

Störfallanalyse für die Forschungsreaktoranlage und das Heiße Labor

Erläuterungsbericht zur Stilllegung des Forschungsreaktors FRG-1 und Abbau der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors sowie die Zerlegung des Reaktordruckbehälters des Nuklearschiffs Otto Hahn

Bericht Nr. EB-FRG/HL/RDB-OH-04

**Helmholtz-Zentrum hereon GmbH
Zentralabteilung Forschungsreaktor
Max-Planck-Straße 1
21502 Geesthacht**

Datum: 15.05.2023

Revision: 4

	Erstellt	Geprüft	Freigegeben
Firma	ISE	Hereon	Hereon
Name	██████	██████	██████████
Unterschrift	████████████████████	████████████████████	████████████████████

Änderungsverzeichnis

Revision	Datum	Änderungsgrund
0	19.02.2019	Erstellung
1	28.06.2022	Überarbeitungsbedarf aufgrund der Prüfnotizen der Sachverständigen und der Genehmigungsbehörde zur Rev. 0 vom 01.09.2021 und 10.05.2021.
2	27.01.2023	Überarbeitungsbedarf aufgrund der Evidenzprüfung der Sachverständigen und der Genehmigungsbehörde zur Rev. 1 vom 12.09.2022.
3	18.04.2023	Überarbeitungsbedarf aufgrund der Evidenzprüfung der Sachverständigen und der Genehmigungsbehörde zur Rev. 2 vom 27.03.2023.
4	15.05.2023	Aktualisierung aufgrund des Bemessungsnachweises für die Regenwasserleitung für Regen/Starkregen. Die Revisionsstriche der Vorgängerrevision (Rev. 3) wurden zwecks Begutachtung durch den Sachverständigen beibehalten.

Dieser Bericht wurde in Zusammenarbeit mit der Firma

**ISE Ingenieurgesellschaft für
Stilllegung und Entsorgung mbH**
Carl-Zeiss-Straße 41
63322 Rödermark



erstellt.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	6
Begriffsbestimmungen	9
1 Einleitung	13
2 Ausgangssituation	14
3 Vorgehensweise	15
3.1 Überblick über Störfallmöglichkeiten mit nicht geplanten Freisetzungen radioaktiver Stoffe	16
3.2 Methodik	17
3.2.1 Abdeckendes Ereignis	17
3.2.2 Berücksichtigung von Einzelfehlern	18
3.2.3 Weitere Randbedingungen und Annahmen	18
4 Einwirkungen von innen	20
4.1 Anlageninterner Brand (einschließlich Filterbrände)	20
4.2 Leckage von Behältern	24
4.3 Überflutungen in der Anlage	26
4.4 Komponentenversagen	27
4.5 Ereignisse bei der Handhabung von Lasten	27
4.5.1 Absturz von Behältern mit freisetzbarem radioaktivem Inventar (Lastabsturz)	27
4.5.2 Kollision von Lasten mit Behältern oder Systemen mit freisetzbarem radioaktivem Inventar	31
4.6 Ereignisse bei Transportvorgängen	31
4.7 Gegenseitige Beeinflussung von Mehrblockanlagen und benachbarten Anlagen am Standort	32
4.7.1 Wechselwirkungen mit der Transportbereitstellungshalle (TBH)	32
4.7.2 Wechselwirkungen zu anderen Anlagen	33
4.8 Anlageninterne Explosionen	33
4.9 Chemische Einwirkungen	34
4.10 Ausfälle und Störungen sicherheitstechnisch wichtiger Einrichtungen	34
4.10.1 Ausfälle und Störungen von Versorgungseinrichtungen	35
4.10.2 Ausfälle und Störungen von leitetechnischen und Überwachungseinrichtungen	36
4.10.3 Ausfälle und Störungen von Brandschutzeinrichtungen	36
4.10.4 Ausfälle und Störungen von Lüftungsanlagen und Einrichtungen zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe	37
4.11 Handhabungsfehler	38
5 Einwirkungen von außen	40
5.1 Naturbedingte Einwirkungen	40
5.1.1 Erdbeben	40
5.1.1.1 Umstürzen von Abfallgebindestapeln in der FRG	41
5.1.1.2 Großflächige mechanische Einwirkung in der FRG	42
5.1.1.3 Brand	43
5.1.1.4 Betonzellen 2 – 4 des HL	44
5.1.1.5 Zusammenfassung der Freisetzungen	45
5.1.2 Überflutung (Hochwasser)	46
5.1.3 Regen (auch Starkregenereignisse)	46
5.1.4 Hagel	47
5.1.5 Sturm (einschließlich Tornado)	47
5.1.5.1 Absturz von Ziegeln des Fortluftkamins	47

