

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 74

2 Inventardaten hochradioaktiver Abfälle für die rvSU (§ 4 EndISiUntV)

2.1 Zusammenstellung des Abfallinventars (§ 4 Abs. 2 EndISiUntV)

Die hochradioaktiven Abfälle aus dem Betrieb der deutschen Kernkraftwerke sowie aus dem Betrieb der Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren und die Notwendigkeit, Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und den weiteren schädlichen Wirkungen dieser Abfälle zu schützen, bilden den Ausgangspunkt für das Standortauswahlverfahren (§ 1 Abs. 2 StandAG). Die sichere Endlagerung dieser Abfälle in tiefen geologischen Formationen ist Gegenstand der Entwicklung von Endlager- und Sicherheitskonzepten, die in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen bewertet werden. Die Sicherheitsanforderungen an das Endlagersystem, die u. a. Grenzwerte für die Freisetzung von Massen und Stoffmengen aus dem Endlagerbereich (§ 4 EndISiAnfV) und Kriterien für den Kritikalitätsausschluss (§ 8 EndISiAnfV) definieren, stellen dabei die Grundlage der Konzeptentwicklung dar, und sind gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung auch Maßstab für die Bewertung der untersuchten Endlagersysteme.

Insgesamt wurden in Deutschland bis zum 31.12.2019 in Kernkraftwerken 15 777 t_{SM} an bestrahlten Brennelementen (BE) erzeugt und weitere ca. 190 t_{SM} in Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren (BMU 2020). Bis zum Ende der Kernenergieerzeugung in Deutschland wird eine weitere Masse von 1 009 t_{SM} an bestrahlten Brennelementen aus den Kernkraftwerken erwartet, womit abzüglich der in die Wiederaufarbeitung bzw. ins Ausland abgegebenen Abfallmengen (siehe Tabelle 3) insgesamt 10 113 t_{SM} an Brennelementen aus den Leistungsreaktoren (BMU 2020), ca. 10 bis 12 t_{SM} aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren (BMU 2021b) und 3.864 Korkillern mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (BMU 2021b, 2021a) endgelagert werden müssen.

*Tabelle 3: Zum Stichtag 31.12.2019 erzeugte und endzulagernde Abfallmengen aus den Leistungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren.
Werte berechnet nach Angaben aus (BMU 2020).*

Abfallmenge [t _{SM}]	... aus Leistungsreaktoren	... aus Versuchs- und Prototypreaktoren	Summe
... erzeugt	15 777	189,6	ca. 15 967
... in die Wiederaufarbeitung gegeben	6 346	125,4	ca. 6 471
... exportiert	327	54,6	ca. 384
... endzulagern	9 104	9,6	ca. 9 114

Das endzulagernde Abfallinventar stammt dabei aus dem Betrieb von Kernreaktoren in Deutschland und aus der Wiederaufarbeitung von dabei entstandenen Abfällen. Es ist somit unabhängig von Endlagerkonzepten und Wirtsgesteinen.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 75

Aus der Rückholung der in der Schachanlage Asse II eingelagerten Abfallgebände sowie, falls hier keine weitere Verwendung erfolgen sollte, aus den verbliebenen Abfällen aus der Urananreicherung fallen weitere Bestände schwach- und mittelaktiver Abfälle (SMA) an. Für die Endlagerung von SMA-Beständen, die nicht in das Endlager Konrad verbracht werden können, ist nach § 1 Abs. 6 StandAG eine Endlagerung am gleichen Standort wie dem des Endlagers für hochradioaktive Abfälle zulässig, „wenn die gleiche bestmögliche Sicherheit wie bei der alleinigen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gewährleistet ist“. Diese Möglichkeit ist nach § 7 Abs. 5 EndlSiUntV im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ebenfalls zu beurteilen (vgl. Kapitel 8.9).

2.2 Inventardatenbedarf für die rvSU

Der unmittelbare Inventardatenbedarf für die rvSU ergibt sich aus den für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 6 EndlSiUntV zu entwickelnden vorläufigen Endlagerauslegungen und den zu erstellenden vorläufigen Sicherheitskonzepten, aus der in § 7 Abs. 6 EndlSiUntV geforderten Bewertung der thermischen Verhältnisse des Endlagersystems, dem Flächenbedarf des Endlagerbergwerkes und der Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV. Hierzu sind gemäß § 4 Abs. 2 EndlSiUntV alle erforderlichen Informationen zu den endzulagernden Abfällen heranzuziehen.

