrens bestehen daher bei allen deutschen Zwischenlagern.

Auf dem Erörterungstermin zur von Vattenfall beantragten Neugenehmigung des SZL Brunsbüttel am 14./15. Juni 2017 in Brunsbüttel wurde bzgl. eines möglichen Angriffs mit panzerbrechenden Waffen erklärt, dass ein derartiges Szenario jetzt durch die baulichen Maßnahmen verhindert würde. Neue Beschussversuche sind daher nicht erfolgt.

Auch nach durchgeführten Nachrüstungen muss jedoch davon ausgegangen werden, dass eine bewaffnete und entschlossene Terrorgruppe in der Lage ist, in die Halle einzudringen.

Zudem können sogenannte Innentäter (Personen, die im Zwischenlager tätig sind) in die Lagerhalle gelangen. Ein 2017 bekannt gewordener Vorfall mit manipulierten Zuverlässigkeitsüberprüfungen von Mitarbeiter*innen belegt vorhandene Schwachstellen für die Verhinderung von Anschlägen durch Innentäter. (BW 2017)

2.2.1 Tragbare panzerbrechende Waffen

Tragbare, panzerbrechende Waffen werden weltweit von 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 Szenario für einen Angriff 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.²²

22 Die folgende Darstellung beruht auf einer Vielzahl von Studien zu diesem Thema, die die Autorin mit Beratung von mehreren Waffenexpert*innen in den letzten Jahren erstellt hat.

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

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

Die verbesserte Schutztechnologie der Panzerfahrzeuge führte zur Vergrößerung der Durchschlagsleistung der Hohlladungsgeschosse, vor allem durch eine Erhöhung der Sprengstoffmenge. Dadurch wird das Schadensausmaß eines Beschlusses – auch auf einen Behälter – signifikant erhöht. Die Hohlladungsgeschosse, die von Panzerfüßen oder panzerbrechenden Lenk Waffen (ATGW) 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 Beschluss des Behälters im Inneren eine größere Zerstörung der Brennelemente bewirkt.

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 Beschluss 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 folgeschwer getroffen wird, liegt bei nahezu 100 %.

Die Weiterentwicklung der Waffensysteme zielte auch auf die Erhöhung der Reichweiten ab. Tragbare panzerbrechende Lenk Waffen haben heutzutage Reichweiten von bis zu 5.000 Metern. Die optimale Distanz liegt zwischen 50 und 400 Metern.

Hohlladungsgeschoss

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 derart 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).

Infolge des Hohlladungsbeschlusses eines Behälters wird die Behälterwand durchdrungen und im Inneren des Behälters 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 Beschlussversuchen aus dem Jahr

1992. Die Beschussversuche erfolgten vor fast drei Jahrzehnten und daher mit Hohlladungen, die – gemessen an später entwickelten 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 GRS-Studie zugrunde legt. Aufgrund der um mindestens eine, aber vermutlich mehrere Größenordnungen höhere Freisetzungsmenge sind auch entsprechend größere radiologische Folgen zu erwarten.

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 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. Zum einen ist der zerstörte Brennelement-Bereich im Behälter größer, dadurch wird ein größeres Volumen an Brennstoff pulverisiert. Zum anderen werden durch die größere Explosionswirkung vor dem Behälter 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 und bei Kenntnis der Wirkungsweise eines Hohlladungsgeschosses nicht nachvollziehbar. Sie 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 Synergieeffekten 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.

Thermobarische Gefechtsköpfe

Die *AT-14 Kornet-E* ist eine tragbare panzerbrechende Lenkwaffe (ATGW) der dritten Generation für große Reichweiten – ein von der russischen Firma KBP für den Einsatz gegen schwere Panzer entwickeltes Waffensystem. 1994 wurden erste einsatzfähige Systeme an die russischen Streitkräfte ausgeliefert.

Der Standard-Gefechtskopf ist eine Tandemhohlladung, die 1,2 Meter homogenen Panzerstahl durchdringen kann. Neben dem Tandemhohlladungs-Gefechtskopf existiert ein thermobarischer Gefechtskopf. Die Explosionskraft dieses Gefechtskopfs entspricht (laut Hersteller) der Explosionskraft von 10 Kilogramm Sprengstoff (TNT).

Die Wirkung thermobarischer Waffen oder Aerosolbomben (FAE = Fuel-Air Explosive) beruht auf der Zündung einer in der Luft verteilten brennbaren Substanz. Aerosolbomben sind die militärische Anwendung der Explosionen von Benzin-Luft-Gemischen, die z. B. in Raffinerien schon öfter katastrophale Unfälle verursachten. Ein thermobarischer Gefechtskopf besteht aus einem Behälter, der eine brennbare Substanz enthält. Zur Zündung werden zwei Sprengladungen verwendet: Die erste Sprengung verteilt den Brennstoff fein in der Luft, ein Brennstoff-Luft-Gemisch, ein Aerosol, entsteht. Wenige Zehntelsekunden später zündet die zweite Sprengladung die Aerosolwolke. Die Verpuffung erfolgt fast gleichzeitig in einer Kugel mit einem Durchmesser von 10 bis 40 Metern.

Die Hauptwirkung thermobarischer Gefechtsköpfe wird durch die bei der Verpuffung entstehende Druckwelle erzeugt, sie zerstört Gebäude. Die Druckwirkung hält wesentlich länger an als bei konventionellem Sprengstoff. Der Überdruck der Detonation kann drei Megapascal (30 bar) erreichen. Außerhalb der Wolke bewegt sich die Explosionsdruckwelle mit über drei Kilometern pro Sekunde. Zudem haben Aerosolbomben eine wesentlich stärkere Hitzewirkung als konventionelle Sprengladungen. Die Temperatur kann 2.500 bis 3.000 Grad Celsius betragen. Weiterer Schaden wird durch die Vakuumwirkung erzeugt: Die Explosion entzieht der Luft Sauerstoff, dadurch entsteht ein starker Unterdruck, der bewegliche Gegenstände anzieht und so zu weiteren Zerstörungen führt. Werden befestigte Räume, z. B. Bunker, beschossen, kann der Brennstoff in diese eindringen und dort erhebliche Zerstörung anrichten. Die Wirkung der Druckwelle ist in geschlossenen Räumen noch stärker.²³ Die Lenkrakete wird unmittelbar aus ihrem Transport- und Abschussbehälter gestartet.²⁴

Es muss insgesamt davon ausgegangen werden, dass es potenziellen Attentätern möglich wäre, illegal an *AT-14 Kornet-E* inklusive der zugehörigen Komponenten zu gelangen. Thermobarische Gefechtsköpfe wurden möglicherweise bereits vereinzelt von Terroristen eingesetzt – aber das konnte nicht hundertprozentig belegt werden. Die *AT-14 Kornet-E* wird weltweit verkauft. Bereits 1996 erhielt z. B. die syrische Armee diese Waffe. 2006 schlossen Algerien und Russland einen Liefervertrag ab. Je

²³ Die Auswirkungen der stärksten Aerosolbomben entsprechen den Auswirkungen kleiner Atombomben, nur wird kein radioaktives Material ein- und freigesetzt.

²⁴ Das ermöglicht eine sehr schnelle Feuerbereitschaft und eine relativ schnelle Schussfolge. Die dreibeinige Abschlusseinrichtung ist zusätzlich zur Tageslichtzieloptik mit einem Wärmebildgerät ausgestattet, das eine Zielerfassung auf bis zu 3.500 Metern Entfernung bei Nacht erlaubt. Es ist möglich, von einem Zielgerät zwei Abschussvorrichtungen gleichzeitig anzusteuern und dadurch ein Ziel simultan mit zwei Raketen anzugreifen.

mehr dieser Waffensysteme weltweit im Umlauf sind, desto einfacher wird es für Terrororganisationen werden, an diese Waffen zu gelangen. (BECKER 2010)

2.3 Gezielter Absturz eines Verkehrsflugzeuges

Bei der Genehmigung von Zwischenlagern wurde das Szenario „Terroristischer Flugzeugabsturz“ nicht in die Lastannahmen des Regelwerks zum Schutz gegen SEWD aufgenommen. Die zuständige Genehmigungsbehörde prüfte aber unter Einbeziehung des Gefährdungspotenzials (u. a. Lagerungsdauer sowie standortspezifische Faktoren), ob und ggf. welche Maßnahmen verlangt werden können.

Die jeweilige Genehmigungsbehörde kann entscheiden, welcher Typ eines Verkehrsflugzeugs für die Untersuchungen herangezogen wird. Die Behörde kann also über das Schutzmaß in eigener Verantwortung entscheiden. Bei ihr liegt die Risikoermittlung und -bewertung (Funktionsvorbehalt der Exekutive). Die Gerichte haben aber zu überprüfen, ob diese Entscheidung auf einer ausreichenden Datenbasis beruht und dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht.

2.3.1 Berücksichtigung des *Airbus A380*

Im Urteil zur Aufhebung der Genehmigung für das Zwischenlager Brunsbüttel kritisierte das Gericht, dass ein gezielter Absturz eines Flugzeuges vom Typ *Airbus A380* im Genehmigungsverfahren nicht mit einer detaillierten Untersuchung berücksichtigt worden ist. Diese Ausklammerung des *Airbus A380* aus der Betrachtung stellt ein Ermittlungsdefizit der Genehmigungsbehörde dar, weil zum Genehmigungszeitpunkt absehbar war, dass dieser Flugzeugtyp innerhalb des Genehmigungszeitraumes in Dienst gestellt werden würde.

Da der Einsatz des *Airbus A380* ab dem Jahr 2006 feststand und klar war, dass er praktisch während der gesamten Betriebsdauer des Standortzwischenlagers im Einsatz sein würde, hätte dieser Flugzeugtyp zwingend berücksichtigt werden müssen. Der *Airbus A380* besitzt ein Gesamtstartgewicht von 560 Mg und eine Kerosinkapazität von 310 m³ an Bord.

Tabelle 1: Datenvergleich von Flugzeugtypen

Flugzeugtyp	Maximale Startmasse in Mg	Max. Kerosinmenge in m ³	Spannweite in m
<i>Boeing 747-400</i>	397	217	64
<i>Airbus A340-600</i>	365	195	63,5
<i>Airbus A380</i>	560	310	80

Die im Vergleich zu den berücksichtigten Flugzeugtypen größere Gesamtmasse des *A380* erhöhen den mechanischen Lasteintrag in das Gebäude und stellen dessen Standsicherheit sowie das unterstellte Eindringverhalten für harte Flugzeugteile in Frage. Damit resultieren höhere mechanische Behälterbelastungen, bzw. größere Gebäudeschäden, durch die dann auch mehr Kerosin in das Lagergebäude eindringen kann. Eine größere Kerosinmenge erhöht die Branddauer und damit den entscheidenden Parameter für das Versagen der Behälterdichtungen und die Freisetzung.

2.4 Bedrohungssituation durch Krieg gegen die Ukraine

Militärische Aktionen gegen kerntechnische Anlagen wie die russischen Angriffe auf die ukrainischen Atomanlagen stellen eine weitere Gefahr dar, die in der gegenwärtigen globalen Situation besondere Aufmerksamkeit verdient.

Mit dem Angriff Russlands auf die Ukraine sind Szenarien eingetreten, die zuvor als kaum realistisch galten. Das Risiko katastrophaler radioaktiver Freisetzungen hat sich dadurch erhöht. Mit dem Krieg in der Ukraine sind zivile kerntechnische Anlagen indirekt zum Ziel kriegerischer Auseinandersetzungen geworden. (BASE 2022) Für einen längeren Zeitraum ist es schwieriger, kriegerische Auseinandersetzungen bei den möglichen Bedrohungsszenarien auszuschließen. Ein Beschuss eines Zwischenlagers stellt eine Erhöhung der Risiken für die Gesellschaft dar.

Auch wenn die kriegerische Auseinandersetzung nicht auf dem jetzigen deutschen Staatsgebiet stattfindet, müssen die zusätzlichen Gefahren durch die aktuelle Kriegssituation Berücksichtigung finden.

Bereits heute wird ein zufälliger Absturz eines Militärflugzeugs auf ein Zwischenlager im Rahmen des Genehmigungsverfahrens betrachtet und ein entsprechender Schutz muss gewährleistet werden. Durch die veränderte geopolitische Situation müsste auch der Absturz einer mit Waffen geladenen Militärmaschine betrachtet werden. Ein derartiges Szenario kann erheblich größere radiologische Auswirkungen haben.

Ein Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe wird von der Genehmigungsbehörde als Terrorangriff mit den größten Auswirkungen betrachtet und die Zwischenlager müssen dagegen geschützt werden. Durch einen immer längeren Krieg könnten sich mehr derartiger Waffen im Einsatz befinden. Auch modernere Waffen mit höherer Zerstörungskraft als bisher von der Behörde unterstellt könnten in die Hände von Terroristen gelangen und eingesetzt werden. Große Gefahr für Zwischenlager geht insbesondere von thermobarischen Gefechtsköpfen (s. o.) aus, die im Krieg in der Ukraine zum Einsatz kommen. Bisher gingen Sicherheitskräfte davon aus, dass sich dieser Waffentyp nicht in den Händen von Terroristen befindet. Ob diese Annahme noch gerechtfertigt ist, muss bezweifelt werden.

Mittlerweile ist der Einsatz von Kamikaze-Drohnen, die mit Sprengstoff beladen sind, Teil von Kriegsrealität. Sie könnten auch für einen Angriff auf Atomanlagen eingesetzt werden.

2.5 Terroristischer Drohnenangriff

Drohnen aus der Luft können eine Gefahr für die Sicherheit der Zwischenlager darstellen. Waren Zwischenlager zuvor schwer einsehbar und nicht zugänglich, schaffen Drohnen eine Möglichkeit, den Aufbau, die Sicherheitsvorkehrungen, das Personal vor Ort sowie Abläufe und Prozesse auszuspionieren. Dass die Flugabwehr in Europa unzureichend ist, wurde spätestens im Herbst 2014 deutlich, als in Frankreich 31 Mal Drohnen über 19 französische Atomanlagen flogen. Bis heute ist unklar, wer diese Drohnen gesteuert hat. Vor zwei Jahren tauchten in Schweden diverse Drohnen über AKW auf und führten zu Geheimdienstermittlungen. In den USA gab es auch in den letzten Jahren diverse ungeklärte Drohnenflüge über Atomanlagen. diese Vorfälle zeigen, wie schwer der Schutz des Luftraums kritischer Infrastrukturen vor unautorisierten Drohnen sowie die Neutralisierung ebendieser ist. (WEBER 2024a, b) Auch in Deutschland wurden 2024 Drohnen über Atomanlagen gesichtet.²⁵

²⁵ <https://www.rundschau-online.de/politik/drohnen-ueber-akw-und-chemiepark-in-deutschland-gesichtet-1-849436>; <https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/Spionagedrohnen-ueber-Stade-Staatsanwaltschaft-ermittelt,drohnen408.html>

Drohnen sind relativ leicht zu beschaffen, umzurüsten und können sehr flexibel eingesetzt werden. Es stellt sich somit die Frage, ob ein Drohnenschwarm in der Lage wäre, das Gebäude zu zerstören und so auch Drohnen mit Panzerfäusten die Castoren beschädigen könnten.

In dieser Stellungnahme soll auftragsgemäß ein Szenario untersucht werden, in dem mehrere Drohnen die Zwischenlagergebäude und die darin gelagerten Behälter angreifen. Aufgrund der im Folgenden dargestellten Fähigkeiten von Kamikaze-Drohnen und dem rasanten Anstieg der erzeugten Stückzahl kann ein solches Szenario nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Drohnen oder unbemenschte Luftfahrzeuge (UAV) haben in den letzten Jahren in der militärischen Kriegsführung zunehmend an Bedeutung gewonnen. Sie bieten eine Reihe von Vorteilen gegenüber herkömmlichen bemannten Flugzeugen, darunter:

- Geringere Kosten: Der Betrieb und die Wartung von Drohnen sind relativ günstig. Dies macht sie zu einer attraktiven Option für Länder mit begrenzten Militärbudgets. (Anmerkung der Autorin: Aber auch für terroristisch motivierte Gruppen.)
- Geringeres Risiko für Pilot*innen: Drohnen können ferngesteuert werden, wodurch das Risiko, dass Pilot*innen im Kampf getötet oder verletzt werden, verringert wird.
- Höhere Flexibilität: Drohnen können schneller und einfacher eingesetzt werden als bemenschte Flugzeuge. Dies macht sie zu einer vielseitigeren Waffe, die in einer größeren Bandbreite von Szenarien eingesetzt werden kann.