5.1.5.2	Tornado	48
5.1.6	Schneefall	50
5.1.7	Schneelasten	50
5.1.8	Frost	51
5.1.9	Blitzschlag	51
5.1.10	Außergewöhnliche Hitzeperioden	51
5.1.11	Hohe oder niedrige Luftfeuchtigkeit	52
5.1.12	Biologische Einwirkungen	52
5.1.13	Waldbrände	52
5.2	Zivilisatorisch bedingte Einwirkungen	53
5.2.1	Eindringen gefährlicher Stoffe	53
5.2.2	Anlagenexterner Brand	54
5.3	Ereignisse, die nicht durch das Ereignisspektrum im Abschnitt 8.3 der ESK-Leitlinien abgedeckt sind	54
6	Betrachtung des abdeckenden Ereignisses	55
6.1	Auswahl des abdeckenden Ereignisses für die Ausbreitungs- und Dosisrechnung	55
6.2	Berechnung der Exposition in der Umgebung	55
6.3	Vergleich der ermittelten Dosiswerte mit dem Grenzwert der StrlSchV	56
7	Betrachtung von abdeckenden, auslegungsüberschreitenden Ereignissen	58
7.1	Anlagenexterne Explosion	58
7.2	Flugzeugabsturz	59
7.2.1	Freisetzungsquellterm Flugzeugabsturz auf die FRG	60
7.2.2	Freisetzungsquellterm Flugzeugabsturz auf das HL	62
7.2.3	Berechnung der Exposition in der Umgebung	65
7.3	Vergleich der ermittelten Dosiswerte mit den radiologischen Kriterien der Notfall-Dosiswerte-Verordnung	67
8	Zusammenfassung der Störfallanalyse	68
9	Literatur	69

Anlagen

Anlage 1:	Dokumentation der Berechnung der Exposition in der Umgebung	74
Anlage 2:	Exposition von beruflich exponiertem Personal durch Lastabsturz	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-1:	Karte der beobachteten Tornados (rot: F3, gelb: F2, grün: \leq F1)	49
----------------	--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Quellterm Brand	21
Tabelle 4-2:	Quellterm Leckage eines Abwasserbehälters	25
Tabelle 4-3:	Quellterm Lastabsturz Normalbeton	30
Tabelle 4-4:	Quellterm Lastabsturz Barytbeton	30
Tabelle 4-5:	Quellterm Ausfall Strahlenschutzeinrichtung	38
Tabelle 5-1:	Aktivitätsinventar Reaktorbeckenbeton und Freisetzung durch umstürzende Abfallgebände	42
Tabelle 5-2:	Quellterm Erdbeben mit großflächiger mechanischer Einwirkung	43
Tabelle 5-3:	Quellterm Erdbeben mit Brand eines Fasses	43
Tabelle 5-4:	Quellterm Erdbeben Heißes Labor	45
Tabelle 5-5:	Gesamtquellterm Erdbeben	45
Tabelle 7-1:	Nuklidspezifischer Quellterm Flugzeugabsturz auf die FRG	62
Tabelle 7-2:	Nuklidspezifischer Quellterm Flugzeugabsturz auf das HL	64
Tabelle 7-3:	Zusammenfassung der Partikelgrößenverteilung (AED) beim Flugzeugabsturz	66
Tabelle 7-4:	Zusammenfassung der potentiellen Exposition beim Flugzeugabsturz	67

Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
AED	aerodynamische Partikelgrößenäquivalente
AGG	Abfallgebindegruppe
AP	Aufpunkt
AtG	Atomgesetz
BAnz.	Bundesanzeiger
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BK	Belastungsklasse
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
bzw.	beziehungsweise
ca.	zirka
DIN	Deutsches Institut für Normung
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWR	Druckwasserreaktor
e. V.	eingetragener Verein
etc.	et cetera
ESK	Entsorgungskommission
ESWD	Europäische Unwetterdatenbank (European Severe Weather Database)
EVA	Einwirkungen von außen
EVI	Einwirkungen von innen
f.	folgende
FRG	Forschungsreaktoranlage Geesthacht
FRG-1	Forschungsreaktor Geesthacht – 1
FRG-2	Forschungsreaktor Geesthacht – 2

GGBVOHH	Gefahrgut- und Brandschutzverordnung Hafen Hamburg
GGVSEB	Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
HAKONA	Halle zur Komponenten Nachuntersuchung
Hereon	Helmholtz-Zentrum hereon GmbH
HL	Heißes Labor
HmbGVBl.	Hamburgisches Gesetz- und Verordnungsblatt
HTTF 2	Hydrogen Tank Testing Facility 2
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
KOSTRA	Starkregenkatalog des Deutschen Wetterdienstes
m. ü. NN	Meter über Normalnull
NDWV	Notfall-Dosiswerte-Verordnung
Nr.	Nummer
ODL	Ortsdosisleistung
RA-Keller	Radioaktiver Keller
RDB	Reaktordruckbehälter
RDB-OH	Reaktordruckbehälter des Nuklearschiffs Otto Hahn
Rev.	Revision
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
S.	Seite
SAFER 2	Software zur Ermittlung der Exposition in Bezug auf die Eingreifrichtwerte des Katastrophenschutzes
SprengV	Verordnung zum Sprengstoffgesetz
SSK	Strahlenschutzkommission
STRESS	Software zur Ermittlung der Exposition
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
STWG	Stadtwerke Geesthacht