Die radiologisch-thermischen Eigenschaften der Abfälle resultieren aus dem fortlaufenden radioaktiven Zerfall der in ihnen enthaltenen Radionuklide. Die Wärmeleistung der Abfälle und damit der Abfallgebände ist Ausgangspunkt für die Berechnung der thermischen Verhältnisse, der Endlagerauslegung und des Flächenbedarfs. Die Freisetzungs- und Transportberechnungen zur Bewertung des sicheren Einschlusses hinsichtlich des Massen- und Stoffmengenaustrages aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren gemäß § 4 EndlSiAnfV erfolgen zunächst anhand der in Larue et al. (2013) identifizierten und quantifizierten Leitnuklide. Die Ergebnisse werden mit den aus dem für die rvSU abgeleiteten Abfallinventar bestimmten Nuklidvektoren abgeglichen. Demgemäß umfassen die für die Sicherheitsuntersuchung benötigten Inventardaten insbesondere Informationen zu Art und Menge der endzulagernden Abfälle, zu deren Nuklidvektoren sowie den aus dem Nuklidvektor ableitbaren Größen der Wärmeleistung und der Aktivität.

2.2.1 Veröffentlichte Referenzen für Inventardaten

Informationen zu Art, Menge und eigenschaftsbestimmenden Kennwerten hochradioaktiver Abfälle in Deutschland sind mit variierender Detaillierung vorhanden. Zum Abfallmengengerüst (Art und Menge der Abfälle) veröffentlicht das als atomrechtliche Aufsicht agierende Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) in regelmäßigen Abständen ein *Verzeichnis radioaktiver Abfälle* sowie weitere Daten in den Überprüfungsberichten zum *Gemeinsamen Übereinkommen*. Weitere Informationen zu Abfällen aus Forschungsreaktoren sowie zu Nuklidvektoren und radiologisch-thermischen Eigenschaften der Abfälle sind in verschiedenen Forschungsberichten zu finden. Für das Abfallinventar der rvSU stehen die nachfolgend in den Kapiteln 2.2.1.1 bis 2.2.1.5 beschriebenen Quellen zur Verfügung.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 76

2.2.1.1 Verzeichnis radioaktiver Abfälle (seit 2014/15)

Als Grundlage des Nationalen Entsorgungsprogrammes (BMUB 2015a) und in Erfüllung der Richtlinie 2011/70/Euratom (Richtlinie 2011/70/EURATOM) wurde erstmals 2014 (BMUB 2013) und dann ab 2015 dreijährlich ein Verzeichnis radioaktiver Abfälle mit einem jeweils aktuellen Stand und einer Prognose für Art und Menge aller zu entsorgenden radioaktiven Abfälle veröffentlicht. Darin enthalten sind Angaben zu Art und Menge aller radioaktiven Abfälle, die bis zu einem jeweiligen Stichtag angefallen sind. Das jüngste veröffentlichte Verzeichnis von 2021 enthält Informationen zum gesamten Abfallinventar (einschließlich Prognosen) mit Stand vom 31.12.2019 (BMU 2021b).

2.2.1.2 Berichte zum Gemeinsamen Übereinkommen (seit 2001)

Als eines der ersten Länder trat Deutschland dem *Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle* (eng. *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*) bei⁵, einem internationalen Vertragswerk unter der Ägide der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) mit dem Ziel der Etablierung weltweiter Qualitäts- und Sicherheitsstandards in der nuklearen Entsorgung. Im Rahmen des Vertragswerkes verpflichten sich die Mitgliedsstaaten dazu, zu den dreijährlichen Überprüfungskonferenzen ausführliche Berichte vorzulegen, die die organisatorischen, regulatorischen und institutionellen Rahmenbedingungen der nationalen Entsorgungsprogramme offenlegen. Daher finden sich im Kapitel D der Berichte auch ausführliche Informationen zum Abfallinventar (Art und Menge der Abfälle). Im derzeit jüngsten Bericht zur 7. Überprüfungskonferenz wird der Stand zum 31.12.2019 dargestellt (BMU 2020).

2.2.1.3 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG, 2010 bis 2013)

Für die *Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG)* wurden 2010 bis 2013 die im Erkundungsbergwerk Gorleben gewonnenen Kenntnisse zusammengefasst und ein dazu entwickeltes Endlager- und Sicherheitskonzept untersucht. Dafür wurde auch ein Abfallmengengerüst erarbeitet (Peiffer et al. 2012b) und nach dem Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergienutzung 2011 nochmals angepasst (Peiffer et al. 2012a). Aufgrund der zusammengestellten Inventardaten zu hochradioaktiven Abfällen aus Leistungsreaktoren, Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren sowie aus der Wiederaufarbeitung wurden exemplarisch Nuklidvektoren und daraus resultierende Aktivitäten und Wärmeleistungen für mehrere Zeitpunkte über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahren berechnet. Unter Verwendung der damals für das Endlagerkonzept am Erkundungsstandort Gorleben entwickelten Endlagerbehälterkonzepte wurden schließlich Betriebsabläufe analysiert und eine generische Sicherheitsanalyse durchgeführt.