Aufgrund dieser Vorteile werden Drohnen bereits für eine Vielzahl militärischer Missionen eingesetzt, darunter:

- Überwachung und Aufklärung: Drohnen können eingesetzt werden, um Informationen über feindliche Stellungen und Bewegungen zur Planung und Durchführung militärischer Operationen zu sammeln.
- Angriffsmissionen: Drohnen können mit Raketen, Bomben aber auch kleineren Sprengstoffpaketen bestückt und zum Angriff auf feindliche Ziele eingesetzt werden.

Der Einsatz von Drohnen in militärischen Konflikten hat in den letzten Jahren rasant zugenommen und wird in den kommenden Jahren weiter zunehmen. Drohnen gelten als „Gamechanger“.

Mit der Weiterentwicklung der Drohnentechnologie werden Drohnen zu noch leistungsfähigeren und vielseitigeren Waffen werden. Dies könnte zu einer Reihe von Veränderungen in der Art und Weise führen, wie Kriege geführt werden. Besonders relevant für die hier gestellte Fragestellung ist der verstärkte Einsatz von Drohnen für gezielte Angriffe: Drohnen werden feindliche Ziele mit größerer Präzision angreifen können.²⁶

Die kleineren Drohnensysteme können von Menschen als auch von LKW aus gestartet und dadurch mehr oder weniger überall eingesetzt werden. Obwohl sie kleinere Sprengköpfe als Präzisionsraketen tragen, können sie sich aufgrund ihrer geringen Größe und da sie meist niedrig fliegen der Radarerfassung entziehen. Außerdem können sie in „Schwarm“-Formationen eingesetzt werden, die die Luftverteidigung überwältigen können. Die meisten Radarssysteme sind nicht geeignet, kleine Drohnen zu entdecken.

Die im Vergleich zu herkömmlicher militärischer Hardware relativ niedrigen Kosten und die Zugänglichkeit der Drohnentechnologie ermöglichen es auch nichtstaatlichen Akteuren und aufständischen Gruppen, auf dieses Mittel der Kriegsführung zuzugreifen.

26 The Impact of Drones on Future of Military Warfare 2024, <https://media.inti.asia/read/the-impact-of-drones-on-future-of-military-warfare>

Der Einsatz unbemannter Luftfahrzeuge (UAV) bei Militäreinsätzen ist nicht neu. Dennoch haben sich Umfang und Komplexität des Einsatzes von Drohnen in den letzten Jahrzehnten dramatisch weiterentwickelt. Ursprünglich für Aufklärungs- und Überwachungszwecke entwickelt, sind Drohnen immer vielseitiger geworden und können Präzisionsschläge ausführen.²⁷

Die fortlaufende Innovation der Drohnentechnologie, einschließlich der Fortschritte in den Bereichen künstliche Intelligenz und Nutzlastkapazität, wird ihre Effektivität im Kampf weiter steigern.²⁸

2.5.1 Drohnen als „Gamechanger“ in der Ukraine

Vorbemerkung: Auch in anderen Gebieten und von anderen Armeen (Russland, Iran, Türkei, USA etc.) wurden und sollen Drohnen eingesetzt werden, an dieser Stelle ist die Entwicklung am Beispiel der Ukraine exemplarisch skizziert. Für die hier bearbeitete Fragestellung ist die Verfügbarkeit von Drohnen für terroristische Gruppen der entscheidende Faktor.

Drohnen gibt es schon lange – sie wurden für die Aufklärung schon im Vietnamkrieg eingesetzt. Ihre heutige „Durchschlagskraft“ resultiert auch aus ihrer präzisen Steuerung. Zudem sind sie deutlich günstiger als Raketen. Die sogenannten Kamikaze-Drohnen gelten im Ukraine-Krieg als „Gamechanger“. Zudem 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.

Die strategische Initiative der Ukraine, die „Unmanned Systems Force“ einzurichten, eine eigene Abteilung für autonome Systeme und hier insbesondere Drohnen, unterstreicht die entscheidende Rolle dieser unbemannten Systeme in modernen Kampfszenarien.

Was zu Beginn des Ukraine-Krieges noch Science-Fiction war, ist heute Realität: der massenhafte Einsatz von Minidrohnen. Seit Anfang April 2024 sind mehrere Videos in Umlauf gekommen, welche die ukrainische Taktik bei Tonerke 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 kaum bekannt war und sich aus den sogenannten „Racing Drones“²⁹ entwickelt hat. 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. FPV-Drohnen zeichnen sich gegenüber anderen Drohnen durch eine höhere Geschwindigkeit, extreme Wendigkeit und ihren niedrigen Preis aus. Die in der Ukraine eingesetzten tellergroßen Quadrocopter (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.

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*. 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 Jahr 2024 insgesamt 2 Millionen FPV-Drohnen herzustellen. (NZZ 2024)

27 Der zunehmende Einsatz von Drohnen bei Militäreinsätzen wirft ethische und rechtliche Fragen auf.

28 The Global Impact of Ukraine's Drone Revolution on Military Forces; March 26, 2024;
<https://www.karveinternational.com/insights/the-global-impact-of-ukraines-drone-revolution-on-military-forces>

29 Drone Racing; Robotics and Perception Group, University of Zurich, Switzerland.
https://rpg.ifi.uzh.ch/research_drone_racing.html

Die Ukrainer*innen haben ihrerseits die Spendenorganisation *United24* ins Leben gerufen, die in Zusammenarbeit zwischen dem Präsidialamt und der Initiative „Armee der Drohnen“ organisiert wird. Gemeinsam sammeln sie Spenden aus der Wirtschaft und von Privatleuten, um mit dem Geld Drohnen für die ukrainische Armee zu finanzieren. Bei etlichen der Drohnen, die *United24* übergab, soll es sich um die ukrainische *100 Phoenix 03 Heavy UCAV* handeln. Das ist eine FPV-Kamikaze-Drohne mit größerem Gefechtskopf, an dem laut *Forbes* offenbar mehrere Pfund schwerer Sprengstoff montiert werden kann. Übergeben wurde auch der *Mavic*-Quadrokopter: Diese Quadrokopter sind auf den ersten Blick recht konventionelle und unspektakuläre rechteckige Drohnen, wie sie im kommerziellen Gebrauch üblich sind. Von ukrainischer Seite werden die *Mavic*-Quadrokopter aber seit Längerem als Waffe eingesetzt. Laut *Forbes* können sie zum Beispiel eine ein Pfund schwere Granate mit sich führen.³⁰

Im Ukraine-Krieg kommen zahlreiche Kamikaze-Drohnen zum Einsatz, unter anderem:

- Die *Switchblade 300* ist zusammengeklappt so handlich, dass sie in jeden Rucksack passt. Sie wird mithilfe von Druckluft aus einem Rohr abgeschossen und verfügt über vier schwenkbare Flügel, die im Flug wie Springmesser herauskatapultiert werden. Sie hat eine Reichweite von knapp zehn Kilometern und kann einige Zeit über ihrem Einsatzgebiet verweilen, ehe sie im Sturzflug angreift. Der Gefechtskopf der *Switchblade 300* hat eine Sprengladung, die einer 40-Millimeter-Granate entspricht.
- Das neueste Modell ist die *KH-S7*, auf den ersten Blick ein winziger Quadrokopter mit vier noch kleineren Rotoren. Laut Medienberichten ist diese FPV-Angriffsdrohne einfach zu bedienen, hat eine große Reichweite und kann vor allem eine hohe „Nutzlast“ tragen. Demnach kann die neu entwickelte Drohne eine „Standardnutzlast“ von einem Kilogramm bis zu sieben Kilogramm weit transportieren, obwohl sie geschätzt nur etwa zwei Handbreit ist. Bisherige Quadrokopter konnten bis zu 0,5 kg Sprengstoff transportieren, also entsprechend kleine Granaten mit einem Gewicht zwischen 200 und 450 Gramm.

2.5.2 Rolle von Drohnen bei zukünftigen terroristischen Angriffen

2021 wurde ein Fachartikel zur Rolle von Drohnen bei zukünftigen terroristischen Angriffen veröffentlicht³¹ (PLEDGER 2021). Pledger³² stellt fest, dass die zunehmende kommerzielle und private Nutzung von Drohnen zu einer rasanten Entwicklung ihrer Fähigkeiten geführt hat. Zu den kommerziellen Verbesserungen gehören eine größere Reichweite, Geschwindigkeit, Nutzlastkapazität und neue Steuerungs- und Koordinierungsmethoden. Wie bei den meisten Technologien mit ziviler und militärischer Nutzung haben sich Terroristen Drohnen zunutze gemacht, um Angriffe gegen eine Vielzahl von Zielen durchzuführen. Die Bekämpfung von Drohnenangriffen durch Terroristen ist bereits problematisch und wird mit der zunehmenden legalen Nutzung und den verbesserten Fähigkeiten von Drohnen noch schwieriger werden – obwohl auch Fortschritte bei der Drohnenabwehr gemacht werden.

Drohnen ermöglichen es Terroristen, mehrere Anschläge fast gleichzeitig auszuführen, wodurch sich ihre Wirkung schnell vergrößert. Die massive Zunahme der Anzahl und der Fähigkeiten von Drohnen sowie der einfache Zugang und die leichte Bedienung von Drohnen zu niedrigen Kosten wird sie zur Waffe der Wahl für zukünftige Terroristen machen.

30 „Schwere Bomber-Drohnenflotte“: Ukraine zeigt imposantes Waffen-Arsenal, Stand: 28. Juli 2023, <https://www.merkur.de/politik/aerorozvidka-r-18-ukraine-offensive-kamikaze-drohnen-flotte-united-24-quadrocopter-92423156.html>

31 Auch früher wurde schon vor dem Einsatz von Drohnen durch Terrorgruppen gewarnt: z. B. Noel Sharkey, 21 J.L. Inf. & Sci. 140 (2011-2012); Automating Warfare: Lessons Learned from the Drones; Paul Scharre, 2018

32 Major Thomas G. Pledger ist Infanterieoffizier in der U.S. Army National Guard.

Die meisten Terroranschläge der Vergangenheit wurden mit Waffen und Materialien verübt, die leicht erhältlich waren. In den Vereinigten Staaten haben die Täter der bedeutendsten Anschläge der letzten 30 Jahre, des Bombenanschlags in Oklahoma City und der Anschläge vom 11. September 2001, den Großteil der benötigten Materialien legal erworben. Neben Material benötigen terroristische Gruppen auch Einzelpersonen, um ihre Anschläge auszuführen. Viele Gruppen führen ihre Anschläge in der Erwartung durch, dass sich ihre Mitglieder während des Anschlags opfern, indem sie entweder gefasst oder getötet werden. Der Einsatz von Drohnen kann es einem Einzelnen oder einer kleinen Gruppe jedoch ermöglichen, mehrere Anschläge ohne Selbstopferung durchzuführen.

Zwischen 1994 und 2018 fanden mehr als 14 geplante oder versuchte Terroranschläge mit Hilfe von Drohnen aus der Luft statt. Einige davon waren:

- 2013 wurde ein geplanter Angriff von Al-Qaida in Pakistan mit mehreren Drohnen durch die örtlichen Strafverfolgungsbehörden gestoppt;
- 2014 begann der Islamische Staat, kommerzielle und selbstgebaute Drohnen bei Militäroperationen in Irak und Syrien in großem Umfang einzusetzen;
- im August 2018 wurden zwei mit Sprengstoff beladene, GPS-gesteuerte Drohnen bei einem gescheiterten Attentatsversuch auf den venezolanischen Präsidenten Maduro eingesetzt;
- im Januar 2018 griff ein Schwarm von 13 selbstgebauten Drohnen zwei russische Militärstützpunkte in Syrien an.

Nicht nur die Rüstungsindustrie, sondern auch die rasche Verbreitung von zivilen Drohnen hat einen Markt geschaffen, der die technologische Verbesserung von Drohnen in absehbarer Zukunft weiter vorantreiben wird. Insgesamt werden diese Verbesserungen Reichweite, Tragfähigkeit und Gesamtfähigkeiten von Drohnen erhöhen, wodurch sie sowohl tödlicher als auch schwieriger zu bekämpfen sein werden.

Zu den derzeitigen kommerziellen Verwendungszwecken von Drohnen gehören die Inspektion von Dächern mit Wärmebildkameras, die Vermessung großer Flächen, die Ausbringung von Chemikalien auf landwirtschaftlichen Feldern und die Auslieferung von Produkten. Zu den nichtkommerziellen Anwendungen gehört unter anderem die private Nutzung.

Heute arbeiten viele moderne Drohnen im 2,4- bis 5-GHz-Funkfrequenzband, was eine direkte Steuerung der Drohne aus größerer Entfernung ermöglicht. Die Qualität der computergestützten Pilotensoftware moderner Drohnen hat sich dramatisch verbessert. Viele Plattformen verfügen über selbstkorrigierende Autopilot- und Sichtfunktionen, die eine Person oder ein Objekt verfolgen können. Diese Autopilot-Funktionalität umfasst die Fähigkeit, Flugrouten zu planen, die die Drohne unabhängig von der direkten Steuerung durch den Piloten ausführen kann.

Eine der jüngsten Entwicklungen in der Drohnentechnologie ist die Fähigkeit, mehrere Drohnen gleichzeitig zu koordinieren. Diese sogenannten „Schwärme“ können die Verteidigungskapazitäten überwältigen. Die Fähigkeit von Schwärmen, sich selbst zu organisieren und zu koordinieren, wird sich mit zunehmender Rechenleistung weiter verbessern.³³

Terroristische Gruppen (IS, Hisbollah, Huthi etc.) setzen schon lange Drohnen zur Durchführung und Koordinierung von Anschlägen ein. Die rasanten Verbesserungen in der Drohnentechnologie und ihre zunehmenden Fähigkeiten werden terroristischen Gruppen zahlreiche neue Möglichkeiten bieten.

³³ Hier muss allerdings zwischen Schwärmen als „brute force“ und koordinierten Schwärmen unterschieden werden. Zweitere funktionieren bisher eher schlecht und bergen die Gefahr von „friendly fire“; vgl. Jutta Weber. Autonomous Drone Swarms and the Contested Imaginaries of Artificial Intelligence. *Digital War*, 5/2024, 146-149. <https://doi.org/10.1057/s42984-023-00076-7>

Die Fähigkeit einer kleinen Gruppe oder einer Einzelperson, mehrere Anschläge gleichzeitig durchzuführen, und zwar zu relativ geringen Kosten und aus großer Entfernung, wird dazu führen, dass Drohnen bei künftigen Terroranschlägen als Haupttaktik eingesetzt werden. Der Vorteil liegt beim Angreifer. (PLEDGER 2021)

3 Das Zwischenlager Brokdorf

Das Brennelemente-Zwischenlager Brokdorf befindet sich auf dem Gelände des AKW Brokdorf nahe Glückstadt an der Elbe in Schleswig-Holstein. Der Betrieb des AKW endete am 31. Dezember 2021. Das Zwischenlager wurde am 5. März 2007 mit der Einlagerung des ersten Behälters (Typ CASTOR V/19) in Betrieb genommen. Die Genehmigung ist auf 40 Jahre befristet, gerechnet ab Einlagerung des ersten Behälters, d. h. bis 2047. Seit dem 1. Januar 2019 ist die Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH (BGZ) für das Brennelemente-Zwischenlager Brokdorf verantwortlich. Das Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein (MEKUN) ist die zuständige Aufsichtsbehörde.