SZK	Standortzwischenlager Krümmel
TBH	Transportbereitstellungshalle
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VGB	Vereinigung der Großkesselbesitzer e. V.
z. B.	zum Beispiel

Begriffsbestimmungen

Abbau	Der Abbau einer kerntechnischen Anlage umfasst die Beseitigung von Strukturen (Gebäuden, Systeme, Komponenten), die Regelungsgegenstand der Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb der Anlage nach § 7 Abs. 1 AtG /1/ waren oder entsprechend zu bewerten sind.
Abfall, radioaktiv	Radioaktive Stoffe im Sinne des § 2 Abs. 1 AtG, die nach § 9a AtG geordnet beseitigt werden müssen, ausgenommen Ableitungen im Sinne des § 99 StrlSchV /2/.
Abfallgebinde	Einheit aus Abfallprodukt (auch in Innenbehältern) und für das Endlager Konrad zugelassenem Abfallbehälter.
Abfallprodukt	Verarbeiteter radioaktiver Abfall ohne Verpackung und Abfallbehälter.
Abluft	Die aus einem Gebäude oder einem Raum abgeführte Luft.
Aktivierung	Vorgang, bei dem ein Material durch Beschuss mit Neutronen, Protonen oder anderen Teilchen radioaktiv wird.
Aktivität	Zahl der je Sekunde in einer radioaktiven Substanz zerfallenden Atomkerne. Die Maßeinheit ist das Becquerel (Bq).
Aktivität, spezifische	Verhältnis der Aktivität eines Radionuklids zur Masse des Materials, in dem das Radionuklid verteilt ist.
Aktivitätskonzentration	Verhältnis der Aktivität eines Radionuklids zum Volumen des Materials, in dem das Radionuklid verteilt ist.

Anlage	<p>Zur Anlage gehören alle Teile, die in einem Genehmigungsverfahren nach § 7 Absatz 1 oder § 9 Abs. 1 AtG erfasst worden sind.</p> <p>Da sich die Anlage während des Stilllegungsverfahrens (ausgenommen ist der sichere Einschluss) in einer ständigen physischen Veränderung befindet, können sich Art und Umfang der Anlage z. B. durch Entlassungen mit dem Fortschritt der Stilllegungsarbeiten ändern.</p>
Dekontamination	<p>Beseitigung oder Verminderung einer Kontamination.</p>
Exposition	<p>Einwirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper. Ganzkörperexposition ist die Einwirkung ionisierender Strahlung auf den ganzen Körper, Teilkörperexposition ist die Einwirkung ionisierender Strahlung auf einzelne Organe, Gewebe oder Körperteile. Äußere Exposition ist die Einwirkung durch Strahlungsquellen außerhalb des Körpers, innere Exposition ist die Einwirkung durch Strahlungsquellen innerhalb des Körpers</p>
Forschungsreaktoranlage	<p>Die Forschungsreaktoranlage (FRG) besteht aus dem FRG-1 und den noch vorhandenen Anlagenteilen des FRG-2.</p>
Fortluft	<p>In das Freie abgeführte Abluft.</p>
Fortluftkamin	<p>Zentrale Abgabestelle, die die Abluft der über Filter geleiteten Luft aus den Kontroll- und Sperrbereichen der Anlage emittiert.</p>
Kontamination	<p>Verunreinigung mit radioaktiven Stoffen, die die nicht festhaftende, die festhaftende und die über die Oberfläche eingedrungene Aktivität umfasst. Die Einheit der Messgröße der Oberflächenkontamination ist die flächenbezogene Aktivität in Becquerel pro Quadratzentimeter.</p>

Kontrollbereich	Bereich, in dem Personen im Kalenderjahr eine effektive Dosis von mehr als 6 mSv oder höhere Organdosen als 45 mSv für die Augenlinse oder 150 mSv für die Haut, die Hände, die Unterarme, die Füße und Knöchel erhalten können.
Nuklid	Eine durch seine Protonenzahl, Neutronenzahl und seinen Energiezustand charakterisierte Atomart.
Primärwasser	Wasser, das mit den Brennelementen in direkten Kontakt kommt.
Radioaktivität	Eigenschaft bestimmter Stoffe, sich ohne äußere Einwirkung umzuwandeln und dabei eine charakteristische Strahlung auszusenden.
Restbetrieb	Als Restbetrieb wird der Betrieb aller für die Stilllegung notwendigen Versorgungs-, Sicherheits- und Hilfssysteme sowie der Betrieb der für den Abbau von Komponenten, Systemen und Gebäuden notwendigen Einrichtungen nach Erteilung der Stilllegungsgenehmigung bezeichnet.
Reststoffe, radioaktiv	Während der Stilllegung und des Abbaus anfallende Stoffe, bewegliche Gegenstände, Anlagen und Anlagenteile, die kontaminiert und/oder aktiviert sind und schadlos verwertet oder als radioaktiver Abfall geordnet beseitigt werden.
Sekundärabfälle, radioaktiv	Radioaktive Abfälle, die beim Stilllegungsbetrieb und beim Abbau durch zusätzlich in die Anlage eingebrachte Materialien bzw. bei der Verarbeitung von radioaktiven Reststoffen oder bei der Behandlung von radioaktiven Abfällen entstehen.