⁵ Der Status ist einzusehen unter: https://www-legacy.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/jointconv_status.pdf

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 77

2.2.1.4 Forschungsvorhaben LABRADOR (2011)

Um den aktuellen Kenntnisstand zu vorhandenen und endzulagernden Abfällen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren zu ermitteln und zusammenzufassen, wurde das Forschungsvorhaben „*Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/Lagerung (LABRADOR)*“ durchgeführt (Dörr et al. 2011). Im Ergebnis steht eine Gesamtdarstellung der zu entsorgenden Brennstäbe (BSt) und Brennelemente aus diesen Reaktoren, ihrer äußeren Abmessungen, und einer Abschätzung der vorhandenen bzw. zu erwartenden Massenströme.

2.2.1.5 Forschungsvorhaben RESUS (2020)

Nach dem Neustart des Standortauswahlverfahrens 2013 und der Etablierung des im StandAG verankerten Verfahrens wurde das Forschungsvorhaben „*Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle*“ (RESUS) durchgeführt, um die Bedeutung der Abwägungskriterien für die Langzeitsicherheitsanalyse für verschiedene Endlagerkonzepte in generischen potenziellen Wirtsgesteinsformationen zu betrachten. Für die Erarbeitung des jeweiligen Sicherheitskonzeptes wurde auch hier ein Abfallinventar erstellt, das Inventardaten aus der VSG (Peiffer et al. 2012a), aus dem Forschungsvorhaben LABRADOR (Dörr et al. 2011), aus dem Nationalen Entsorgungsprogramm von 2015 (BMUB 2015a) und aus dem Bericht zur 6. Überprüfungskonferenz zum Gemeinsamen Übereinkommen (BMUB 2018) (siehe auch Kapitel 2.2.1.2) kombiniert. Die Ergebnisse sind u. a. in Bertrams et al. (2020b) veröffentlicht worden.

2.2.2 Für die rvSU zusammengestellte Inventardaten

Aus den vorliegenden Informationen lassen sich Inventardaten für die rvSU ableiten. Dabei stehen entsprechend den in Kapitel 2.2 dargelegten für die rvSU relevanten Inventardaten jeweils Menge, Art und Eigenschaften aufgrund des radioaktiven Zerfalls im Mittelpunkt.

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 78

Grundsätzlich lassen sich die vorhandenen Abfälle in drei Gruppen einteilen:

- Die Brennelemente aus den Leistungsreaktoren bilden die größte Gruppe im Abfallinventar. Die Brennelemente enthalten nach der Entladung aus dem Reaktor hunderte verschiedene Radioisotope, die entlang charakteristischer Zerfallsreihen zerfallen und über lange Zeiträume ionisierende Strahlung und Wärme aussenden. Die Brennelemente können nach unterschiedlichen Bautypen für Druckwasserreaktoren (DWR), Druckwasserreaktoren sowjetisch/russischer Bauart (WWER) und Siedewasserreaktoren (SWR) unterteilt werden; im Rahmen der rvSU jedoch ist es ausreichend, sie als eine Gruppe zu betrachten. Hier stehen die Wärmeleistungen der Brennelemente bzw. der Behälter im Vordergrund sowie der für die Bewertung des Massen- und Stoffmengenaustrags wesentliche Nuklidvektor, der sich primär aus Anfangsanreicherung bzw. -zusammensetzung, Abbrand und Abklingzeit der Brennelemente ermitteln lässt. Dementsprechend müssen diese drei Größen für die Brennelemente aus den Daten ermittelt werden.
- Die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestehen aus Kokillen mit verglasten Spaltproduktlösungen aus den Wiederaufarbeitungsanlagen in Frankreich und Großbritannien, und aus der ehemaligen Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK). In den verfügbaren Quellen kommen regulär noch Kokillen mit verpressten Metallstrukturteilen und Kokillen mit verglasten Dekontaminations-, Prozess- und Spüllösungen hinzu, die nach dem neuesten Stand nicht mehr Teil des Abfallinventars sind (vgl. Kapitel 2.2.2.2). Die Zusammensetzung dieser Abfälle richtet sich nach den Nuklidvektoren der prozessierten Brennelemente sowie nach den Betriebsparametern der Wiederaufarbeitungsanlage und denen der Verglasungseinrichtung. Die Ermittlung oder Abschätzung der Zusammensetzung ist daher schwieriger zu ermitteln als die der Brennelemente.
- Die Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren sind eine hochdiversitäre Gruppe verschiedener Brennstäbe und Brennelemente mit unterschiedlichen Formen, Abmessungen, chemischen und Isotopenzusammensetzungen. Diese Abfallgruppe umfasst Brennstäbe aus dem Nuklearschiff „Otto Hahn“ ebenso wie ursprünglich auf ca. 93 % angereicherte Brennstäbe aus dem Forschungsreaktor München II (FRM II) mit einer Beschichtung aus einer Uransilizid-Aluminium-Matrix (Dörr et al. 2011). Dementsprechend vielseitig sind die für die Zwischenlagerung und für eine spätere Endlagerung zu beachtenden chemischen und radiologischen Besonderheiten.