Am 30. September 2024 waren bereits 60 Castorbehälter mit Brennelementen aus dem endgültig abgeschalteten AKW Brokdorf eingelagert. In einer ersten von insgesamt sieben Kampagnen wurden Ende März 2023 fünf Behälter mit abgebrannten Brennelementen aus dem AKW Brokdorf in das Zwischenlager umgelagert. Die Einlagerungen sollen Ende 2025 abgeschlossen sein. (BGZ 2023b)

Mit der 7. Änderungsgenehmigung vom 23. März 2024 ist die Aufbewahrung von sieben Behältern der Bauart CASTOR HAW28M mit hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung in Sellafield (UK) gestattet.³⁴ Die Rückführung wird erst 2026 erwartet. (BASE 2024a)

Wenn alle Behälter mit Brennelementen aus dem AKW Brokdorf und die sieben Behälter mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung eingelagert sind, werden dort rund 84 Behälter eingelagert sein. Das Zwischenlager hat 100 Stellplätze. (BGZ 2023b)

Die BGZ hat am 15. Juni 2023 über aktuelle Vorhaben am Standort informiert. Im Mittelpunkt stand dabei die Nachrüstung des Brennelemente-Zwischenlagers, die im Wesentlichen den Bau einer zusätzlichen Schutzwand umfasst. (siehe Kapitel 1) Nach der Erteilung der atomrechtlichen Genehmigung durch das BASE im Juli 2022 und der Baugenehmigung durch den Kreis Steinburg im März 2023 haben die Bauarbeiten begonnen. Der Schwerpunkt dabei lag zunächst auf der Errichtung eines neuen Wachgebäudes für den Objektsicherungsdienst. Darüber hinaus wurde ein mobiler Durchfahrtschutz eingerichtet. Baubeginn für die Schutzwand am Zwischenlager ist voraussichtlich im Jahr 2024. Auch eine neue Zaunanlage ist geplant. (BGZ 2023a)

3.1 Zwischenlagergebäude Brokdorf

Das Lagergebäude ist ca. 93 m lang, ca. 27 m breit und ca. 23 m hoch. Der Lagerbereich verfügt über eine Gesamtfläche von ca. 1.650 m². Hiervon werden rund 950 m² als effektive Lagerfläche genutzt. Im Lagergebäude des Brennelemente-Zwischenlagers befinden sich der Empfangs- und der Lagerbereich sowie Teile des Betriebsbereiches. Das Gebäude des Brennelemente-Zwischenlagers Brokdorf wie die anderen Brennelemente-Zwischenlager in Norddeutschland in Brunsbüttel, Grohnde, Krümmel, Lingen und Unterweser sind nach dem STEAG-Konzept erbaut (Abbildung 1).

³⁴ Die Energieversorgungsunternehmen hatten abgebrannte Brennelemente in Großbritannien und Frankreich wiederaufarbeiten lassen. Sie sind vertraglich verpflichtet, die daraus resultierenden Abfälle wieder zurückzunehmen.

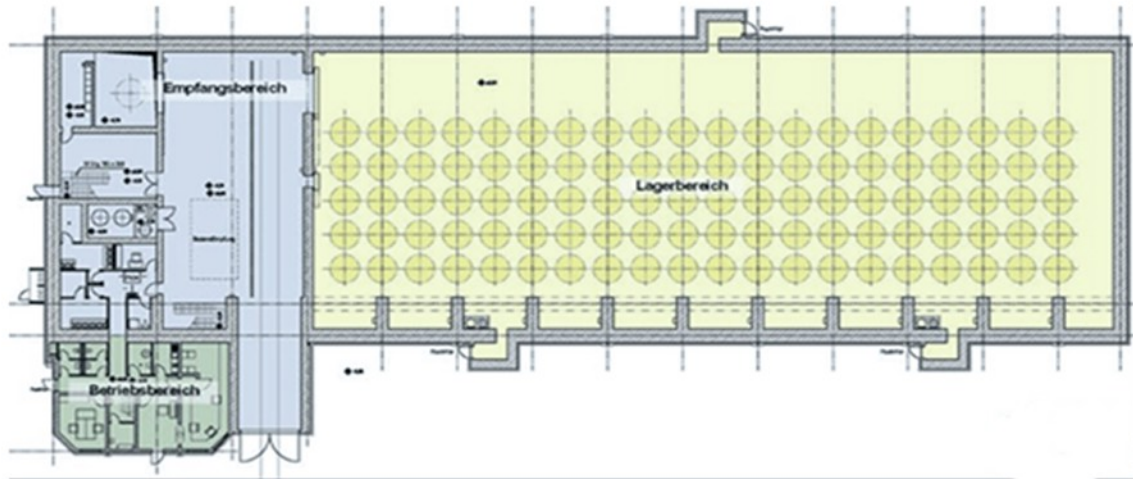


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Lagergebäudes nach dem STEAG-Konzept

Die Gebäude nach STEAG-Konzept haben eine Wandstärke von ca. 1,20 m und eine Deckenstärke von 1,30 m. (BASE 2020a)

3.2 Behälter und Inventar des Zwischenlager Brokdorfs

In Brokdorf wurden bisher nur Behälter des Typs CASTOR V/19 eingelagert. Die Einlagerung von Wiederaufbereitungsabfällen in Behältern des Typs CASTOR HAW28M ist für 2026 geplant. Auftragsgemäß werden im Folgenden nur die bereits eingelagerten Behälter des Typs CASTOR V/19 betrachtet.

Die Behälter der CASTOR-V-Baureihen sind die am meisten eingesetzten Castorbehälter. Für Druckwasserreaktor-Brennelemente wird der CASTOR V/19 verwendet. Mehr als 440 CASTOR-V/19-Behälter sind in den AKW Biblis, Brokdorf, Emsland, Grafenrheinfeld, Grohnde, Isar, Neckarwestheim, Philippsburg und Unterweser bereits in Castorbehälter geladen und in den dortigen Zwischenlagern sowie in den zentralen Zwischenlagern Ahaus und Gorleben eingelagert worden. (GNS 2024a)

Die Behälter bestehen aus einem monolithischen Körper aus Sphäroguss, einem Tragkorb zur Aufnahme der Brennelemente und dem übereinander angeordneten Verschluss-System, bestehend aus Primär- und Sekundärdeckel sowie einer Schutzplatte. An der äußeren Mantelfläche des Behälterkörpers sind zur Verbesserung der passiven Wärmeabfuhr Radialrippen eingearbeitet. Primär- und Sekundärdeckel sind aus Edelstahl gefertigt und werden mit dem Behälterkörper fest verschraubt. Er ist mit max.19 Druckwasserreaktor-Brennelementen (Länge max. 4.950 mm, Kantenlänge max. 233 mm) beladen. Die Gesamtwärmeleistung beträgt 39 kW, die Gesamtaktivität 1.900 PBq. Das Behältergewicht beträgt leer etwa 108 t.

Abmessung des Behälters in Lagerkonfiguration sind:

- | | |
|----------------------|--------|
| • Gesamthöhe | 594 cm |
| • Außendurchmesser | 244 cm |
| • Schachthöhe | 503 cm |
| • Schachtdurchmesser | 148 cm |
| • Wanddicke | 42 cm |

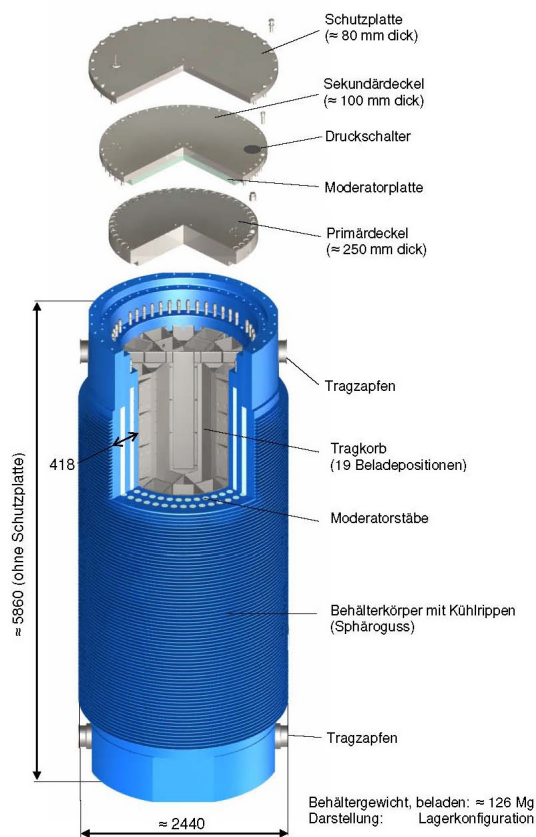


Abbildung 2: Behältertyp CASTOR V/19

Die Transport- und Lagerbehälter der Bauart CASTOR V/19 sind mit maximal 19 Druckwasserreaktor-Brennelementen des Typs beladen. Laut Genehmigung können Uran-Brennelemente und Mischoxid-(MOX)-Brennelemente darin aufbewahrt werden.

Die Uran-Brennelemente sind durch die folgenden Spezifikationswerte beschrieben:

- maximale Schwermetallmasse: 560 kg
- maximale Anfangsanreicherung: 4,45 % U-235
- maximaler gemittelter Abbrand: 55 GWd/Mg Schwermetall oder bis 65 GWd/Mg Schwermetall bei Hochabbrand-BE

Die MOX-BE sind durch die folgenden Spezifikationswerte beschrieben:

- maximale Schwermetallmasse: 550,5 kg
- Spaltstoffgehalt (Pu-fiss + U-235): maximal 5,42 %
- maximaler gemittelter Abbrand: 55 GWd/Mg Schwermetall

Die Gesamtaktivität des einzelnen Behälters beträgt maximal $5,5 \cdot 10^{17}$ Bq.

Die aus dem Behälterinventar resultierende Zerfallswärmeleistung beträgt maximal 39 kW.
(BFS 2003a)

Im AKW Brokdorf waren Abbrände bis 60 GWd/t und es wurden insgesamt 272 MOX-Brennelemente eingesetzt.

Tabelle 2: Inventar eines exemplarischen CASTOR V/19

Radionuklid	Aktivität in Bq*10 ¹⁴
Am-241	5,7
Am-243	0,3
Cm-243	0,2
Cm-244	55,6
Cs-134	278,2
Cs-137	591,3
Eu-154	59,2
Eu-155	25,0
Pm-147	153,5
Pu-238	33,0
Pu-239	1,3
Pu-240	2,8
Pu-241	543,8
Ru-106	254,2
Sb-125	13,0
Sr-90	377,6

3.3 Auswirkung eines gezielten Flugzeugabsturzes

Im Behördengutachten zum gezielten Absturz eines Verkehrsflugzeugs wird von einer *Boeing 747-400* bzw. von einem *Airbus A340-600* ausgegangen. Die mechanischen Analysen im Behördengutachten ergaben, dass das Lagergebäude für die betrachteten Flugzeugtypen und die gewählten Absturzgeschwindigkeiten und -winkel standsicher bleibt. Das Flugzeug dringt in bestimmten Aufprallkonfigurationen lokal begrenzt teilweise in das Gebäude ein.³⁵

Die unterstellte maximale Aufprallfluggeschwindigkeit von 175 m/s (630 km/h) erscheint relativ gering. Die Geschwindigkeit wird zwar geringer als die maximale Reisegeschwindigkeit des Flugzeugs sein, aber für den Terroranschlag auf das World Trade Center im September 2001 wurden Geschwindigkeiten von 210 bzw. 264 m/s abgeschätzt. Insofern ist eine stärkere Zerstörung des Gebäudes möglich als von der Behörde unterstellt wurde.

Auf Grund der starken Armierung und der Dicke von Dach und Wänden sowie wegen des großen Massenunterschiedes von Flugzeug und Zwischenlagergebäude wird das Gebäude zwar nicht vollständig zerstört, aber es werden erhebliche Schäden am Gebäude entstehen.

³⁵ Im Folgenden werden die Auswirkungen eines Absturzes dieser Flugzeugtypen betrachtet, auch wenn für den *Airbus A-380* ein Versagen der Barrierewirkung möglich ist, da ein erheblich größerer mechanischer Impuls wirkt. Als Folge sind nicht nur erhebliche direkte mechanische Belastungen von gelagerten Behältern möglich, sondern es würde auch eine sehr viel größere Menge Kerosin in den Lagerbereich eindringen.

Da die Baustruktur des Zwischenlagers dem Aufprall des Flugzeugs nicht vollständig standhält, resultiert eine mechanische Belastung der Behälter durch:

- Aufprall von Gebäudetrümmern auf den Deckelbereich
- Aufprall steifer Massen des Flugzeuges auf den Deckelbereich
- Umkippen aus der vertikalen Lagerposition

Ein vollständiger Integritätsverlust der Behälter ist bei den unterstellten mechanischen Belastungen nicht zu erwarten. Die Freisetzung aus dem Behälter erfolgt ausschließlich über den Dichtungsbereich. Als Folge der mechanischen Belastung des Deckelsystems der Behälter wird davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der Leckrate der Behälterdichtung möglich ist.

Aufgrund der nicht erfolgten Gebäudeauslegung gegen Flugzeugabsturz dringen nach dem Aufprall eines Verkehrsflugzeuges große Mengen Kerosin in den Lagerbereich ein. Zum einen geschieht dies durch Risse an Wänden und Dach aufgrund der teilweisen Zerstörung der Gebäudestruktur, zum anderen durch die vorhandenen Lüftungsöffnungen.

Dadurch ist ein Kerosinbrand möglich, der eine deutlich höhere thermische Belastung der Behälter verursachen kann als jene, die für „Standard“-Brände bei Transportunfällen unterstellt werden. Laut IAEA-Richtlinien muss ein Behälter einem Brand mit einer mittleren Flammentemperatur von 800 °C für 30 Minuten standhalten. Ein deutlich längerer Brand mit einer Flammentemperatur von 1.000 °C ist jedoch nach Absturz eines Verkehrsflugzeugs zu erwarten.

Große Verkehrsflugzeuge haben ihren Treibstoff auf mehrere Tanks verteilt, die sich u. a. in den Tragflächen, aber im Wesentlichen im Rumpf befinden. Ca. 90 % des Treibstoffs einer *Boeing 747* befindet sich in Tanks, die über eine Spannweite von ca. 40 m und ca. 14 m Breite verteilt sind. Bei dem Aufprall der Maschine gegen das Zwischenlager wird sich vermutlich ein Teil des Kerosins fein in der Luft verteilen, gefolgt von einer Durchzündung des explosiven Kerosindampf-Luft-Gemisches. Der Rest wird auslaufen und sich im Zwischenlager sammeln. Durch Trümmerbildung auf dem Boden und das Auslaufverhalten des Kerosins aus dem Flugzeug muss von einer Konzentrierung des Kerosins auf einer Teilfläche des Lagers ausgegangen werden. Dadurch kann sich eine hohe Kerosinschicht bilden und der Brand lange andauern. Dadurch entstehen hohe thermische Belastungen für die Behälter, die zu einem Dichtungsversagen der Behälter und anschließenden radioaktiven Freisetzungen führen.

In UBA (2002) wurde angenommen, dass ca. 50 % der max. Treibstoffmenge eines Verkehrsflugzeuges in das Zwischenlagers eindringt und bei einem anschließenden Brand verbrennt. Für eine *Boeing B-747* oder einen *Airbus A-340* ergibt sich eine Brennstoffmenge von 100 m³ Kerosin.³⁶ Ein Brand mit einer größeren Brennstoffmenge von 150 m³ (das wären beispielsweise ca. 50 % des Treibstoffs eines *Airbus A-380*) kann nicht ausgeschlossen werden.