Stilllegung	Der Begriff „Stilllegung“ bezieht sich im Atomgesetz auf die Maßnahmen in der zeitlichen Phase zwischen endgültiger Betriebs-einstellung einerseits und dem Beginn des sicheren Einschlus-ses oder des Abbaus der Anlage oder von Anlagenteilen ande-rerseits.
Störfall	Ereignisablauf, bei dessen Eintreten der Abbaubetrieb oder die Tätigkeiten aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden können und für den die Anlage auszulegen ist oder für den bei Tätigkeiten Schutzvorkehrungen vorzusehen sind.
Strahlenschutz	Der Schutz des Menschen und der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung.
System	Zusammenfassung von Komponenten zu einer technischen Ein-richtung, die als Teil der Anlage selbstständige Funktionen aus-führt.

1 Einleitung

Die Forschungsreaktoranlage und das Heiße Labor des Helmholtz-Zentrums hereon GmbH sollen stillgelegt und ohne vorherigen Sicheren Einschluss abgebaut werden. Eine Stilllegungs- und Abbaugenehmigung darf nur erteilt werden, wenn die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Stilllegung und den Abbau getroffen ist (§ 7 Abs. 3 Satz 2 Atomgesetz (AtG) /1/ in Verbindung mit § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG). Im Rahmen dieser Störfallanalyse wird nachgewiesen, dass die Exposition bei den während des Abbaus zu unterstellenden Störfällen immer unterhalb des Störfallplanungswertes liegt.

Gemäß § 104 Abs. 3 und 4 in Verbindung mit Abs. 6 StrlSchV /2/ sind bei der Planung der Stilllegung und des Abbaus bauliche oder technische Schutzmaßnahmen unter Berücksichtigung des potenziellen Schadensausmaßes zu treffen, um die Exposition bei Störfällen während des Abbaus durch die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung zu begrenzen. Die Bundesregierung erlässt mit Zustimmung des Bundesrates allgemeine Verwaltungsvorschriften, in denen Schutzziele zur Störfallvorsorge festgelegt werden. Bis zu deren Inkrafttreten ist gemäß § 194 StrlSchV bei der Planung die Störfallexposition so zu begrenzen, dass die durch die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung verursachte effektive Dosis von 50 mSv (Störfallplanungswert) nicht überschritten wird.

2 Ausgangssituation

Die für den Abbau der Forschungsreaktoranlage (FRG) und des Heißen Labors (HL) zu treffenden Vorsorgemaßnahmen richten sich nach dem noch in der Anlage vorhandenen Gefährdungspotenzial und der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Störfalls.

Das Gefährdungspotenzial ist bereits mit der Einstellung des Forschungsreaktorbetriebes und dem Abtransport der Brennelemente deutlich verringert worden. Die aus dem Betrieb der Anlage stammenden Barrieren zum Einschluss der radioaktiven Stoffe sind jedoch bis zum Ende des gesamten Abbaus, so weit erforderlich, noch vorhanden. Ferner fehlt bei den zu unterstellenden Ereignissen das Energiepotenzial zur Freisetzung radioaktiver Stoffe weitgehend. So fehlen z. B. das Energiepotenzial, das beim Forschungsreaktorbetrieb aus der Kernspaltung zur Neutronenerzeugung resultiert und gleichzeitig das hohe Aktivitätsinventar der Brennelemente. Das Gefährdungspotenzial resultiert im Wesentlichen aus dem noch vorhandenen, nicht fest gebundenen Aktivitätsinventar (im Wesentlichen ein Teil der in der Anlage vorhandenen Kontamination), das bei Störfällen, z. B. beim Abbau bzw. beim Transport von Anlagenteilen in der Anlage sowie beim Umgang mit radioaktiven Reststoffen und Abfällen, anteilig in die Umgebung freigesetzt werden kann.

Die Abschätzung des Gesamtaktivitätsinventars der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors ergab einen Wert von ca. $2,0E+15$ Bq /3/. Das Aktivitätsinventar ist zu fast 100 % fest in den aktivierten Anlagenstrukturen der Reaktorbeckeneinbauten und der Reaktorbecken eingebunden und somit nicht unmittelbar freisetzbar. Deutlich weniger als 1 % des Gesamtaktivitätsinventars liegt als Kontamination vor. Im Vergleich hierzu beträgt das radioaktive Inventar eines modernen Druckwasserreaktors nach Abtransport der Brennelemente ca. $1E+17$ Bq.