Die in den verfügbaren Referenzen (siehe Kapitel 2.2.1) für diese drei Abfallgruppen wesentlichen Informationen werden im Folgenden zusammengestellt.

2.2.2.1 Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Die endzulagernden Brennelemente aus den Leistungsreaktoren können entsprechend den in Deutschland gebauten Typen von Leistungsreaktoren in DWR-Brennelemente, SWR-Brennelemente und WWER-Brennelemente unterschieden werden. DWR-Brennelemente sind allgemein länglich-quaderförmig mit quadratischer Grundfläche, einer Länge von bis zu ca. 5 m und enthalten

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 79
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0330				EA	TF	0002	00	

bis zu ca. einer halben Tonne Schwermetall. SWR-Brennelemente und WWER-Brennelemente sind allgemein kleiner und leichter.

Der größte Teil dieser Abfallgruppe besteht aus DWR-Brennelementen, gefolgt von den zahlreichen aber leichteren SWR-Brennelementen sowie den WWER-Brennelementen aus den beiden Kernkraftwerken der ehemaligen DDR. Eine Auflistung der für die VSG zusammengestellten Gesamtprognose endzulagernder Brennelemente aus den Leistungsreaktoren (Peiffer et al. 2012a) sowie des Ist-Standes zum 31.12.2019 (BMU 2021b) ist in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: Anzahl und Schwermetallmasse der endzulagernden Brennelemente (BE) aus den Leistungsreaktoren: Gesamtprognose nach VSG und Ist-Stand zum 31.12.2019

BE-Typ		Gesamtprognose VSG (Peiffer et al. 2012a)	Stand 31.12.2019 (BMU 2021b)
DWR-BE	Anzahl	13 980	12 015
	Masse [t _{SM}]	7 180	6 005
SWR-BE	Anzahl	15 600	14 892
	Masse [t _{SM}]	2 685	2 514
WWER-BE	Anzahl	5 050	5 048
	Masse [t _{SM}]	580	583
Gesamt	Anzahl	34 630	31 995
	Masse [t_{SM}]	10 445	9 104

Der Stand der bis zum 31.12.2019 in den Lagerbecken und in Transport- und (Zwischen-)Lagerbehältern (TLB) eingelagerten Brennelemente liegt demnach um ca. 2.600 Brennelemente und 1.300 t_{SM} unter dem in der VSG prognostizierten Gesamtinventar für die Endlagerung. In den verfügbaren Quellen gibt es neben der VSG keine Brennelemente-typengenaue Gesamtprognose des insgesamt anfallenden Inventars an bestrahlten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren. Für die Gesamtmenge an endzulagernden Brennelementen gibt das zuständige BMUV eine Prognose von 10.113 t_{SM} (BMU 2020) an, was einer Reduzierung des in der VSG abgeschätzten Mengengerüsts um 332 t_{SM} entspricht. Damit kann das VSG-Mengengerüst als abdeckend hinsichtlich der Gesamtmasse endzulagernder Brennelemente aus den Leistungsreaktoren bezeichnet werden.

Im Abfallmengengerüst der VSG wurden auch Nuklidvektoren für die endzulagernden Brennelemente errechnet, aus denen die Wärmeleistung und die (Gesamt-)Aktivität der Brennelemente abgeschätzt wurde (Peiffer et al. 2012a). Die unterschiedlichen Abklingzeiten der Brennelemente wurden durch eine auf jeweils fünf Jahre genaue Aufteilung der Entladezeiten des zusammengestellten Brennelementinventars realisiert. Allerdings wurden nur jeweils ein Datenpunkt für ein DWR-Brennelement aus Uranoxid, ein DWR-Brennelement aus Uran-Plutonium-Mischoxid (MOX), ein