Laut Urteil zur Aufhebung der Genehmigung des Zwischenlagers Brunsbüttel (siehe Seite 18) weist die Genehmigung ein entscheidendes Ermittlungs- und Bewertungsdefizit auf³⁷: Bei der Ermittlung des Verlaufs des Brandgeschehens hinsichtlich der Menge des durch Aufprall eines Flugzeuges in das Lager eingetragenen Kerosins aus den Flugzeugtanks wurden nur 80 % der möglichen Fälle statt der üblichen 95 % der Fälle betrachtet. (OVG 2013) Insbesondere die gravierendsten Fälle/Szenarien mit

³⁶ Diese Kerosinmenge berücksichtigt 50 % Verluste durch verschiedene Faktoren.

³⁷ Da die gleichen Annahmen für alle Standort-Zwischenlager verwendet wurden, ist dieses Defizit auch für das Zwischenlager Brokdorf relevant.

Brandentwicklung durch ausgetretenes Kerosin wurden ausgeblendet. Dies ist besonders gravierend, da es ab einer bestimmten Branddauer zum Versagen von Behälterdichtungen führt.³⁸

Von der Behörde wird aufgrund der Vernachlässigung der schwerwiegendsten Fälle nur das Eindringen von maximal 32 m³ Kerosin in den Lagerbereich unterstellt. Dies ist gemessen an der Gesamtkerosinmenge im Flugzeug und die Verteilung auf verschiedene Tanks relativ wenig.

Der größte Tank der *Boeing 747* hat eine Kapazität von knapp 65 m³, die beiden nächstgrößeren Tanks fassen je knapp 48 m³ Kerosin. Es ist nicht plausibel, dass nur der Teilinhalt von genau 32 m³ eines größeren Tanks in das Gebäude gelangen soll. Bei einer Flügelspannweite von 64 m erlaubt der Abstand der beiden äußeren Tanks zueinander in Bezug auf die Abmaße theoretisch das Eindringen des gesamten Kerosins in das Lagergebäude. Auch die von der Behörde angenommene Branddauer ist anhand der Fakten nicht nachzuvollziehen.³⁹

Infolge eines Flugzeugabsturzes entsteht ein Brand von großem Ausmaß, in dessen Folge mit einer erheblichen Freisetzung von radioaktivem Material gerechnet werden muss. Daher sind umfangreiche Maßnahmen unter hohen Sicherheitsanforderungen erforderlich, um den Brandherd unter diesen Umständen unter Kontrolle zu bringen. Es ist nicht auszuschließen, dass die Branddauer nur durch die vorhandene Brennstoffmenge determiniert wird. Insofern muss von einer Branddauer von mehreren Stunden ausgegangen werden. Die Branddauer ist entscheidend für das Dichtungsversagen sowie den Druck und die Temperatur im Innenraum des Behälters und damit für die Höhe der Freisetzung.

Im Zwischenlager Brokdorf beträgt die Lagerfläche rund 950 m². Allein für die Lagerbehälter ist bei voller Belegung mit 80 Behältern eine Fläche von ca. 375 m² abzuziehen, so dass nur noch eine Fläche von 575 m² für die Ausbreitung des Kerosins zur Verfügung steht. Trümmer werden mit einiger Wahrscheinlichkeit dafür sorgen, dass keine gleichmäßige Verteilung im gesamten Lagergebäude stattfindet. Die Gebäudetrümmer werden zudem die Brandfläche verringern und somit die Branddauer erhöhen. Der tabellarische Wert der Abbrandrate in Gebäuden beträgt für Kerosin 1,025 mm/min.⁴⁰

Nach einer bestimmten Branddauer ist von einem Versagen des Deckeldichtungssystems auszugehen. Welche Auswirkung eine Alterung der Dichtungen auf die thermische Versagensgrenze hat, ist noch nicht untersucht.

Die Auswirkung einer möglichen mechanischen Belastung des Behälters durch die mechanischen Auswirkungen des Flugzeugabsturzes verringert die Versagenszeit der gealterten Dichtungen und erhöht die mögliche radioaktive Freisetzung. Auch die Schrauben und andere Komponenten, die für die Befestigung der Deckel wichtig sind, werden altern und tragen somit möglicherweise durch einen Flugzeugabsturz zu einer Erhöhung der Leckagerate der Dichtungen bei. Es ist zwar nicht für alle, aber für einige der gelagerten Behälter ein mechanischer Lasteintrag zu unterstellen, der zu einer nennenswerten Dichtungsminderung führt.

38 Das Vorgehen der Behörde ist gerade bei Vorhandensein eines Schwellenwertes („Cliff-Edge-Effektes“) wissenschaftlich nicht nachvollziehbar. Dieses Vorgehen wäre nur dann gerechtfertigt, wenn bereits der Wert für 80 % der Fälle oberhalb der Schwelle für Dichtungsversagen läge oder ein Dichtungsversagen auch deutlich oberhalb des Wertes für 100 % nicht erreicht würde.

39 Aus den angegebenen Parametern für die Abbrandrate (2 mm/min) und die Branddauer von 17 Minuten ergibt sich eine Kerosinschichthöhe von 34 mm. Bei 32 m³ Kerosin muss dieses auf eine Fläche von 941 m² verteilt sein. Der Lagerbereich in Brunsbüttel hat eine Fläche von 1.350 m², wobei die Lagerbehälter nur auf eine Fläche von 770 m² verteilt sind (Bruttofläche). Es ist zu berücksichtigen, dass sich die Höhe des Kerosinspiegels innerhalb der betroffenen Fläche durch die gelagerten Behälter und entstandenen Trümmer erhöht.

40 Die lineare Abbrandrate gibt die Höhe der in der Zeiteinheit abbrennenden Schicht an. Der hier verwendete tabellarische Wert ist geringer als der von der Behörde verwendete Wert, was zu einer längeren Branddauer führt.

Durch das mit hoher Temperatur über einen bestimmten Zeitraum abbrennende Kerosin und andere Brandlasten werden auch die Baustrukturen aufgeheizt. Daher ist die von den Baustrukturen reflektierende Wärme zu berücksichtigen. Die gelagerten Behälter heizen sich ebenfalls auf und strahlen Wärme zu den jeweils benachbarten Behältern ab. Im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf der Freisetzungen ist von Bedeutung, dass die Temperatur in der Umgebung der betroffenen Behälter – im Gegensatz etwa zu einem Brandtest, dem ein einzelner Behälter unterzogen wird – auch nach Ende des Brandes deutlich erhöht bleibt und somit keine Abkühlung der Behälterwände und des Dichtungsbereiches über die Behälteroberfläche erfolgt.

Bei Betrachtung der Lagerfläche minus der Fläche der gelagerten Behälter und bei der Annahme von einer weiteren Reduzierung der Fläche durch Trümmer würden etwa alle Behälter im Brandbereich stehen. Das Kerosin würde rund 15 bis 20 cm hoch stehen. So wäre ein Brand von mindestens 3 Stunden möglich. In UBA (2002) wird davon ausgegangen, dass ein Versagen der metallischen Dichtungen im Temperaturbereich zwischen 400 °C und 500 °C erfolgt. Für die Berechnung der Freisetzungsmengen wurde in UBA (2002) abgeschätzt, dass bei einer Branddauer von drei Stunden die Hälfte der Dichtungen der auf der Brandfläche befindlichen Behälter versagen. Wie in Kapitel 1 dargelegt, sind alterungsbedingte Schäden an Behälterkomponenten nicht auszuschließen. Aus diesen können erhöhte Freisetzungen in Unfallsituationen resultieren.

Die Branddauer hat auch entscheidende Bedeutung für die Behälterinnentemperatur, die wiederum exponentielle Auswirkungen auf die möglichen Freisetzungen hat.

Die Auswirkung eines Unfalles wird überwiegend durch die relativ flüchtigen Cäsiumisotope bestimmt. Die Freisetzungen von radioaktiven Stoffen sind bei höheren Temperaturen deutlich höher als bei Normaltemperatur. Das Alkalimetall Cäsium 137 schmilzt bereits bei einer Temperatur von 28 °C und beginnt bei höheren Temperaturen zu verdampfen. Die Konzentration des gasförmigen Cs-137 in der Behälteratmosphäre ist daher stark abhängig von der Innentemperatur des Behälters. Die Alterungseffekte an den Hüllrohren und der Inventare sowie die Unregelmäßigkeiten im Betrieb (Oxiddickschichten) macht eine Freisetzung von Cs-137, die nur durch den Dampfdruck des Cäsiums bestimmt ist, wahrscheinlich.

Für die Berechnung der Cs-137-Freisetzung wird unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Cäsium-Konzentration in der Behälteratmosphäre die Freisetzung für eine gemittelte Temperatur in der Behälteratmosphäre von 400 °C angenommen. Die Aktivität des freigesetzten Cs-137 aus einem Behälter ergibt so ca. $5 \cdot 10^{12}$ Bq und für die bei diesem Fall undicht gewordenen Behälter (40) insgesamt $2 \cdot 10^{14}$ Bq.⁴¹

3.3.1 Ermittlung der potenziellen Strahlenbelastungen

Für die Berechnung der potenziellen radiologischen Auswirkungen wurde das Ausbreitungsprogramm HOTSPOT (Version 3.1.2.) verwendet.⁴² 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 Tabelle 3 sind die Ergebnisse für die ermittelte effektive Dosis nach 7 Tagen aufgeführt.

41 Unter den 84 erwartungsgemäß gelagerten Behältern sind sieben Behälter mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung. Hier wird vereinfacht unterstellt, dass 50 % der 84 Behälter 40 Behältern des Typs CASTOR V/19 entsprechen.

42 Dieses Programm wurde im renommierten US-amerikanischen Lawrence Livermore National Laboratory entwickelt. Es dient zur Ermittlung orientierender Werte.

Tabelle 3: Strahlendosen in 50 bis 20.000 m Entfernung nach Flugzeugabsturz auf Zwischenlager Brokdorf

Entfernung (m)	Effektive Dosis nach 7 Tagen (mSv)
50	14.000
100	2.900
200	640
300	270
500	92
1.000	23
10.000	0,39
20.000	0,14

In Windrichtung sind folgende Konsequenzen möglich:

- Der Eingreifrichtwert von 100 mSv für eine Evakuierung wird bis in eine Entfernung von rund 500 m überschritten. Bis in diese Entfernung müsste die Bevölkerung evakuiert werden.
- Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ wird ab einer effektiven Dosis von 10 mSv in 7 Tagen angeordnet. Diese kann bis etwa 15 km Entfernung auftreten.
- Noch in 200 m Entfernung zum Zwischenlager treten Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten, mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen haben.
- In der direkten Umgebung des Zwischenlagers (bis 100 m) treten Strahlendosen auf, die tödlich sein könnten.

3.3.2 Ermittlung der potenziellen Cs-137-Bodenkontaminationen

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

Tabelle 4: Cs-137-Bodenkontaminationen nach Flugzeugabsturz auf das Zwischenlager Brokdorf

Entfernung (m)	Cs-137-Bodenkontamination (kBq/m ²)
50	3,6 E7
100	7,3 E6
500	2,1 E5
1.000	50.000
2.000	12.000
10.000	580
20.000	180

Aus den ermittelten Ergebnissen wird deutlich, dass folgende Auswirkungen in Windrichtung auftreten:

- 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 2 km 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. 180 kBq/m² abgeschätzt, so dass derartige Maßnahmen mindestens bis zu dieser Entfernung erforderlich würden.

3.4 Auswirkung eines Beschusses mit panzerbrechender Waffe

Ergebnis einer Studie der Genehmigungsbehörde

Zunächst werden die Ergebnisse einer Studie der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) zu den radiologischen Folgen nach einem Hohlladungsbeschuss im Standortzwischenlager Unterweser auf einen CASTOR® V/19 dargestellt. (GRS 2003) Auf dieser Studie beruht die Genehmigung für das baugleiche Zwischenlager Unterweser. Diese 2003 veröffentlichte Studie beruht auf Beschussversuchen aus dem Jahr 1992. Es wurde in der Aufhebung der Genehmigung für Zwischenlager des Brunsbüttel festgestellt, **dass die heutzutage infolge eines potenziellen Hohlladungsbeschusses auftretenden Strahlendosen deutlich höher sind.**

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.⁴³

Der maximale Wert der effektiven Dosis für die nächstgelegene Wohnbebauung in einer Entfernung von 800 m wird im GRS-Gutachten mit 213 mSv angegeben. Laut GRS-Berechnung hat sich für die ungünstige Wetterkategorie⁴⁴ in einer Entfernung von 1 km eine Strahlenbelastung von 190 mSv und in einer Entfernung von 2 km ein Wert von 127 mSv ergeben. Eine Person, die sich näher am Zwischenlager 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.⁴⁵ Personen würden den Hauptanteil der Dosis durch Inhalation der radioaktiven Stoffe unmittelbar nach dem potenziellen Terroranschlag, also vor einer möglichen Evakuierung, erhalten.

43 Der Notfallschutz hat bezüglich der stochastischen Effekte das Ziel, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens zusätzlicher Krebs- und Leukämiefälle durch eine Strahlenexposition der Bevölkerung mithilfe geeigneter Maßnahmen so gering wie möglich zu halten. Dabei muss allerdings vermieden werden, dass es aufgrund der Durchführung der Maßnahmen zu unakzeptablen Nachteilen für bestimmte Bevölkerungsgruppen kommt.

44 Die Diffusionskategorie gibt das Maß der Luftturbulenzen an. Bei gleicher Freisetzungsmenge sind die radiologischen Folgen abhängig von den Wetterbedingungen während der Ausbreitung der radioaktiven Stoffe. Der „ungünstigen“ Wetterlage ist die stabile Wetterdiffusionskategorie F zuzuordnen.

45 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.

Diese Dosis erhält die in Ausbreitungsrichtung stehende Person bereits wenige Minuten nach erfolgtem Beschuss.⁴⁶

Wenn die Ermittlung der Freisetzung durch Berücksichtigung eines leistungsstärkeren Hohlladungsgeschosses 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.

3.4.1 Potenzielle Strahlenbelastungen

Im Folgenden werden die möglichen radiologischen Auswirkungen eines Beschusses mit einem Hohlladungsgeschoss aus einer panzerbrechenden Waffe auf einen gelagerten Behälter des Typs CASTOR V/19 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 und dem Zwischenlager freigesetzt und breitet sich in der Atmosphäre aus. Da ein Teil der freigesetzten Partikel lungengängig ist, können sie bei Menschen durch Inhalation zu einer erheblichen Strahlenbelastung führen. Weiterhin können die abgelagerten Radionuklide zu Strahlenbelastungen aus Bodenstrahlung führen.

In dieser Stellungnahme erfolgte eine abschätzende Berechnung 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, der mit einem liegenden Kegelstumpf beschrieben werden kann. Aus geometrischen Überlegungen leitet sich ab, dass in diesem Raumbereich etwa 6 % des Brennstoffs des Behälters zerstäubt werden. Weiterhin wird angenommen, dass ein Anteil von 10 % des zerstäubten Brennstoffes aus dem Behälter und Zwischenlager in die Atmosphäre freigesetzt wird.

In der folgenden Tabelle sind die entsprechenden Freisetzungsmengen dargestellt.

Tabelle 5: Freisetzungsmenge nach Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe auf einen CASTOR V/19

Radionuklid	Aktivität (Bq)
Am-241	3,40 E+12
Cm-244	2,00 E+13
Cs-134	1,70 E+14
Cs-137	3,50 E+14
Pu-238	2,00 E+13
Pu-239	8,00 E+11
Pu-240	1,70 E+12
Pu-241	3,30 E+14
Ru-106	1,50 E+14
Sr-90	2,30 E+14

⁴⁶ Z. B. bei einer Entfernung von 1.000 m und einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s nach 200 s. Die Strahlenbelastung selbst erfolgt etwa innerhalb einer Minute.