Mit der Einstellung des Forschungsreaktorbetriebes und dem Abtransport der Brennelemente sind die Schutzziele „Kontrolle der Reaktivität“ und „Kühlung der Brennelemente“ entfallen. Für die Stilllegung und den Abbau verbleiben als Schutzziele der „sichere Einschluss der radioaktiven Stoffe“ und die „Vermeidung unnötiger Exposition, Begrenzung und Kontrolle der Exposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung“.

3 Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Störfallanalyse werden gemäß den Forderungen des Atomgesetzes und den Empfehlungen des Stilllegungsleitfadens /4/ bzw. der ESK *Leitlinien zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen* /5/ die Störfälle (Ereignisse) ermittelt, die während des Abbaus der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors zu unterstellen sind. Dabei wird der Stilllegungsleitfaden mit den darin aufgeführten Ereignissen zu Grunde gelegt. Die für den gesamten Abbau zu betrachtenden Ereignisse werden gemäß der Systematik des Stilllegungsleitfadens in zwei Gruppen unterteilt:

- Ereignisse durch „Einwirkungen von innen (EVI)“
- Ereignisse durch „Einwirkungen von außen (EVA)“

Zunächst werden die gemäß Stilllegungsleitfaden zu betrachtenden Ereignisse zusammengestellt und geprüft, in wie weit diese auf die Stilllegung und den Abbau der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors zutreffen und näher zu betrachten sind. Für die radiologisch relevanten Ereignisse wird die mögliche Freisetzung von Radioaktivität in die Umgebung (Quellterm) ermittelt. Aus den betrachteten Ereignissen werden diejenigen mit den höchsten Quelltermen für die Berechnung der Folgedosis in der Umgebung unter Anwendung der Störfallberechnungsgrundlagen /6/ ausgewählt. Anhand der berechneten Folgedosen in der Umgebung wird der abdeckende Störfall definiert. Anschließend erfolgt eine zusammenfassende Bewertung durch Vergleich der potenziellen radiologischen Auswirkungen mit dem gesetzlichen Grenzwert. Gemäß § 104 Absatz 6 StrlSchV sollen die Schutzziele zur Störfallvorsorge durch allgemeine Verwaltungsvorschriften präzisiert werden. Bis zu deren Inkrafttreten gilt nach § 194 StrlSchV für Auslegungsstörfälle ein Störfallplanungswert für die effektive Dosis von 50 mSv. In Anlehnung an § 193 Abs. 1 wird für die Ausbreitungs- und Dosisrechnung weiterhin das Modell (Gauß-Fahnenmodell) des Kapitel 4 der Störfallberechnungsgrundlagen /6/ angewendet.

Darüber hinaus wird als sehr seltenes, auslegungsüberschreitendes Ereignis eine anlagenexterne Explosion und der Flugzeugabsturz auf die abzubauenen Forschungsreaktoranlage und das Heiße Labor betrachtet. Die Folgen eines Flugzeugabsturzes werden als abdeckendes Ereignis entsprechend den Vorgaben der Notfall-Dosiswerte-Verordnung (NDWV) /7/ betrachtet und bewertet.

3.1 Überblick über Störfallmöglichkeiten mit nicht geplanten Freisetzungen radioaktiver Stoffe

Für die FRG und das HL ergeben sich gemäß Empfehlungen des Stilllegungsleitfadens /4/ die folgenden zu betrachtenden Ereignisse:

- Einwirkungen von innen (EVI):
 - Anlageninterner Brand (einschließlich Filterbrände),
 - Leckage von Behältern,
 - Überflutungen in der Anlage,
 - Komponentenversagen (z. B. Versagen von Behältern mit hohem Energieinhalt),
 - Ereignisse bei der Handhabung von Lasten,
 - Absturz von Behältern mit freisetzbarem radioaktivem Inventar
 - Kollision von Lasten mit Behältern oder Systemen mit freisetzbarem radioaktivem Inventar
 - Ereignisse bei Transportvorgängen,
 - Gegenseitige Beeinflussung von Mehrblockanlagen und benachbarten Anlagen am Standort,
 - Anlageninterne Explosionen,
 - Chemische Einwirkungen,
 - Ausfälle und Störungen sicherheitstechnisch wichtiger Einrichtungen.
- Einwirkungen von außen (EVA):
 - Naturbedingte Einwirkungen, z. B.:
 - Erdbeben,
 - Überflutung (Hochwasser),
 - Regen (auch Starkregenereignisse),
 - Hagel,
 - Sturm (einschließlich Tornado),
 - Schneefall,
 - Schneelasten,
 - Frost,
 - Blitzschlag,
 - Außergewöhnliche Hitzeperioden,
 - Hohe oder niedrige Luftfeuchtigkeit,
 - Biologische Einwirkungen (z. B. mikrobiologische Korrosion),

- Waldbrände,
- Zivilisatorisch bedingte Einwirkungen, z. B.:
 - Flugzeugabsturz (auslegungsüberschreitend),
 - Anlagenexterne Explosion (auslegungsüberschreitend),
 - Eindringen gefährlicher Stoffe,
 - Anlagenexterner Brand.