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 80

SWR-Brennelement aus Uranoxid, ein SWR-Brennelement aus MOX und zwei WWER-Brennelemente berechnet. Axialprofile der Brennstäbe sowie Radialprofile der Brennstäbe innerhalb eines Brennelements wurden hierbei nicht berücksichtigt. Die Berechnungsergebnisse sind für den größten Teil der deutschen Brennelemente abdeckend, allerdings ist aus lediglich sechs Datenpunkten keine Aussage möglich, wie weit die ermittelten Nuklidvektoren von der realen Verteilung in den endzulagernden Brennelementen abweichen. Die Überschätzung des Abbrandes beim größten Teil des vorhandenen Brennelementinventars bedeutet gleichzeitig eine Unterschätzung der Kritikalitätssicherheit dieses Inventars, wenn die ermittelten Nuklidvektoren allgemein angewendet werden. Im Forschungsvorhaben RESUS wurden die Angaben aus dem VSG-Mengengerüst direkt verwendet, um Wärmeleistung, Aktivität und ausgewählte Nuklide zum Jahr 2075 zu berechnen (Bertrams et al. 2020b).

2.2.2.2 Abfälle aus der Wiederaufarbeitung

In einigen Ländern wurden oder werden bestrahlte Brennelemente wiederaufgearbeitet, um darin enthaltene Kernbrennstoffe (allgemein Uran und Plutonium) wiederzuverwerten. Die aus dem zurückgewonnenen Kernbrennstoff gefertigten MOX-Brennelemente haben eine allgemein höhere spezifische Aktivität und Wärmeleistung als Brennelemente aus Uran(IV)-oxid und müssen auch vor dem Reaktoreinsatz entsprechend gehandhabt werden.

Die während der Wiederaufarbeitung anfallenden und in Edelstahlkokillen konditionierten Abfälle müssen von den Erzeugerstaaten wieder zurückgenommen und dort sicher gelagert werden. Neben verpressten Metallstrukturteilen (CSD-C) und verglasten Prozess-, Dekontaminations- und Spüllösungen (CSD-B) als mittelaktiven und vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen fallen auch hochradioaktive, stark wärmeentwickelnde Abfälle in Form von verglasten Spaltproduktlösungen an. Diese werden je nach ihrer Herkunft aus der Wiederaufarbeitung in Frankreich (CSD-V), Großbritannien (UK-HAW) oder Deutschland (WAK) gekennzeichnet; für die VSG wurden diese drei Gruppen unter der Bezeichnung „CSD-V“ zusammengefasst (siehe Tabelle 5). Die äußeren Abmessungen der britischen und französischen Kokillen sind identisch (Patel et al. 2012).

Die Wiederaufarbeitung von Brennelementen und der Export von Kernbrennstoffen zur Wiederaufarbeitung im Ausland wurden zum 01.07.2005 endgültig eingestellt (§ 9a Abs. 1 Atomgesetz (AtG)). Somit stand das endzulagernde Abfallmengengerüst auch für die ab 2010 erstellte VSG bereits fest (Peiffer et al. 2012a). Neben einer Reduktion der zurückzuführenden CSD-B-Kokillen von 308 auf 140 bereits im *Verzeichnis radioaktiver Abfälle mit Stand zum 31.12.2013 (BMUB 2013)* wurde zuletzt am 09.06.2021 die Substitution der zurückzuführenden mittelaktiven CSD-B-Kokillen und CSD-C-Kokillen durch 3 bis 5 TLB mit jeweils bis zu 28 hochradioaktiven CSD-V-Kokillen bekanntgegeben (BMU 2021a). Damit sind nach aktuellem Stand bis zu 3 864 Kokillen mit hochradioaktiven und stark wärmeentwickelnden Abfällen aus der Wiederaufarbeitung endzulagern (siehe Tabelle 5).


Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung									 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 81	
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
SG	0330				EA	TF	0002	00		

Tabelle 5: Endzulagernde Kokillen mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung nach VSG und aktueller Stand

Kokillentyp	VSG (Peiffer et al. 2012a)	Aktueller Stand (BMU 2021b, 2021a)
CSD-V	3 735	bis zu 3 164
UK-HAW		560
WAK		140
CSD-B	308	--
CSD-C	4 104	--

Für die VSG wurde analog zu den damals prognostizierten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren eine Altersstruktur für die aufgeführten drei Kokillentypen angegeben (Peiffer et al. 2012a); typische Zusammensetzungen samt Bandbreite hinsichtlich bestimmter Leitnuklide können aus einem ergänzenden Bericht ebenfalls ermittelt werden (Meleshyn & Noseck 2012). Allerdings sind hier die mit der Substitution der zurückzuführenden CSD-C-Kokillen hinzukommenden bis zu 140 CSD-V-Kokillen (BMU 2021a) nicht enthalten. Für jeweils eine als repräsentativ angenommene Kokille des Typs CSD-V, CSD-B und CSD-C wurden unter Annahmen für die wiederaufgearbeiteten Brennelemente und die Betriebsparameter der Wiederaufarbeitungsanlage Nuklidvektoren ermittelt oder berechnet (Peiffer et al. 2012a). Auch im Forschungsvorhaben RESUS wurden auf Grundlage der VSG-Daten die Aktivitäten einzelner Nuklide und des Gesamtinventars berechnet (Bertrams et al. 2020b). Hinsichtlich des aktualisierten Abfallmengengerüsts (siehe Tabelle 5) sind diese Angaben und Berechnungen zu prüfen.