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 D⁴⁷ und eine mittlere Windgeschwindigkeit von 4 m/s durchgeführt. Niederschlag während der Freisetzung wird nicht unterstellt.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse für die ermittelte effektive Dosis nach 7 Tagen aufgeführt. In Windrichtung sind folgende Konsequenzen möglich:

- Der Eingreifrichtwert von 100 mSv für eine Evakuierung wird bis in eine Entfernung von rund 4 km überschritten.
- Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ wird ab einer effektiven Dosis von 10 mSv in 7 Tagen angeordnet. Diese kann bis in mehr als 20 km Entfernung auftreten.
- Noch in 800 m Entfernung zum Zwischenlager treten Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten, mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen haben.
- Bis in 500 m treten effektive Dosen von mehr als 4.000 mSv auf. Diese Dosiswerte sind einer 50%igen Sterbewahrscheinlichkeit zugeordnet. In größerer Nähe zum Zwischenlager oder unter anderen meteorologischen Bedingungen sind höhere Strahlenbelastungen zu erwarten.

Tabelle 6: Strahlendosen in 50 bis 20.000 m Entfernung nach Beschuss mit panzerbrechender Waffe auf einen CASTOR V/19

Entfernung (m)	Effektive Dosis nach 7 Tagen (Sv)
50	417
100	104
500	4,5
1.000	1,3
10.000	0,04
20.000	0,017

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die zu erwartenden Strahlenbelastungen für die Personen infolge eines derartigen Hohlladungsbeschusses lebensbedrohlich sind. **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.**

3.4.2 Potenzielle Cs-137-Bodenkontamination

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. Dieses relativ langlebige Radionuklid (Halbwertszeit ca. 30 Jahre) führt zu einer langfristigen Bodenkontamination. Dekontaminationen auf bebautem Gebiet sind

⁴⁷ Die Kategorie D steht für mittlere Luftturbulenzen. Wetterbedingungen mit geringeren 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 und in der Folge zu höheren Strahlenbelastungen in der Umgebung der Freisetzung.

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 1.000 m zum Zwischenlager wurde z. B. eine Cs-137-Bodenkontamination von mehr als 41.000 kBq/m² ermittelt. In der Tabelle 7 sind die Cs-137-Bodenkontaminationen in Abhängigkeit von der Entfernung aufgeführt.

Tabelle 7: Cs-137-Bodenkontaminationen nach Beschuss mit panzerbrechender Waffe auf einen CASTOR V/19

Entfernung (m)	Cs-137-Bodenkontamination (kBq/m ²)
50	2 E+7
100	4,5 E+6
500	1,6 E+5
1.000	41.000
2.000	11.000
10.000	880
20.000	300

Die ermittelten Cs-137-Bodenkontaminationen wurden den Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung gegenübergestellt. In Windrichtung sind folgende Konsequenzen möglich:

- Eine langfristige Umsiedlung der Bevölkerung ist ab einer Cs-137-Bodenkontamination von 12.000 kBq/m² erforderlich. Diese Maßnahme würde bis in eine Entfernung bis fast 2 km 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 20 km wurde eine Cs-137-Bodenkontamination von ca. 300 kBq/m² abgeschätzt, so dass derartige Maßnahmen mindestens bis zu dieser Entfernung erforderlich würden.

Ein „erfolgreich“ durchgeführter Beschuss eines gelagerten Behälters mit einer panzerbrechenden Waffe hat schwerwiegende Folgen für die im Umfeld des Zwischenlagers liegenden Gebiete.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass nach einem „erfolgreichen“ Beschuss die Bodenkontaminationen so hoch sind, dass eine langfristige Beeinträchtigung resultieren wird.

3.5 Auswirkung eines Angriffs mit Drohnen

In dieser Stellungnahme soll auftragsgemäß ein Szenario untersucht werden, in dem mit mehreren Drohnen die in Brokdorf gelagerten Behälter angegriffen werden. Diese Drohnen sollen mit Sprengstoffen und Brandbeschleuniger beladen sein, um eine erhebliche Freisetzung zu verursachen. Aufgrund der in Kapitel 2.5 dargestellten Fähigkeiten von Kamikaze-Drohnen einerseits und des rasanten Anstiegs der erzeugten Stückzahl andererseits kann ein solches Szenario nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Es geht über den Umfang dieser Stellungnahme hinaus, ein genaues Angriffsszenario für einen Angriff auf das Zwischenlager Brokdorf zu entwickeln. Zudem soll keine Anleitung für einen derartigen Angriff bereitgestellt werden.

Die verhältnismäßig dicken Mauern des Zwischenlagers würden eine erhebliche Menge an Sprengstoff erfordern, um ein Loch zu erzeugen. Durch dieses vermutlich relativ kleine Loch würden dann Drohnen von außen auf die gelagerten Behälter schießen. Eventuell würde auch eine oder mehrere Drohnen in das Gebäude fliegen.

Es wird hier angenommen, dass nur ein Behälter so getroffen wird, dass eine erhebliche Freisetzung von radioaktiven Stoffen resultiert. Als Anhaltspunkt für eine mögliche Freisetzung werden die ermittelten Freisetzungen nach einem Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe verwendet. Allerdings wird unterstellt, dass der Behälter zweifach getroffen wird. Da bei einem zweiten Treffer bereits zerstäubtes Material aus dem bereits vorhandenen Loch freigesetzt wird, wird angenommen, dass sich die Freisetzungsmenge um den Faktor 2,5 erhöht. Zusätzlich wird unterstellt, dass die aus Zircaloy bestehenden Hüllrohre der Brennelemente teilweise in Brand geraten. Insgesamt wird abgeschätzt, dass die dreimal so viel radioaktives Material freigesetzt wird wie bei einem einfachen Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe. Diese Abschätzung schließt auch die Annahme mit ein, dass ein thermobarischer Gefechtskopf abgeschossen würde.

Für die Berechnung der potenziellen radiologischen Auswirkungen wurde das Ausbreitungsprogramm HOTSPOT (Version 3.1.2.) verwendet. Die Ausbreitungen werden für die mittlere Wetterdiffusionsklasse D und eine mittlere Windgeschwindigkeit von 4 m/s durchgeführt. Niederschlag während der Freisetzung wird nicht unterstellt.

3.5.1 Potenzielle Strahlenbelastungen

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse für die ermittelte effektive Dosis nach 7 Tagen aufgeführt. In Windrichtung sind folgende Konsequenzen möglich:

- Der Eingreifrichtwert von 100 mSv für eine Evakuierung wird bis in eine Entfernung von fast 12 km überschritten.
- Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ wird ab einer effektiven Dosis von 10 mSv in 7 Tagen angeordnet. Diese kann bis in mehr als 20 km Entfernung auftreten.
- Noch in 8 km Entfernung zum Zwischenlager treten Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten, mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen haben.
- Bis in 800 m treten effektive Dosen auf, die mit mehr als 7 Sv tödlich sind. In 1 km kann eine Dosis von ca. 4 Sv auftreten, dieser Dosis ist eine 50%ige Sterbewahrscheinlichkeit zugeordnet.

Tabelle 8: Strahlendosen in 50 bis 20.000 m Entfernung nach Angriff mit Drohnen auf Zwischenlager Brokdorf

Entfernung (m)	Effektive Dosis nach 7 Tagen (Sv)
50	1.251
100	312
500	13,5
1.000	3,9
10.000	0,12
20.000	0,051

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die zu erwartenden Strahlenbelastungen für die Personen infolge eines derartigen Drohnenangriffs lebensbedrohlich sind. **Es ist bei der Bewertung der potenziellen radiologischen Auswirkungen zu beachten, dass Personen durch eine Evakuierung nicht vor Strahlenbelastungen bewahrt werden können, da sie die Inhalationsdosis unmittelbar nach dem potenziellen Terroranschlag erhalten würden (also vor einer Evakuierung).**

3.5.2 Potenzielle Cs-137-Bodenkontamination

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. 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. In Tabelle 9 sind die Cs-137-Bodenkontaminationen in Abhängigkeit von der Entfernung aufgeführt.

Tabelle 9: Cs-137-Bodenkontaminationen nach einem Angriff mit Drohnen auf Zwischenlager Brokdorf

Entfernung (m)	Cs-137-Bodenkontamination (kBq/m ²)
50	60.000.000
100	13.500.000
500	480.000
1.000	123.000
2.000	33.000
10.000	2.640
20.000	900

Die ermittelten Cs-137-Bodenkontaminationen wurden den Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung gegenübergestellt. In Windrichtung sind folgende Konsequenzen möglich:

- 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 etwa 7 km 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 20 km wurde noch eine Cs-137-Bodenkontamination von ca. 900 kBq/m² abgeschätzt, so dass derartige Maßnahmen bis zu dieser Entfernung und weit darüber hinaus erforderlich würden.

Ein „erfolgreich“ durchgeführter Angriff mit Drohnen hat schwerwiegende Folgen für die im Umfeld des Zwischenlagers Brokdorf liegenden Gebiete. Insgesamt ist davon auszugehen, dass nach einem „erfolgreichen“ Beschuss die Bodenkontaminationen so hoch sind, dass eine langfristige Beeinträchtigung resultieren wird.

3.6 Potenzielle Auswirkungen nach 30 Jahren

Ergänzend wurde untersucht, ob die potentiellen Auswirkungen mit dem **Abklingen der Kernbrennstoffe** deutlich abnehmen.

- Nach einer Abklingzeit der Inventare in den Behältern von weiteren 30 Jahren sind die zu erwartenden Strahlenbelastungen nach einem Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe und einem Angriff mit Drohnen nur um etwa 40 % geringer.
- Die Auswirkungen nach einem Flugzeugabsturz und auch die Cs-137-Bodenkontaminationen sind bei gleichen Freisetzungsmengen nach weiteren 30 Jahren noch halb so hoch.

Durch eine Alterung der Gebäude, Behälterkomponenten und Inventare können höhere Freisetzungen jedoch nicht ausgeschlossen werden, so dass gleich hohe oder gar höhere Auswirkungen durch die gleichen Angriffsszenarien nach weiteren 30 Jahren nicht ausgeschlossen sind.

4 Brennelemente-Zwischenlager Ahaus (BZA)

Das Lager befindet sich auf dem Gebiet der Stadt Ahaus (westliches Münsterland), etwa 3 km östlich des Stadtzentrums. Genehmigungsbehörde ist das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE). Die atomrechtliche Aufsichtsbehörde ist das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Das Brennelemente-Zwischenlager Ahaus (BZA) ist seit 1992 in Betrieb.

Die Lagerhalle besteht aus zwei getrennten Lagerhallenhälften. Der Lagerbereich I dient der Zwischenlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Stoffen. Der Lagerbereich II dient der Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen. Im BZA sind bisher 68 der 420 Behälterstellplätze belegt. Bei der Lagerbelegung ist zu beachten, dass 6-7 THTR-Behälter den Stellplatz eines Lagerbehälters einnehmen. Dort lagern

- 3 CASTOR V/19 mit BE aus dem AKW Neckarwestheim
- 3 CASTOR V/52 mit BE aus dem AKW Gundremmingen
- 305 CASTOR THTR/AVR mit BE aus dem Hochtemperaturreaktor in Hamm-Uentrop
- 18 CASTOR MTR2 mit BE aus dem Forschungsreaktor Dresden-Rossendorf

Die Befristung der Genehmigung auf 40 Jahre gilt beim BZA ab Erteilung der Genehmigung. Die Genehmigung der 305 CASTOR THTR/AVR Behälter endet vor Ende der Genehmigung des Zwischenlagers. (BASE 2021a)

In das BZA sind weitere Einlagerungen geplant. Seit dem 30. Juni 2013 lagern im AVR-Behälterlager Jülich 152 Behälter mit graphithaltigen AVR-Brennelementen ohne gültige Genehmigung. 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. Von JEN, BASE und BGZ bevorzugte Option zur Räumung des Zwischenlagers Jülich ist die Verbringung der Behälter nach Ahaus. Die BGZ hat im BZA einen Probelauf für eine mögliche Einlagerung von Castorbehältern mit Brennelementkugeln aus dem Zwischenlager in Jülich durchgeführt.⁴⁸

Neben dem Transport der 152 Behälter aus Jülich ist auch vorgesehen, das BZA künftig für die Aufbewahrung weiterer Brennelemente aus den Forschungsreaktoren München, Berlin und Mainz zu nutzen. Auch für Brennelemente aus den Forschungsreaktoren muss eine risikoarme langfristige Zwischenlagerung gewährleistet werden.

⁴⁸ Die Aufbewahrungsgenehmigung für die AVR-Behälter aus dem Zwischenlager Jülich im Zwischenlager in Ahaus wurde am 21. Juli 2016 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 das BZA zudem gegen äußere Einwirkungen schlecht geschützt ist, wächst der lokale Widerstand.

Besonders problematisch ist, dass der FRM II in München mit hoch angereichertem Uran (Highly Enriched Uranium – HEU) betrieben wird und der Brennstoff auch nach Einsatz im Reaktor noch atomwaffenfähig ist. Es kann für den Bau von Atombomben verwendet werden (Proliferationsrisiko).⁴⁹ Es wird erwartet, dass bis 2036 ca. 21 Behälter mit Brennelementen aus dem FRM II nach Ahaus transportiert werden.⁵⁰

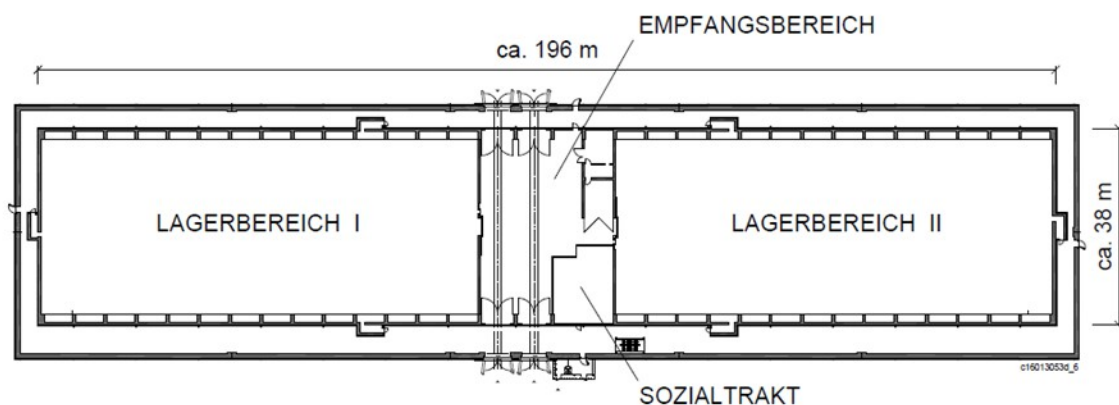
Es ist sicherheitstechnisch wenig vorausschauend, die BE des FRM II in das schlecht geschützte Zwischenlager in Ahaus zu transportieren, dessen Betriebsgenehmigung zudem bereits am 31. Dezember 2036 endet. Zudem ist wenig nachvollziehbar, warum ohne vorhandenes Gesamtkonzept für die langfristige Zwischenlagerung aktuell Transporte erfolgen sollen. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass die hochradioaktiven Stoffe häufiger und über größere Strecken als erforderlich transportiert werden müssen.

Die BGZ hat zudem die Aufbewahrung von bis zu 25 leeren Transportbehältern im BZA beantragt. Sie stammen aus der Wiederaufarbeitungsanlage La Hague in Frankreich. Es handelt sich um leere, nicht mehr benötigte und innen kontaminierte Behälter (sogenannte „End Used Casks“, EUC) französischer Bauarten, mit denen abgebrannte Brennelemente von deutschen AKW zur Wiederaufarbeitung nach La Hague transportiert wurden.⁵¹ (BGZ 2024a)

4.1 Zwischenlagergebäude Ahaus

Die Lagerhalle ist unterteilt in den Empfangsbereich mit Wartungsraum und Sozialtrakt und zwei Lagerbereiche (Lagerbereich I und Lagerbereich II). Nur im Lagerbereich II werden Kernbrennstoffe in Transport- und Lagerbehältern aufbewahrt. Die Lagerhalle besitzt eine rechteckige Grundfläche und hat folgende Hauptabmessungen (BGZ 2018):

- Länge ca. 196 m
- Breite ca. 38 m
- Höhe ca. 19 m



49 Ab einer Anreicherung von mehr als 20 Prozent gilt Uran als hoch angereichert und waffentauglich. Die Verwendung dieses Brennstoffs widerspricht dem internationalen Programm zur Umstellung von Forschungsreaktoren auf niedrig angereichertes Uran. Der BUND Landesverband Bayern klagt gegen den Betrieb des FRM II.