Weitere Ereigniskategorien in Verbindung mit Brennelementen (Unterkritikalität, Wärmeabfuhr) sind aufgrund der Brennelementfreiheit gemäß /4/ nicht relevant.

3.2 Methodik

In den Kapiteln 4 und 5 werden für die Auslegungsstörfälle die Fälle mit den größten Freisetzungspotential ermittelt. In Kapitel 6 erfolgt dann die entsprechende Ausbreitungs- und Dosisrechnung für das abdeckende Ereignis zur Ermittlung der Exposition in der Umgebung. Die auslegungsüberschreitenden Ereignisse sind in Kapitel 7 beschrieben.

3.2.1 Abdeckendes Ereignis

Sofern in einem Ereignisverlauf Folgen eines Ereignisses eintreten, die bereits separat unterstellt und beschrieben sind, wird dieses Ereignis durch das andere abgedeckt, da diese zum gleichen Ergebnis führen, z. B.:

- Eindringen von Gefährlichen Gasen / außergewöhnliche Hitzeperioden etc. → Fehlbedienung durch das Personal (Handhabungsfehler) → Lastabsturz.

Ebenso wird ein Ereignis als abdeckend betrachtet, wenn im Vergleich zu anderen Ereignissen ein entsprechend deutlich größeres Schadensbild und Freisetzungspotential zu erwarten ist, wie z. B.:

- Lastabsturz aus unterschiedlichen Höhen,
- Lastabsturz mit und ohne Stützbrand,
- Lastabsturz innerhalb und außerhalb von Gebäuden (mit und ohne Fortluftfilterung).

3.2.2 Berücksichtigung von Einzelfehlern

Im Restbetrieb wird kein Einzelfehler in den Sicherheitseinrichtungen unterstellt, da entweder

- das Einzelfehlerkonzept nicht anwendbar ist,
z. B. bei Freisetzungen außerhalb der Gebäude,
- Komponenten und Anlagenteile entsprechend ausgelegt sind (Vorsorge / Redundanzen),
z. B. doppelwandige Behälter und Leitungen, als Auffangwanne ausgebildete Gebäudestrukturen, Brandschutzwände, Gebäudeabschlussklappen,
- Einzelfehler sich nicht störfallverschärfend auswirken,
z. B. Ausfall der Fortluftanlage.

In einigen der folgenden Auslegungstörfälle wird die Rückhaltung durch den Schwebstofffilter der Fortluftanlage unterstellt. Bei einer zusätzlich unterstellten Störung oder Ausfall der Fortluftanlage oder durch Auslösung der Brandmeldeanlage führt dies letztendlich dazu, dass automatisch die Lüftungstechnische Isolation der Reaktorhalle und der Betonzellen 2 – 4 über pneumatische Absperrklappen erfolgt. Damit erfolgt keine relevante Freisetzung aus den Gebäuden.

Es wird unterstellt, dass die Integrität der Gebäude und Gebäudestrukturen bei den Auslegungstörfällen intakt bleiben.

3.2.3 Weitere Randbedingungen und Annahmen

Bei der Durchführung der Störfallanalyse wurden die folgenden Randbedingungen berücksichtigt:

- Im Restbetrieb werden keine Auslegungsanforderungen aus der EVA berücksichtigt, da zum Zeitpunkt der Errichtung der FRG und des HL keine Regelwerke zur EVA-Auslegung vorlagen. Dies stellt eine konservative Nachweisführung dar. Die radiologischen Auswirkungen sind in der Ereignisanalyse zu berücksichtigen.
- Im Restbetrieb werden in der Ereignisanalyse kausal unabhängige Ereignisse nicht gleichzeitig angenommen. Infolge des Ereignisses auftretende Folgewirkungen sind jedoch berücksichtigt.

- Im Rahmen der Ereignisanalyse werden auch für den Restbetrieb Anlagensicherungseinrichtungen und -maßnahmen zur Prävention unterstellt.

Während der Betriebszeit und dem Nachbetrieb der FRG und des HL sind Ereignisse, Betriebsweisen und Betriebserfahrungen aus vergleichbaren kerntechnischen Anlagen über Informationen der Behörde, des VGB und öffentlich zugänglichen Quellen kontinuierlich auf Relevanz für die eigenen Anlagen ausgewertet worden.

Für die Stilllegung und den Abbau der FRG und des HL wurden insbesondere Erfahrungen aus dem Arbeitskreis Forschungsreaktoren zur Stilllegung und den Abbau von Forschungsreaktoren und Heißen Zellen sowie öffentlich zugänglichen Quellen /8/ für die Sicherheitsanalysen berücksichtigt.

Bei den folgenden Betrachtungen werden Aktivitäten bzw. Aktivitätskonzentrationen insofern als „nicht relevant“ bezeichnet, wenn diese aufgrund der Geringfügigkeit nicht dosisrelevant (Absolutwert) sind. Ebenso erfolgt diese Bezeichnung, wenn ein entsprechender Beitrag im Verhältnis zu anderen Beiträgen oder der Gesamtaktivität vernachlässigbar ist.