2.2.2.3 Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren

In Deutschland gab es acht Versuchs- und Prototypreaktoren, die sich derzeit in Stilllegung befinden oder bereits vollständig abgebaut worden sind. Die hochradioaktiven Abfälle aus diesen Anlagen, Brennelemente und Brennstäbe, umfassen eine Schwermetallmasse von etwa 190 t_{SM}, von denen der größte Teil bereits entsorgt worden ist (siehe Tabelle 3). Aus dieser Abfallgruppe sind noch etwa 9,6 t_{SM} endzulagern (BMU 2020). Hinzu kommen Brennelemente aus sechs im Betrieb befindlichen Forschungs- und Unterrichtsreaktoren mit einem Gesamtaufkommen von weniger als 1 t_{SM} mit Stand zum 31.12.2019 (BMU 2020). In Tabelle 6 ist eine Übersicht zu Art und Menge der mit Stand zum 31.12.2019 angefallenen und endzulagernden Brennstäbe und Brennelemente aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren gegeben (BMU 2021b).

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 82
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0330				EA	TF	0002	00	

Tabelle 6: *Endzulagernde hochradioaktive Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren und Verbleib. Ist-Stand zum 31.12.2019, aus (BMU 2021b).*

Anlage	Menge und Art	Lagerung	Standort
AVR	288 161 BE	152 CASTOR THTR/AVR	JEN, Jülich
	173 BE	Kugelbruch im Reaktorbehälter	
THTR-300	2 198 BE	Kugelbruch im Reaktorbehälter	THTR Hamm-Uentrop
	617 606 BE	305 CASTOR THTR/AVR	Brennelemente-Zwischenlager Ahaus
RFR	951 BE	18 CASTOR MTR2	Brennelemente-Zwischenlager Ahaus
KNK II	2 413 BSt.	4 CASTOR KNK	Zwischenlager Nord, EWN
KfK	71 BSt.		
Nuklearschiff „Otto Hahn“	52 BSt.		
FRM II	46 BE 2 Konverterplatten	Lagerbecken	TU München
BER II	66 BE	Lagerbecken	Helmholtz-Zentrum Berlin
FRMZ	82 BE	Lagerbecken	Universität Mainz

Für die bislang in den Brennelemente-Lagerbecken an den jeweiligen Standorten zwischengelagerten Brennelemente des Berliner Experimentier-Reaktors II (BER II), des Forschungsreaktors Mainz (FRMZ) und des Forschungsreaktors München II (FRM II) ist zu gegebenem Zeitpunkt eine Konditionierung in Transport- und Lagerbehälter des Typs CASTOR MTR3 vorgesehen (Peiffer et al. 2012a; Dörr et al. 2011).

Zu den Abfällen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren gibt es weniger detaillierte Informationen als zu den Abfällen aus den Leistungsreaktoren. Zwar sind Aussagen zu Art und Menge der Abfallformen (siehe Tabelle 6) sowie verschiedenen Bauformen (Dörr et al. 2011) möglich, aber Nuklidvektoren sind nicht für alle Abfälle dieser Gruppe berechnet worden, nur für vergleichsweise wenige Zeitpunkte und jeweils nur für einen als repräsentativ angenommenen Brennstoff (Peiffer et al. 2012a). Aus diesen Angaben wurden im Forschungsvorhaben RESUS für ausgewählte Radionuklide die Aktivitäten zum Bezugszeitpunkt 2075 ermittelt (Bertrams et al. 2020b).

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 83

Weiterhin gibt es für die Abfälle aus den noch in Betrieb befindlichen Forschungsreaktoren FRM II und FRMZ keine Gesamtprognose für die endzulagernden Abfallmengen; auch hier gibt es Unterschiede zwischen verschiedenen Prognosen (Peiffer et al. 2012a; Dörr et al. 2011). Für das Forschungsvorhaben RESUS wurden Werte verschiedener Quellen zusammengefasst (Bertrams et al. 2020b), aus denen die Prognose für diese beiden Reaktoren übernommen werden kann.

Allgemein zeichnet sich das gegenüber den anderen beiden Abfallkategorien geringere Abfallaufkommen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren durch eine vergleichsweise hohe Aktivität und eine sehr niedrige Wärmeleistung aus (Bertrams et al. 2020b; Dörr et al. 2011). Die Unterschiede in der chemischen und Isotopenzusammensetzung dieser Abfälle müssen im Sicherheitskonzept berücksichtigt werden.