50 Ein Transport nach Ahaus kann erst erfolgen, wenn die Transport- und Aufbewahrungsgenehmigungen erteilt wurden.

51 Im Jahr 2021 hatten sich Deutschland und Frankreich auf eine neue Lösung zur Rücknahme geeinigt. Diese sieht unter anderem vor, anstatt der ursprünglich für Ahaus vorgesehenen 152 Behälter mit mittelfradioaktiven Abfällen nun die EUC aufzubewahren.

Abbildung 3: Grundriss des Lagergebäudes des Zwischenlagers Ahaus

Die beiden Lagerbereiche haben jeweils eine Lagerfläche von ca. 2.800 m². In den Außenwänden der Längsseiten und in der Dachkonstruktion sind Lüftungsöffnungen vorhanden. Die Öffnungen sind vollständig verschlossen, um den Eintritt von Luftfeuchtigkeit zu verhindern. In den Lagerbereichen sind Einrichtungen zum Ableiten von Kerosin vorhanden.

Das BZA wird von einer als Schutzwand bezeichneten Stahlbetonwand umgeben. Die Nachrüstungen gegen SEWD-Ereignisse (auch „Härtung“ genannt) des BZA wurde 2016 genehmigt und bis 2020 umgesetzt. Die Schutzwand ist aus Stahlbeton mit einer vorgesetzten Klinkerwand und einer Höhe von ca. 10,50 m ausgeführt. Der Bereich zwischen der Schutzwand und den vorhandenen Außenwänden der Lagerhalle ist überdacht. Laut BGZ (2018) sollte für den Personenzugang in die Lagerhalle war eine Personenvereinzlungsanlage installiert werden. Des Weiteren sollte ein Durchfahrtschutz aus Betonfertigteilen errichtet werden. Es wird angenommen, dass diese Maßnahmen inzwischen umgesetzt sind.

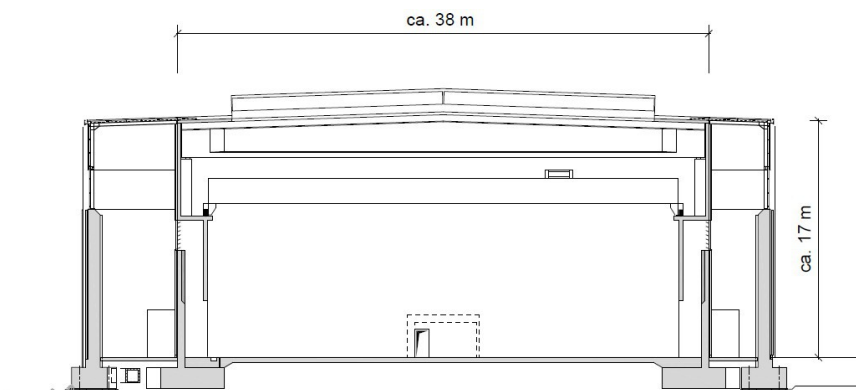


Abbildung 4: Querschnitt des Lagergebäudes des Zwischenlagers Ahaus

4.2 Behälter und Inventar im BZA

Im Brennelemente-Zwischenlager Ahaus (BZA) sind bisher vier Behältertypen eingelagert.



Abbildung 5: Brennelemente-Zwischenlager Ahaus

CASTOR® V/19

Drei Behälter des Typs CASTOR V/19 mit BE aus dem AKW Neckarwestheim werden seit März 1998 aufbewahrt. Informationen zum Behältertyp und zu den Inventaren siehe oben.

CASTOR® V/52

Drei Behälter des Typs CASTOR V/52 mit BE aus dem AKW Gundremmingen werden ebenfalls seit März 1998 aufbewahrt. Der CASTOR V/52-Behälter ist für den Transport und die Lagerung von max. 52 bestrahlten Brennelementen aus Siedewasserreaktoren (SWR-BE) ausgelegt (BE-Länge max. 4.485 mm, Kantenlänge max. 141 mm). Die Gesamtwärmeleistung beträgt 40 kW, die Gesamtaktivität 1.730 PBq und das Behältergewicht beträgt leer ≈ 105 Tonnen.⁵²

Die Abmessungen in der Lagerkonfiguration sind:

- Gesamthöhe 553 cm
- Außendurchmesser 244 cm
- Schachthöhe 455 cm
- Schachtdurchmesser 148 cm
- Wanddicke 42 cm

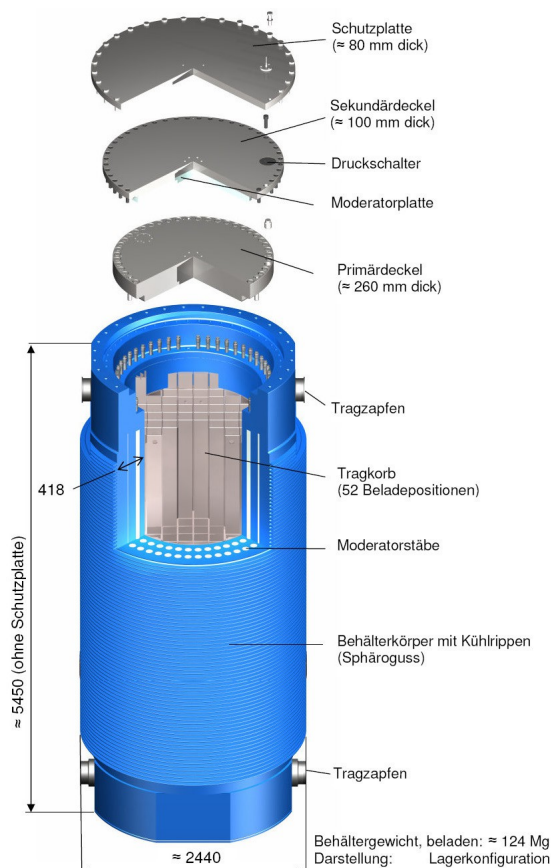


Abbildung 6: Behältertyp CASTOR V/52

Die Inventare der drei Behälter des Typs CASTOR V/52 mit BE aus dem AKW Gundremmingen mit SWR-BE sind etwas geringer als die Inventare der CASTOR-V/19-Behälter. Im Rahmen der bestehenden Unsicherheiten und Rechengenauigkeit sind diese Unterschiede nicht relevant. Es wird daher nicht getrennt betrachtet.

52 Über 240 CASTOR-V/52-Behälter wurden bisher gefertigt. Diese sind in den AKW Brunsbüttel, Gundremmingen, Isar, Krümmel und Philippsburg beladen und in den dortigen Zwischenlagern sowie im Zwischenlager Ahaus eingelagert worden.

CASTOR® MTR 2

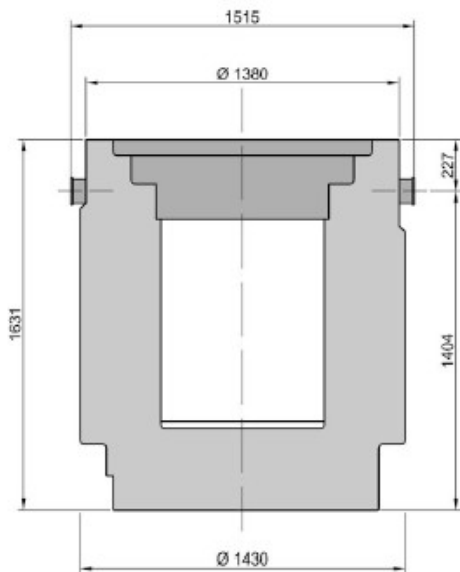


Abbildung 7: Darstellung des Behältertyps CASTOR MTR 2

Der CASTOR MTR 2 ist ein Transport- und Lagerbehälter für die Zwischenlagerung von Brennelementen aus Forschungsreaktoren. Es wurden nur die 18 Behälter mit BE aus dem Forschungsreaktor Dresden-Rossendorf (RFR) beladen, die aktuell im BZA aufbewahrt werden. Er besteht ebenfalls aus einem dickwandigen zylindrischen Behälterkörper mit einem Doppeldeckel-Dichtsystem und einem Tragkorb zur Positionierung der Brennelemente. Der Behälterkörper ist in einem Stück aus Gusseisen mit Kugelgraphit hergestellt. Der Primärdeckel hat eine Dicke von 280 mm und der Sekundärdeckel eine Dicke von 60 mm.

Die weiteren Abmessungen des Behälters sind:

- Höhe 1.631 mm
- Außendurchmesser 1.430 mm
- Wandstärke (Seite) 354,5 mm
- Wandstärke (Boden) 360 mm
- Primärdeckel 280 mm
- Sekundärdeckel 60 mm

Es ist vorgesehen, das BZA für die Aufbewahrung weiterer Brennelemente aus Forschungsreaktoren in Behältern der neuen Bauart CASTOR MTR3 zu nutzen.

Die Brennelemente des RFR befinden sich in sogenannten Ladeeinheiten, die wiederum in sieben Schächten eines BE-Tragkorbes eingesetzt sind. In einem CASTOR MTR 2 aus Rossendorf befinden sich maximal 6,72 kg Kernbrennstoff. Das Behältergewicht beträgt beladen maximal 15,80 Mg.

Die bestrahlten Brennelemente des RFR sind seit 2005 in 18 CASTOR-MTR2-Behältern im Zwischenlager Ahaus eingelagert. Das Inventar besteht aus 803 Brennelementen des Typs WWR-M und M2 sowie 147 EK-10-Brennelementen und einem Behälter mit 16 Einzelstäben des gleichen Brennelementtyps. RFR-Brennelemente vom Typ WWR-M/M2 weisen eine Brennstoffmatrix aus $\text{UO}_2\text{-Al}$ auf, die in Al-Blechen eingeschlossen ist. RFR-BE vom Typ EK-10 enthalten Brennstäbe mit einer Brennstoffmatrix aus $\text{UO}_2\text{-Mg}$, die von einem Al-Hüllrohr umgeben sind. Über die gelagerten

Inventare liegen nicht ausreichend Informationen vor, daher werden sie in den folgenden Rechnungen nicht berücksichtigt. (KIT 2013)

CASTOR® 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 305 Behälter aus dem THTR, die bereits im Zwischenlager Ahaus eingelagert sind, sollen 152 Behältern aus dem Zwischenlager Jülich in das Zwischenlager Ahaus transportiert werden.

Dieser Behältertyp ist deutlich kleiner als die CASTOR-V-Behälter zur Lagerung von BE aus AKW. Der CASTOR THTR/AVR ist ca. 2,70 m lang und wiegt beladen etwa 27 t.

Die Abmessungen des CASTOR THTR/AVR sind:

- Außendurchmesser 1380 mm
- Gesamthöhe 2785 mm
- Wandstärke 370 mm
- Bodenstärke 370 mm
- Primärdeckel 250 mm
- Sekundärdeckel 70 mm

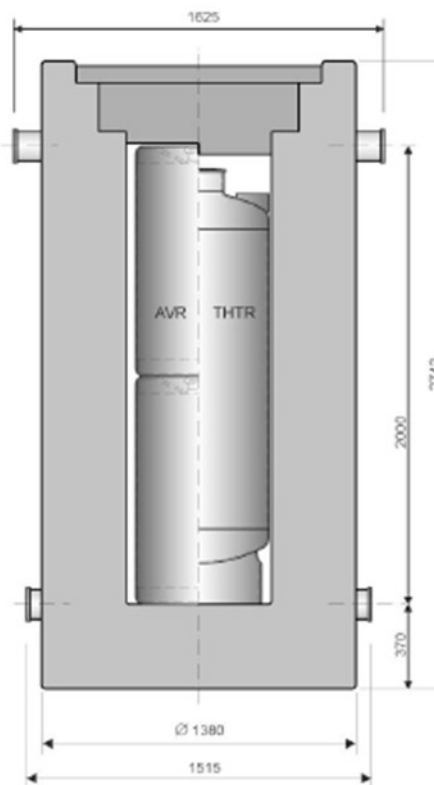


Abbildung 8: Darstellung des Behältertyps CASTOR THTR/AVR

Der CASTOR THTR/AVR hat einen zylindrischen Innenraum zur Aufnahme einer Stahlkanne mit etwa 2.100 THTR-BE oder zur Aufnahme von zwei Stahlkannen mit insgesamt ca. 1.900 AVR-BE. (KIT 2013)

Der **Reaktor THTR** wurde 1989 endgültig abgeschaltet. Im Oktober 1993 wurde die atomrechtliche Genehmigung zur Core-Entladung erteilt. Der Abtransport der Brennelemente zum Brennelemente-Zwischenlager Ahaus (BZA) wurde im April 1995 beendet. Die bestrahlten Brennelemente des 1989 abgeschalteten THTR-300 sind im Zwischenlager Ahaus eingelagert. Für die Zwischenlagerung befinden sich die kugelförmigen Brennelemente in einer dicht verschweißten Kanne aus Edelstahl in 305 CASTOR THTR/AVR-Behältern. Eine Kanne enthält maximal 2.110 Brennelemente. Neben den kugelförmigen Brennelementen sind auch die plattenförmigen Brennelemente aus dem Abbrandmessreaktor gelagert. Die insgesamt 767 Brennelemente dieses Typs wurden in insgesamt zwei Behältern verpackt.

Das Versuchskernkraftwerk AVR 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.

Jeder Behälter enthält zwei Kannen mit je 950 Brennelementen, d. h. jeder Behälter enthält 1.900 Brennelemente. Insgesamt sollen 288.161 AVR-Brennelemente in 152 Behältern im Zwischenlager Ahaus eingelagert werden. Mit der Einlagerung der Behälter mit den AVR-Brennelementen in das Zwischenlager Jülich wurde im Jahr 1993 begonnen, das heißt im Jahr 2033 ist für die ersten Behälter ein neuer Sicherheitsnachweis zu erbringen. Im AVR-Reaktor wurden während der Betriebszeit zur Brennelemententwicklung unterschiedliche Brennelemente getestet, die auch unterschiedliche Anreicherungen hatten.⁵³ (KIT 2013)

Bei den bestrahlten Brennelementen im AVR und THTR 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 von bis zu 40.000 beschichteten Partikeln („coated particles“) pro Brennelement. Diese bestehen aus einem Brennstoffkern aus karbidischen oder oxidischen Uran- und/oder Thoriumverbindungen und einer den Brennstoffkern umgebenden Beschichtung zur Rückhaltung der Spaltprodukte. Die Beschichtungen bestehen aus einer porösen Pufferschicht, die entweder mit zwei Schichten Pyrokohlenstoff oder zwei Schichten Pyrokohlenstoff mit eingefügter Siliziumkarbidschicht umgeben ist. Ein Brennelement hat eine Masse von ca. 214 g.

⁵³ 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.