4 Einwirkungen von innen

4.1 Anlageninterner Brand (einschließlich Filterbrände)

Brandverhinderung, Branderkennung und Brandbekämpfung in der Anlage sind durch die Brandschutzordnung /9/ gewährleistet. Auf Grund der Brandschutzmaßnahmen und der Gegebenheiten vor Ort kann die Entstehung und die Ausbreitung eines Brandes als äußerst unwahrscheinlich angesehen werden. Die Brandlasten werden im Verlauf des Abbaus ständig reduziert. Zusätzliche relevante Brandlasten durch Einrichtungen für die Durchführung der Abbautätigkeiten ergeben sich nicht. Auswirkungen durch das Ereignis Brand sind nicht zu befürchten.

Ungeachtet dessen wird der Brand eines Behälters, der mit kontaminierten Putzlappen gefüllt ist, unterstellt. Der unterstellte Brand bleibt auf einen Behälter beschränkt, da sichergestellt wird, dass immer nur 1 Behälter an einem Arbeitsplatz für die Sammlung von brennbaren Abfällen offensteht. Weitere in der Anlage vorhandene brennbare Abfälle befinden sich in geschlossenen Behältern (z. B. 200-l-Fass).

Der Brand von Graphit der Thermischen Säule wird nicht betrachtet, da Graphit extrem schwer entflammbar ist und beim Abbau selbst mit Schneidbrennern nicht genügend Energie aufgebracht werden kann, um den Graphit zu entzünden. Z. B. wird Graphit in Schmelzen bis zu Temperaturen von 1 700 °C als Elektrodenmaterial eingesetzt /10/. Darüber hinaus ist das Aktivitätsinventar im Graphit so gering /3/, dass selbst bei einem Graphitbrand keine relevante Aktivität freigesetzt werden kann. Die durch die Neutronenbestrahlung induzierte Wigner-Energie im Graphit ist für den Graphit der Thermischen Säule ohne Bedeutung, da der Neutronenfluss im Bereich der Thermischen Säule sehr niedrig war (vergleiche /3/).

Ebenso kann ein Brand und Freisetzung von radioaktiven Stoffen von metallischen Komponenten und Abfällen (z. B. Beryllium-Reflektorelemente, Präparat Tristan etc.) sowie von geschlossenen Containern und Stahlgussbehältern ausgeschlossen werden.

Eine der geplanten Abbautätigkeiten ist der Abbau der Betonzellen. In diesem Bereich ist die höchste, großflächige Kontamination zu erwarten. Vor dem Abbau der Innenauskleidung aus Stahl wird diese z. B. durch Abwischen dekontaminiert. Die zu dekontaminierende Innenoberfläche der größten Betonzelle 2 beträgt ca. 90 m² (im Wesentlichen Wand und Bodenflächen).

In /3/ wurde konservativ von einer mittleren Kontamination dieser Oberflächen von 1 000 Bq/cm² ausgegangen. Die Putzlappen werden nach Gebrauch in einem 400-l- oder 200-l-Fass gesammelt. Bei vollständiger Dekontamination der Innenoberfläche der Beton- zelle 2 wird das Radioaktivitätsinventar in dem Behälter nach Beendigung der Tätigkeiten ca. 9,0E+08 Bq betragen. Durch den Einsatz von schwer brennbaren Materialien und mit dem Abbau von Anlagenteilen verringern sich auch die Brandlasten kontinuierlich. Daher stellen nicht kompaktierte Putzlappen den größten Teil der im Abbau vorhandenen Brandlasten dar.

Es wird unterstellt, dass der Inhalt des Behälters vollständig abbrennt, wobei 5 Prozent der metallischen Nuklide und 95 Prozent der sonstigen Nuklide aerosolförmig in die Anlagenat- mosphäre freigesetzt werden /11/. Weiterhin wird analog zu /11/ angenommen, dass sich 50 Prozent der aerosolförmigen Aktivität an den inneren Wänden der Anlage ablagern. Die restliche Aktivität strömt über die Fortluftfilter. Bei einem zu unterstellenden Rückhaltegrad von 99,9 Prozent für Schwebstoffe /6/ erhält man bei dem beschriebenen Szenario einen Quell- term von 3,69E+05 Bq. Die potentiell resultierenden Abgaben sind um zwei Größenordnungen kleiner als die beantragten Ableitungen (3,7E+07 Bq für Schwebstoffe). Daher wird dieser Quellterm in der Auswahl des abdeckenden Ereignisses nicht weiter berücksichtigt.