2.2.3 Diskussion der Inventardaten

Grundsätzlich sind Informationen zu allen zu berücksichtigenden Abfallgruppen vorhanden, wenn auch in unterschiedlicher Genauigkeit, Vollständigkeit und Aktualität. Die für die rvSU benötigten Inventardaten zu Art, Menge und radiologisch-thermischen Eigenschaften, bestimmt durch den Nuklidvektor, können gleichermaßen aus den verfügbaren Referenzen zusammengetragen werden (siehe Tabelle 7). Dabei sind jedoch an einigen Stellen Annahmen oder Vereinfachungen zu treffen.

Tabelle 7: Stand der für die rvSU verfügbaren Inventardaten

Information	BE aus den Leistungsreaktoren	Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren
Art und Menge	Abdeckend (Peiffer et al. 2012a)	Vorhanden (BMU 2021b, 2021a)	Ist-Stand (BMU 2021b) und Abschätzung (Bertrams et al. 2020b; Dörr et al. 2011)
Abklingzeiten	Abschätzung (Peiffer et al. 2012a)	Vorhanden, mit Ausnahmen (BMU 2021a)	Nicht bekannt
Anreicherung bzw. Zusammensetzung	Exemplarisch (Peiffer et al. 2012a)	Exemplarisch (Peiffer et al. 2012a)	Teilweise (Dörr et al. 2011)
Abbrand	Exemplarisch (Peiffer et al. 2012a)	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Nuklidvektor	Exemplarisch (Peiffer et al. 2012a)	Exemplarisch (Peiffer et al. 2012a)	Teilweise (Peiffer et al. 2012a)

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 84

In den folgenden Kapiteln wird für jede der drei zu berücksichtigenden Abfallklassen dargestellt, wie die für die rvSU benötigten Inventardaten aus den verfügbaren Quellen zusammengetragen werden können. Dabei wird auch auf das im Forschungsvorhaben RESUS mit dem Ziel der Grundlagenentwicklung für die rvSU zusammengestellte Abfallinventar (Bertrams et al. 2020b) Bezug genommen, das aufgrund der teilweise übereinstimmenden Grundannahmen an mehreren Punkten direkt für die rvSU genutzt werden kann.

2.2.3.1 Inventardaten zu Brennelementen aus den Leistungsreaktoren

Für die Brennelemente aus den Leistungsreaktoren stehen der rvSU als Mengengerüst die Daten aus der VSG (Peiffer et al. 2012a) zur Verfügung, die gegenüber dem massenbezogenen etwas kleineren zu erwartenden realen Inventar als abdeckend gelten können. Ohne eine aktuellere Referenz zur Altersstruktur der Brennelemente findet hier ebenfalls die Abschätzung aus der VSG Verwendung. Die zur Berechnung des Nuklidvektors und der radiologisch-thermischen Eigenschaften der Brennelemente wesentlichen Größen Anfangszusammensetzung und Abbrand sind in der VSG nur exemplarisch für sechs Kombinationen gegeben, die zumindest für den größten Teil des Brennelementinventars abdeckend im Sinne der Sicherheitsuntersuchung sind.

Da die Berechnung des Mengengerüsts und des Nuklidvektors für diese Abfallkategorie demnach den gleichen Annahmen folgt wie im Forschungsvorhaben RESUS (Bertrams et al. 2020b), kann hier eine direkte Übertragbarkeit der dort gewonnenen Ergebnisse angenommen werden, gegebenenfalls nach detaillierteren Neuberechnungen für relevante Zeitpunkte auf Basis der VSG-Daten.

Für künftige Betrachtungen und die nachfolgenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach §§ 16 und 18 StandAG sind weitere Informationen zu Art, Menge und Altersstruktur der endzulagernden Brennelemente notwendig. Essentiell ist die Berechnung weiterer Datenpunkte im Anreicherungs-Abbrand-Spektrum der in Deutschland anfallenden bestrahlten Brennelemente, um das Nuklidinventar sowohl der Endlagergebinde als auch des gesamten Abfallinventars mit größerer Verlässlichkeit abzubilden.