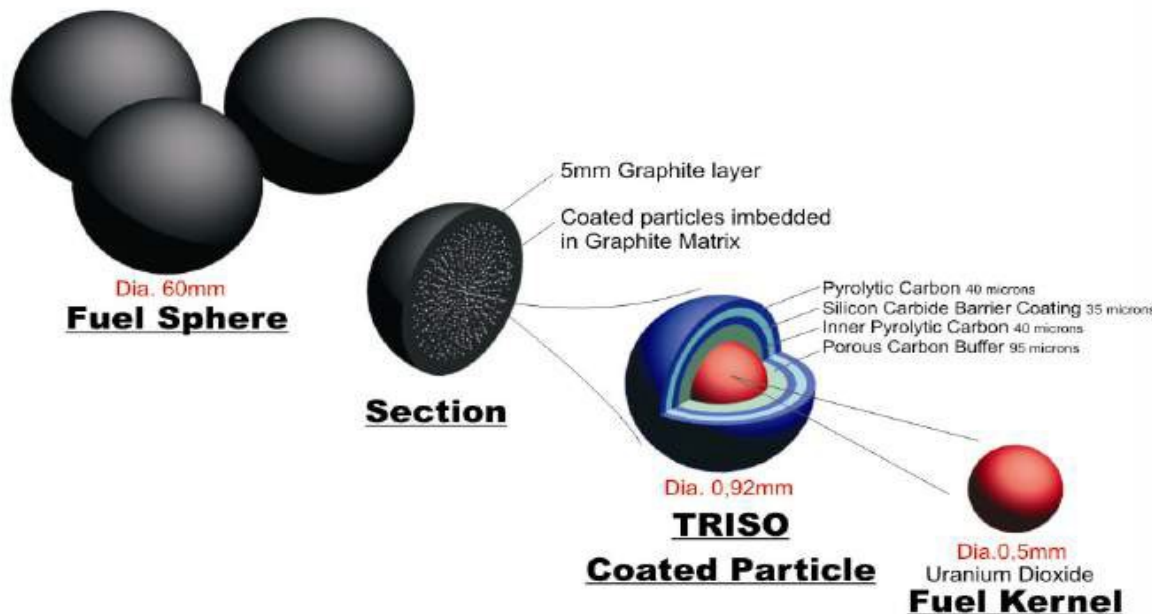


Abbildung 9: AVR-Brennelemente (JEN 2024a)

Die Brennstoffpartikel bestehen aus spaltbarem Uran (U-235) sowie nicht spaltbarem Uran (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 durch Spaltung von U-238) und Uran-233 (entstanden aus Spaltung von Th-232).

In einem Forschungsbericht des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wird das Inventar einiger relevanter Elemente für vier unterschiedliche Brennelementkugeln angegeben. Die Cs-137-Aktivität liegt zwischen 1,03 E11 und 1,37 E11 Bq. Daraus ergibt sich ein maximales Cs-137-Inventar eines Behälters von rund 2,6 E14 Bq. (KIT 2013)⁵⁴

In der folgenden Tabelle sind die mittleren Aktivitäten für relevante Nuklide aus den Angaben im o. g. Forschungsbericht abgeschätzt. Dabei wurde die Abnahme der Aktivität durch radioaktiven Zerfall berücksichtigt.⁵⁵

⁵⁴ 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.

⁵⁵ Die Angabe in KIT (2013) 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 werden unter Berücksichtigung ihrer Halbwertszeiten ermittelt.

Tabelle 10: Inventar im AVR-Behälter berechnet aus KIT (2013)

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

Für die im Folgenden betrachteten Szenarien wird davon ausgegangen, dass die in Tabelle 10 dargestellten Inventare auch ausreichend repräsentativ für die Behälter mit Brennelementen aus dem THTR sind.

4.3 Auswirkung eines gezielten Flugzeugabsturzes

In der Folge eines gezielten Absturzes eines Verkehrsflugzeugs auf das Zwischenlager Ahaus muss mit einer teilweisen Zerstörung des Lagergebäudes gerechnet werden. Es ist eine erheblich höhere Zerstörung des Gebäudes und damit auch höhere mechanische und thermische Einwirkungen auf die Behälter zu erwarten als bei einem derartigen Absturz auf das Zwischenlager Brokdorf.⁵⁶ Ursache ist die weniger robuste Bauweise des Lagers. Es ist nicht auszuschließen, dass negative Alterungseffekte zu der Zerstörung des Gebäudes beitragen. Die qualitative Beschreibung des Szenarios Flugzeugabsturz, die für das Zwischenlager Brokdorf ausführlich dargelegt wurde, wird hier nicht noch einmal wiederholt. Es werden im Folgenden im Wesentlichen die Punkte dargestellt, die sich qualitativ unterscheiden und daraus quantitative Abschätzungen abgeleitet.

In diesem Szenario wird angenommen, dass das Flugzeug in den Lagerbereich des Zwischenlagers Ahaus stürzt, in welchem die Behälter mit den Kernbrennstoffen gelagert sind. Als Folge des Absturzes wird ein Brand von großem Ausmaß entstehen, weil durch die großflächige Zerstörung eine große Menge an Kerosin in das Lager eindringen kann. Das Kerosin kann sich begrenzt durch Trümmer, Behälter und Flugzeugteile in einem Teil des Lagerbereiches sammeln. Die gebildete Kerosinlache wird sich mit großer Wahrscheinlichkeit entzünden und abbrennen. Die Behälter stehen oder liegen in diesem Fall direkt im Feuer und werden dementsprechend thermisch belastet. Für einen Teil der gelagerten Behälter ist ein mechanischer Lasteintrag zu unterstellen, der zu einer nennenswerten Dichtungsminderung führt. Ein Umkippen bzw. Abstürzen der doppelt gestapelten Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR und ein Zusammenschieben von Behältern ist wahrscheinlich.

⁵⁶ Aufgrund des geringeren radioaktiven Inventars der Behälter sind die Freisetzungen dennoch geringer.



Abbildung 10: Gelagerte Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR im BZA

Die Brandlast kann sich im Verlauf des Brandes durch austretendes Moderatormaterial aus den Behältern und durch Flugzeugteile sowie der Fracht weiter vergrößern. Nachdem sich die Kunststoffteile des Flugzeugs durch die hohe Temperatur des Kerosinbrandes entzündet haben, verbrennen diese ebenfalls bei Temperaturen um 1.000 °C.⁵⁷ Insgesamt kann ein langer Brand trotz der nachgerüsteten Einrichtungen zum Ableiten von Kerosin aus dem Lagerbereich nicht ausgeschlossen werden. Wie in Kapitel 1 dargelegt, sind alterungsbedingte Schäden an Behälterkomponenten nicht auszuschließen. Aus diesen können erhöhte Freisetzungen in Unfallsituationen resultieren.

Nach einer bestimmten Branddauer ist von einem Versagen des Deckeldichtungssystems auszugehen. Durch Alterungseffekte wird vermutlich die Versagensgrenze der Dichtungen herabgesetzt. Auch die mechanische Belastung der Behälter verringert die Versagenszeit der Dichtungen.

Die eindringende Kerosinmenge, die Brandfläche und die daraus resultierende Branddauer sind entscheidend für die Abschätzung der möglichen radiologischen Auswirkungen in der Umgebung. Die für den Absturz auf das Zwischenlager in Brokdorf unterstellte Kerosinmenge von 50 % ist als untere Abschätzung für ein derartiges Szenario im Zwischenlager Ahaus zu verstehen. Es wird hier angenommen, dass die Lagerfläche von 2.800 m² durch die gelagerten Behälter (ca. 380 m²) sowie durch Trümmer des Gebäudes (ca. 1.480 m²) und des Flugzeugs (ca. 150 m²) verringert wird. Nach dieser Abschätzung würde noch etwa eine Fläche von 800 m² für die Ausbreitung des Kerosins zur Verfügung stehen. Die Ausbreitung des Kerosins würde einer Branddauer von zwei Stunden entsprechen. Aufgrund der komplexen Situation im Zwischenlager Ahaus muss von einer unsymmetrischen Verteilung des Kerosins ausgegangen werden, weiterhin sind wie oben dargelegt weitere Brandlasten vorhanden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Aufheizung der im Vergleich zum Typ CASTOR V/19 kleineren Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR im Brand schneller erfolgen wird, daher kann das Dichtungsversagen schneller eintreten. Andererseits stehen auch nicht zwangsläufig alle Behälter im Brandbereich. Insgesamt wird hier plausibel angenommen, dass die Dichtungen von ca. einem Drittel der Behälter versagen.

Unregelmäßigkeiten während des Betriebs des AVR-Reaktors haben dazu geführt, dass sehr große Mengen an Cäsium und Strontium aus den versiegelten Brennstoffpartikeln ausgetreten sind. Dieser Sachverhalt wurde von der AVR-Expertengruppe bestätigt. (KÜPPERS 2014) Einige Prozent des Core-Inventars dieser Nuklide befindet sich außerhalb der Kugeln. Eine vermutlich noch größere

⁵⁷ Beim Unfall im WTC hatten die vorhandenen Kunststoffmöbel eine entscheidende Bedeutung für die Branddauer und Brandintensität.

Menge an Brennstoffpartikeln befindet sich im porösen Graphitmoderator der Kugeln in den Castoren. Die Brennstoffpartikel lösen sich bei Hitze leicht ab.

Die bereits eingelagerten 305 Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR aus dem Betrieb des THTR sind teilweise mit beschädigten Brennelementen befüllt. Die sogenannten Bruchkannen enthalten beschädigte Brennelemente (das sind Brennelemente mit Abplatzungen an der äußeren brennstofffreien Graphitschale, aber auch mit Bruchflächen bis in die Brennstoffzone.) Insgesamt ist daher nicht für alle gelagerten Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR davon auszugehen, dass der Kernbrennstoff in den Graphitkugeln versiegelt ist und auch bei Hitze nicht freigesetzt werden kann. Hier wird davon ausgegangen, dass sich bei 20 % der Behälter freisetzbare Cäsium in der Behälteratmosphäre befindet.

Aus der schnelleren Aufheizung der im Vergleich kleineren Behälter resultiert eine höhere Innentemperatur der Behälter durch den Brand. Es wird hier angenommen, dass nach einem zwei- bis dreistündigen Brand in der Behälteratmosphäre Temperaturen von mindestens 500 °C erreicht werden. Die Behälterinnentemperatur hat exponentielle Auswirkungen auf die möglichen Freisetzungen, da die Konzentration von Cs-137 in der Behälteratmosphäre mit der Temperatur stark ansteigt. Die Freisetzungen von radioaktiven Stoffen sind daher bei höheren Temperaturen deutlich höher.

Die freigesetzte Aktivität an Cs-137 aus der Behälteratmosphäre dieser Behälter lässt sich zu etwa $1 \cdot 10^{12}$ Bq abschätzen. Nach den o. g. Annahmen versagen die Dichtungen bei 150 Behältern. Es errechnet sich so die freigesetzte Aktivität aus 20 % dieser Behälter (30) zu einer Cs-137-Freisetzung von $30 \cdot 10^{12}$ Bq.

Für einen Brand der Graphitkugeln wäre das Eindringen von Sauerstoff in einen Behälter erforderlich. Die relativ leichten und gestapelten Behälter können durch die mechanischen Einwirkungen durch das Flugzeug, Gebädetrümmern oder andere Behälter umkippen und dann in dem Bereich liegen, wo sich das Kerosin sammelt und nachfolgend abbrennt. Es ist nicht vollständig auszuschließen, dass eine größere Leckagerate/Undichtigkeit nach einer mechanischen und thermischen Einwirkung durch einen Flugzeugabsturz eintritt. Dabei ist nicht vollständig auszuschließen, dass Sauerstoff in einen Behälter gelangt. Graphitstaub, der sich durch Reibung der Kugeln aneinander durch den Transport und zusätzlich durch die mechanischen Einwirkungen durch den Flugzeugabsturz gebildet hat, setzt die Entzündungstemperatur der Kugeln herab.

Insgesamt kann nach einem Flugzeugabsturz eine Inbrandsetzung der Graphitkugeln nicht vollständig ausgeschlossen werden. Dieses würde zu deutlich höheren Freisetzungen führen als in den Störfallanalysen, auf denen die Genehmigung beruht, ermittelt wurden. Da die Inbrandsetzung zwar nicht ausgeschlossen, aber dennoch als sehr unwahrscheinlich bewertet wird, wird für das hier berechnete Szenario nur das Inbrandsetzen des Inventars von einem der 457 Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR unterstellt.

Aufbauend auf einer vorherigen Studie wird angenommen, dass 20 % des Inhalts bei einem Brand in einem Behälter freigesetzt wird. Dazu addieren sich die Cs-137-Freisetzungen aus 30 Behältern.

4.3.1 Potenzielle Strahlendosen

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 Tabelle 11 sind die Ergebnisse für die ermittelte effektive Dosis nach 7 Tagen aufgeführt.

Tabelle 11: Strahlendosen in 50 bis 20.000 m Entfernung nach Flugzeugabsturz auf Zwischenlager Ahaus

Entfernung (m)	Effektive Dosis nach 7 Tagen (mSv)
50	42.875
100	11.477
200	3.219
500	602
1.000	186
10.000	6
20.000	2

In Windrichtung sind folgende Konsequenzen möglich:

- Der Eingreifrichtwert von 100 mSv für eine Evakuierung wird bis in eine Entfernung von ca. 2000 m überschritten.
- Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ wird ab einer effektiven Dosis von 10 mSv in 7 Tagen angeordnet. Diese muss bis in eine Entfernung von fast 10 km erfolgen.
- In 500 m Entfernung zum Zwischenlager treten in Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten, mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen haben.
- Bis in 300 m Entfernung zum Zwischenlager treten Dosen auf, die tödlich sein können.

4.3.2 Potenzielle Cs-137-Bodenkontamination

Es wurden ebenfalls die potenziellen Cs-137-Bodenkontaminationen ermittelt. Die ermittelten Cs-137-Bodenkontaminationen wurden den Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung gegenübergestellt. In Windrichtung sind folgende Auswirkungen möglich:

- 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 1.000 m 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. 46 kBq/m² abgeschätzt, so dass derartige Maßnahmen mindestens bis zu dieser Entfernung erforderlich würden.

Tabelle 12: Cs-137-Bodenkontaminationen in 50 bis 20.000 m Entfernungen nach Flugzeugabsturz auf Zwischenlager Ahaus

Entfernung (m)	Cs-137- Bodenkontamination (kBq/m ²)
50	9.200.000
100	1.875.000
200	410.000
500	53.500
1.000	12.800
10.000	148
20.000	46

4.4 Auswirkung eines Beschlusses mit panzerbrechender Waffe

Im Folgenden werden die möglichen radiologischen Auswirkungen eines Beschlusses mit einem Hohlladungsgeschoss aus einer panzerbrechenden Waffe auf einen gelagerten Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR in die Umgebung abgeschätzt.

Infolge eines Hohlladungsbeschlusses 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 und dem Zwischenlager freigesetzt und breitet sich in der Atmosphäre aus. Da ein Teil der freigesetzten Partikel lungengängig ist, können sie bei Menschen durch Inhalation zu einer erheblichen Strahlenbelastung führen. Weiterhin können die abgelagerten Radionuklide zu Strahlenbelastungen aus Bodenstrahlung führen.

Untersuchungen im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zum Hohlladungsbeschluss eines zu transportierenden AVR-Behälters sind nicht bekannt und können daher hier nicht verwendet werden.

In dieser Stellungnahme erfolgte eine abschätzende Berechnung der radiologischen Auswirkungen eines Hohlladungsbeschlusses. 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, der mit einem liegenden Kegelstumpf beschrieben werden kann. 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 in die Atmosphäre freigesetzt wird. In Tabelle 13 sind die entsprechenden Freisetzungsmengen dargestellt.

Tabelle 13: Freisetzungsmenge nach Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe auf CASTOR THTR/AVR

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.

4.4.1 Potenzielle Strahlendosen

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse für die ermittelte **effektive Dosis nach 7 Tagen in Windrichtung** aufgeführt:

- Der Eingreifrichtwert von 100 mSv für eine Evakuierung wird bis in eine Entfernung von rund 160 m überschritten.
- Die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ wird ab einer effektiven Dosis von 10 mSv in 7 Tagen angeordnet. Diese kann bis etwa 400 m auftreten.
- In 50 m Entfernung zum Zwischenlager treten Dosen von etwas mehr als 500 mSv auf, so dass Menschen, die sich dort aufhalten, mit akuten Strahlenfolgen zu rechnen haben.