2.2.3.2 Inventardaten zu Abfällen aus der Wiederaufarbeitung

Art und Menge der endzulagernden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sind aus Veröffentlichungen des zuständigen BMUV (BMU 2021b, 2021a) vollständig bekannt. Exemplarische Nuklidvektoren für jeweils eine Kokille des Typs CSD-V, CSD-B und CSD-C wurden im Rahmen der VSG berechnet (Peiffer et al. 2012a). Die Abklingzeiten der Kokillen sind für die im deutschen Abfallinventar vertretenen Kokillen des Typs CSD-V auf 5 Jahre genau im VSG-Mengengerüst (Peiffer et al. 2012a) gegeben. Ausgenommen hiervon sind lediglich die im Juni 2021 neu hinzugekommenen bis zu 140 CSD-V-Kokillen, die die ursprünglich zurückzuführenden 4.104 CSD-C-Kokillen und 140 CSD-B-Kokillen ersetzen (BMU 2021a). Für diese Kokillen müssen plausible Annahmen zur Abklingzeit getroffen werden.

Die im Forschungsvorhaben RESUS berechneten Nuklidinventare beziehen sich auf die im VSG-Mengengerüst beschriebene Anzahl der unterschiedlichen Kokillentypen. Nuklidvektoren und Altersstruktur wurden ebenfalls aus der VSG entnommen. Für die die CSD-V-Kokillen betreffenden

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 85

Ergebnisse müssen nachberechnete Beiträge der neu hinzukommenden bis zu 140 Kokillen addiert werden.

Auch für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung gilt, dass eine Neuberechnung von Werten anhand des aktuellen Mengengerüsts, unter Verwendung der exemplarischen Nuklidvektoren aus dem VSG-Mengengerüst zu für die rvSU verwendbaren Ergebnissen führt.

Für die weiteren vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und zukünftige Betrachtungen sind weitere Informationen zum Nuklidinventar der einzelnen Kokillen wünschenswert, um die möglichen und teilweise dokumentierten (Meleshyn & Noseck 2012) Bandbreiten in deren Nuklidvektoren genauer abzubilden. Auch die Abklingzeiten der neu hinzukommenden bis zu 140 CSD-V-Kokillen müssen ermittelt werden.

2.2.3.3 Inventardaten zu Abfällen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren

Zu den vorhandenen Abfällen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren gibt es genaue Angaben im Verzeichnis radioaktiver Abfälle (BMU 2021b). Darüber hinausgehende Abfallprognosen für die noch in Betrieb befindlichen Forschungsreaktoren FRM II und FRMZ finden sich im VSG-Mengengerüst (Peiffer et al. 2012a) und im LABRADOR-Bericht (Dörr et al. 2011). Das Forschungsvorhaben RESUS (Bertrams et al. 2020b) kombiniert diese Bestände zu einem einheitlichen Inventar. Die für RESUS aus den Forschungsvorhaben KOSINA (Bertrams et al. 2015) und LABRADOR entnommenen Angaben für die in den Veröffentlichungen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) nicht detailliert aufgeführten Gesamtprognosen für die Abfälle aus den Forschungsreaktoren FRM II und FRMZ werden als abdeckend angenommen, müssen aber durch aktuelle Informationen der Betreiber aktualisiert werden. Die in LABRADOR und in der VSG angegebene Anzahl von 2 484 Brennstäben der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage Karlsruhe (KNK) II (Dörr et al. 2011) wird im Verzeichnis radioaktiver Abfälle in 2413 Brennstäbe der KNK II und 71 Brennstäbe aus Nuklearexperimenten am Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) unterteilt (BMU 2021b). Im Forschungsvorhaben RESUS wurden die 2413 Brennstäbe der KNK II mit aufgelistet, jedoch die 71 KNK-Brennstäbe nicht aufgeführt (Bertrams et al. 2020b). Die Angaben aus dem Verzeichnis radioaktiver Abfälle des BMU sind hier maßgebend.

Mit den teilweise im VSG-Mengengerüst berechneten Nuklidvektoren für exemplarische Brennelemente aus einigen Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren (Peiffer et al. 2012a) kann für die Abfälle aus den Anlagen BER II, FRM II und KNK II eine Abschätzung der aus dieser Abfallgruppe beigetragenen Radionuklide erfolgen. Da das Mengengerüst für den Hochtemperaturreaktor der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich (AVR) und den Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR)-300 in der Zusammenstellung des Forschungsvorhabens RESUS von den übrigen Forschungsreaktor-Brennelementen getrennt aufgeführt worden ist, kann dieser Nuklidvektor für die rvSU direkt verwendet (Bertrams et al. 2020b) bzw. aus den zugrundeliegenden Angaben (Peiffer et al. 2012a) für relevante Zeitpunkte detaillierter neu berechnet werden.

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Blatt: 86

Für die Berücksichtigung der Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren in den zukünftigen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind grundlegende Informationen zu aktualisieren und zu überprüfen (Art und Menge teilweise, Nuklidvektoren umfassend) bzw. überhaupt zu beschaffen (insbesondere Abbrände bzw. Neutronenfluenzen, Abklingzeiten, Nuklidvektoren).