Tabelle 14: Strahlendosen in 50 bis 1.000 m Entfernung nach Beschuss mit panzerbrechender Waffe auf CASTOR THTR/AVR

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 infolge eines derartigen Hohlladungsbeschusses gesundheitsschädlich, vielleicht sogar lebensbedrohlich sind.

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 erhalten würden, also vor einer Evakuierung.

4.4.2 Potenzielle 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 Cs-137-Bodenkontamination, die in Windrichtung resultieren könnte, abgeschätzt. Für eine Entfernung von 100 m zum Zwischenlager 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 15: Cs-137-Bodenkontaminationen nach Beschuss mit panzerbrechender Waffe auf CASTOR THTR/AVR

Entfernung (m)	Cs-137-Bodenkontamination (kBq/m ²)
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. Folgende Maßnahmen sind in Windrichtung erforderlich:

- 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 m 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, so dass derartige Maßnahmen mindestens bis zu dieser Entfernung erforderlich würden.

Ein „erfolgreich“ durchgeführter Beschuss eines gelagerten Behälters mit einer panzerbrechenden Waffe hat schwerwiegende Folgen für die im Umfeld des Zwischenlagers liegenden Gebiete. Insgesamt ist davon auszugehen, dass nach einem „erfolgreichen“ Beschuss die Bodenkontaminationen so hoch sind, dass eine langfristige Beeinträchtigung resultieren würde.

4.5 Auswirkung eines Angriffs mit Drohnen

In dieser Stellungnahme wird auftragsgemäß ein Szenario untersucht, in welchem mit mehreren Drohnen die in Ahaus gelagerten Behälter angegriffen werden. Diese Drohnen sollen mit Sprengstoffen und Brandbeschleuniger beladen sein, um bei einer geeigneten Abfolge des Angriffs den Behälter einer Explosion auszusetzen und einen Teil der brennbaren graphithaltigen Brennelemente in Brand zu setzen. Aufgrund der in Kapitel 2.5 dargestellten Fähigkeiten von Kamikaze-Drohnen einerseits und des rasanten Anstiegs der erzeugten Stückzahl andererseits kann ein heutzutage noch sehr hypothetisch erscheinender Terrorangriff nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Es geht über den Umfang dieser Stellungnahme hinaus, ein genaues Angriffsszenario zu entwickeln. Zudem soll keine Anleitung für einen Angriff bereitgestellt werden. Daher wird ein Szenario nur sehr schemenhaft dargestellt.

Für ein derartiges Szenario müsste zunächst ein Loch in die Außenmauer des Zwischenlagers gesprengt werden. Es ist mit Drohnen, die eine bestimmte Menge Sprengstoff geladen haben, einfach möglich, ein Loch in die verhältnismäßig dünne Mauer des Zwischenlagers Ahaus zu sprengen, durch welches dann weitere Drohnen in das Gebäude gelangen oder Drohnen von außen die Behälter beschießen können.

Es wird davon ausgegangen, dass insgesamt drei Behälter des Typs CASTOR THTR/AVR von einem derartigen Angriff so betroffen sind, dass es zu erheblichen Freisetzungen kommt. Es kann zwar nicht ausgeschlossen werden, dass mehr als drei Behälter von einem Angriff betroffen sind. Allerdings erscheint es plausibel, dass die eingesetzten Mittel zwar den Erfolg für einen Angriff garantieren, aber auch nur begrenzte Ressourcen eingesetzt werden. Aufbauend auf einer bisherigen Studie wird hier plausibel angenommen, dass aus einem Behälter etwa 20 % des Inventars freigesetzt wird.

4.5.1 Ermittlung der potenziellen Strahlenbelastungen

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 Tabelle 16 aufgelistet.

Tabelle 16: Strahlendosen in 50 bis 20.000 m Entfernung nach Angriff mit Drohnen auf Zwischenlager Ahaus

Entfernung (m)	Effektive Dosis nach 7 Tagen
50	129 Sv
100	34 Sv
200	10 Sv
500	2 Sv
1.000	558 mSv
10.000	18 mSv
20.000	6 mSv

Die ermittelten Strahlendosen (in Windrichtung) haben folgende Konsequenzen:

- Die Gesamtdosis übersteigt bis in ca. 5 km Entfernung den Eingreifrichtwert von 100 mSv für eine Evakuierung der Bevölkerung.
- Darüber hinaus muss die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ zum Schutz der Bevölkerung vor Strahlenbelastungen bis in eine Entfernung von fast 20 km angeordnet werden.
- Im Wesentlichen wird die Dosis durch Inhalation der radioaktiven Stoffe bestimmt, die die Personen in Windrichtung aber unmittelbar nach der Freisetzung erhalten würden. Bis in eine Entfernung von rund 250 m sind die möglichen Inhalationsdosen in jedem Fall tödlich (über 7.000 mSv).
- Einer Dosis von 4.000 mSv ist eine 50%ige Sterbewahrscheinlichkeit zuzuordnen. Solche Dosen können bis etwa 300 m Entfernung auftreten.
- Für Personen, die sich in Gebäuden aufhalten, reduziert sich die Dosis um einen Faktor 3. Das bedeutet, dass die Dosen selbst für Menschen, die sich in Gebäuden aufhalten, bis in etwa 150 m Entfernung tödlich sein könnten.

4.5.2 Ermittlung der potenziellen Cs-137-Bodenkontaminationen

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

Aus den durchgeführten Ausbreitungsrechnungen wurde die mögliche Cs-137-Bodenkontamination abgeschätzt, die in Windrichtung resultieren könnte. In Tabelle 17 sind die Cs-137-Bodenkontaminationen in Abhängigkeit von der Entfernung aufgeführt.

Tabelle 17: Cs-137-Bodenkontaminationen nach Angriff mit Drohnen auf Zwischenlager Ahaus

Entfernung (m)	Cs-137- Bodenkontamination (kBq/m ²)
50	11.400.000
100	2.340.000
200	510.000
500	66.000
1.000	15.900
10.000	183
20.000	57

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 etwa 1.500 m 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. 57 kBq/m² abgeschätzt. Für größere Entfernungen liefert das Programm keine ausreichend guten Werte, insofern erfolgte keine entsprechende Berechnung. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass 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 des Zwischenlagers 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 resultiert.

4.6 Potenzielle Auswirkungen nach 30 Jahren

Ergänzend zu den bereits dargestellten Ergebnissen wurde untersucht, ob die potentiellen Auswirkungen mit dem **Abklingen der Kernbrennstoffe** deutlich abnehmen;

- Nach einer Abklingzeit der Inventare in den Behältern von weiteren 30 Jahren sind die zu erwartenden Strahlenbelastungen nach einem Beschuss mit einer panzerbrechenden Waffe und einem Angriff mit Drohnen nur um rund 20 % geringer.
- Die Auswirkungen nach einem Flugzeugabsturz und auch die Cs-137-Bodenkontaminationen sind bei gleichen Freisetzungsmengen nach weiteren 30 Jahren noch halb so hoch.

Durch eine Alterung der Gebäude, Behälterkomponenten und Inventare können nach 30 Jahren insgesamt höhere Freisetzungen jedoch nicht ausgeschlossen werden, so dass gleich hohe oder gar höhere potentielle radiologische Auswirkungen durch die gleichen Angriffsszenarien nach weiteren 30 Jahren nicht ausgeschlossen sind.

5 Literatur

- BASE (2020a): Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Bauweise Zwischenlager, Konstruktion der Zwischenlager; 29. Dezember 2020; https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/bauweise_zwl/bauweise-zwl_node.html
- BASE (2021a): Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Zwischenlager Ahaus; Stand 15. Oktober 2021; <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/ahaus.html>
- BASE (2022): Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Laufzeitverlängerung deutscher Atomkraftwerke? Stand 26. Juli 2022.
- BASE (2024a): Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Zwischenlager Brokdorf; Stand 8. Oktober 2024; <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-brokdorf.html>
- BASE (2024b): Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Zwischenlager Brunsbüttel; Stand 15. Juli 2024; <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-brunsbuettel.html>
- BASE (2024c): Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Zwischenlager Grohnde; 28. Mai 2024; <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/zwischenlager/standorte/zwischenlager-grohnde.html>
- BECKER (2010): Terrorangriff mit einer panzerbrechenden Waffe (AT-14 Kornet-E) auf (ältere) deutsche Atomkraftwerke; Bericht, gekürzte Fassung; Dipl.-Physikerin Oda Becker; Erstellt im Auftrag von Greenpeace Deutschland e.V.; September 2010
- BFS (2003a): Bundesamt für Strahlenschutz: Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen im Standortzwischenlager in Brokdorf der Kernkraftwerk Brokdorf GmbH & Co. oHG und der E.ON Kernkraft GmbH; Az.: GZ-V2 - 8547 510, vom 28. November 2003
- BGZ (2018): Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ): Lagerung sonstiger radioaktiver Stoffe im Transportbehälterlager Ahaus – Sicherheitsbericht; 11. Dezember 2018
- BGZ (2020f): Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ): Geringfügige Toleranzabweichungen an mehreren CASTOR-Behältern – Dichtheit uneingeschränkt gegeben; 17. November 2020; <https://bgz.de/2020/11/17/geringfuegige-toleranzabweichungen-an-mehreren-castor-behaeltern-dichtheit-uneingeschraenkt-gegeben-2/>
- BGZ (2021f): Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ): Geringfügige Toleranzabweichung an einem weiteren CASTOR-Behälter – Dichtheit uneingeschränkt gegeben; 18. Januar 2021; <https://bgz.de/2021/01/18/geringfuegige-toleranzabweichung-an-einem-weiteren-castor-behaelter-dichtheit-uneingeschraenkt-gegeben/>
- BGZ (2023): Das Forschungsprogramm der BGZ; Gesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ) 2003
- BGZ (2023a): Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ): Brokdorf: Landrat Claudius Teske besucht Zwischenlager; 15. Juni 2023; <https://bgz.de/2023/06/15/brokdorf-landrat-claudius-teske-besucht-zwischenlager/>
- BGZ (2023b): Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ): Brokdorf CASTOR-Einlagerung erfolgreich abgeschlossen; 31. März 2023. <https://bgz.de/2023/03/31/brokdorf-castor-einlagerung-erfolgreich-abgeschlossen/>

- BGZ (2024a): Bundesgesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ): Aktuelle Projekte in Ahaus;
<https://zwischenlager.info/standort/ahaus-projekte/>
- BMUB (2012): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Sicherung der Zwischenlager und Hintergründe der erforderlichen Nachrüstung; 8. Februar 2012; <http://www.bmub.bund.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/zwischenlagerung/sicherung-der-zwischenlager-und-hintergruende-der-erforderlichen-nachruestung/>
- BMUB (2018): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle; Bericht der Bundesrepublik Deutschland für die sechste Überprüfungskonferenz im Mai 2018
- BMUV (2023): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Verzeichnis radioaktiver Abfälle (Bestand zum 31. Dezember 2022 und Prognose), November 2023
- BUND (2023): Aktuelle Probleme und Gefahren bei deutschen Zwischenlagern für hoch-radioaktive Abfälle; Studie; Oda Becker; im Auftrag des BUND; Juni 2023
- BW (2017): Baden-Württemberg, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft: Manipulierte Zuverlässigkeitsüberprüfungen für kerntechnische Anlagen aus Jülich; 25. August 2017, <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/manipulierte-zuverlaessigkeitsueberpruefungen-fuer-kerntechnische-anlagen-aus-juelich/>
- DBT (2018e): Deutscher Bundestag, Drucksache 19/5440, 19. Wahlperiode, Schriftliche Fragen mit den in der Woche vom 29. Oktober 2018 eingegangenen Antworten der Bundesregierung, 2. November 2018
- ENTRIA (2019): Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA, 2013-2018): Abschlussbericht; DOI: 10.21268/20190225-1
- ESK (2023): Verlängerte Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger hochradioaktiver Abfälle in Abhängigkeit von der Auswahl des Endlagerstandorts; ESK-Positionspapier der Entsorgungskommission vom 23. März 2023
- FRANO (2021): Aircraft Impact Effects on an Aged NPP. Materials 2021, 14, 816. Frano, R.L. 2021.
- GNS (2024b): Referenzen; Behälter für hochradioaktive Abfälle; Stand: 30. Juni 2024
- GNS (2024a): Gesellschaft für Nuklear-Service mBH: CASTOR V/19.
<https://www.gns.de/behaelter-equipment/brennelemente-haw/lwr/castor-v/castor-v19/#/content/content/edit/1276>
- 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 (2012): Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS): Endlagerkonzepte, Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben; DBE TEC (Wilhelm Bollingfehr, Wolfgang Filbert, Christian Lerch, Marion Tholen; Juli 2011; mit Corrigendum Dezember 2011 und Änderung der Vorbemerkung Dezember 2012
- JEN (2024a): Die Räumung des AVR-Behälterlagers in Jülich - Entsorgung der AVR-Brennelemente; Mitarbeitenden-Information JEN und FZJ, 29. Februar 2024
- 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>.

- KÜPPERS (2014): Der Versuchsreaktor AVR - Entstehung, Betrieb und Störfälle; Abschlussbericht der AVR-Expertengruppe; Dipl.-Phys. Christian Küppers (Vorsitzender); Dipl.-Phys. Lothar Hahn; a. Pl. Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Heinzl; Dr.-Ing. habil. Leopold Weil; Jülich, 1. April 2014
- 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.
- NEUMANN (2014): Zur Notwendigkeit von Heißen Zellen an Zwischenlagerstandorten; Wolfgang Neumann (intac GmbH) im Auftrag von Greenpeace e.V., Hannover, Mai 2014
- NIEPHAUS (1999): Referenzkonzept zur direkten Endlagerung von abgebrannten HTR-Brennelementen in CASTOR THTR/AVR Transport- und Lagerbehältern; Berichte des Forschungszentrum Jülich; 1999
- NZZ (2024): Billig, klein, tödlich: Kamikaze-Drohnen machen den Soldaten in der Ukraine das Leben zur Hölle; Neue Zürcher Zeitung, Andreas Rüesch 20. April 2024, <https://www.nzz.ch/international/ukraine-krieg-kamikaze-drohnen-machen-das-soldatenleben-zur-hoelle-ld.1825600>
- OVG (2013): Schleswig-Holstein Obergerverwaltungsgericht; Urteil 4 KS 3/08, verkündet am 19. Juni 2013
- PLEDGER (2021): The Role of Drones in Future Terrorist Attacks, Published by the Association of the United States Army; Thomas G. Pledger; Land Warfare Paper Nr. 137, February 2021 https://www.ausa.org/sites/default/files/publications/LWP-137-The-Role-of-Drones-in-Future-Terrorist-Attacks_0.pdf
- SSK (2010): Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen (Maßnahmenkatalog); Strahlenschutzkommission (SSK) Heft 60, 2010
- UBA (2002): Christian Baumgartner; Oda Becker, Andreas Frank; Helmut Hirsch; Jürgen Kreusch, Wolfgang Neumann, et al.: Grenzüberschreitende UVP gemäß Art. 7 UVP-RL zum Standortzwischenlager Biblis. Umweltbundesamt Österreich. Bericht an das österreichische Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft sowie an die Landesregierungen von Oberösterreich und Vorarlberg. Wien, Februar 2002. http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/umweltpolitische/ESPOOverfahren/Zwischenlager_Deutschland/Biblis/BerichtZwilagBiblis_oe.pdf
- WEBER (2024a): Weber, Jutta: Drohnenschwärme, Atomkraftwerke und atomare Zwischenlager. Die Aktion (2024), Nr. 4; <https://olaf.bbm.de/nummer-48-jutta-weber-drohnenschwaerme-atomkraftwerke-und-atomare-zwischenlager>
- WEBER (2024b): Weber, Jutta: Drohnen(schwärme), Atomkraftwerke und atomare Zwischenlager. Eine kritische Diskussion. Eingeladener Vortrag beim Symposium „Anlagensicherung“ des TÜV Nord, Hamburg, 20.-21. Februar 2024, Hamburg. Unveröffentlichtes Manuskript