Die Ermittlung des Quellterms ist zusammenfassend in Tabelle 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1: Quellterm Brand

Ereignis	Aktivität pro Behälter	Freisetzung in die Anlagenatmosphäre	Ablagerung in der Anlage	Freisetzung in die Umgebung Quellterm
	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]
Brand 200-l- oder 400-l-Fass, gefüllt mit Putzlappen	9,0E+08	7,37E+08	3,69E+08	3,69E+05
nuklidspezifische Betrachtung gemäß Nuklidgemisch Lüftung HL /3/				
Co-60	1,27E+08	6,35E+06	3,18E+06	3,18E+03
Cs-137	7,69E+08	7,31E+08	3,66E+08	3,66E+05
Am-241	5,40E+06	2,70E+05	1,35E+05	1,35E+02

Bei einem gleichzeitig unterstellten Ausfall der Lüftungsanlage erfolgt keine relevante Freisetzung in die Umgebung, vergleiche Kapitel 3.2.2. Eine Verfügbarkeit und Auslösen von Brandmeldeanlage und Brandlöscheinrichtungen wird nicht unterstellt.

Als mögliche Brände sind gemäß ESK-Leitlinien /5/ ebenso Filterbrände zu analysieren.

Im Bereich der Schwebstofffilter in den Fortluftanlagen sind keine Zündquellen vorhanden. Ebenso sind im Fortluftkanal vor und hinter den Schwebstofffiltern keine Komponenten, die zur Auslösung eines Brandes geeignet wären. In der Regel befinden sich im Bereich der Filter passive Komponenten wie Drossel- oder Rückschlagklappen.

Elektrische Komponenten, die aufgrund eines Defekts als mögliche Zündquelle dienen könnten, befinden sich entweder außerhalb des Lüftungskanals (z. B. Instrumentierung) oder in deutlicher Entfernung zu den Schwebstofffiltern (Ventilatoren). Damit können diese als Zündquellen ausgeschlossen werden. Ebenso wird durch administrative Maßnahmen ein Auftreten von Zündquellen wirkungsvoll verhindert. Aufgrund des Fehlens geeigneter Zündquellen kann eine Brandentstehung an den Schwebstofffiltern ausgeschlossen werden.

Im Rahmen des Wechsels der Schwebstofffilter wird der Lüftungskanal geöffnet. Dabei wird der entsprechende Filterstrang von der übrigen Fortluftanlage abgeriegelt. Bei einem unterstellten Brand eines Schwebstofffilters kann es somit zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Raumluft, aber nicht zu einer direkten Freisetzung über den Fortluftkamin kommen. Dieser Fall wird sicherheitstechnisch durch den oben beschriebenen abdeckenden Störfall („Brand eines Fasses“) mit abgedeckt.

Ungeachtet, dass eine Brandentstehung an einem Schwebstofffilter aufgrund fehlender Zündquellen ausgeschlossen werden kann, wird ein Brand eines Schwebstofffilters unterstellt. Sofern es beim Brand des Schwebstofffilters zu einer relevanten Freisetzung von an Schwebstoffen gebundenen radioaktiven Stoffen in den Fortluftkanal und -kamin kommt, werden diese in der Fortluftüberwachung detektiert und es erfolgt ein Lüftungsabschluss. Somit wird eine weitere Freisetzung verhindert.

Trotz des Fehlens von Zündquellen und das Erfolgen eines Lüftungsabschlusses wird konservativ abdeckend eine hypothetische Freisetzung der Aktivität des Schwebstofffilters unterstellt. Es wird dabei von einem beladenen Schwebstofffilter kurz vor dem Wechsel ausgegangen.

Zur abdeckenden Abschätzung der Aktivitätsbeladung des Schwebstofffilters wird unterstellt, dass sich auf diesem 1 kg Betonstaub (Normal- bzw. Barytbeton) vom mechanischen Abbau des aktivierten Reaktorbeckens abgeschieden hat. Dabei wird außer Betracht gelassen, dass die Schwebstoffe bereits weitestgehend durch die Lüftungsanlagen der Einhausungen abgeschieden werden.

Bei einer unterstellten Freisetzung von 10 % der Aktivität /12, 13/ (höchste Partikelfreisetzungsanteile, AGG 1/6, BK 8/9) des beladenen Filters ergibt sich eine geringere Freisetzung als durch das Ereignis „Absturz von Lasten“, siehe Kapitel 4.5.1, mit 250 kg Normal- bzw. 360 kg Barytbeton. Somit ist radiologisch der Brand des Schwebstofffilters durch das Ereignis „Absturz von Lasten“ abgedeckt.

Andere potentielle Brände wie z. B. von verlegten Kabeln sowie elektrisch betriebenen Geräten und Systemen (Lüftungsmotoren, Kranmotoren, Hand-Fuß-Kontaminationsmonitor, etc.) führen zu keiner oder gegenüber dem abdeckenden Fall geringfügigeren Freisetzung von radioaktiven Stoffen innerhalb des Kontrollbereichs.

In der Betriebsstätte FRG/HL werden als eigene, motorbetriebene Transportfahrzeuge nur Fahrzeuge eingesetzt, die mit Gas oder Batterien betrieben werden.

Bei An- und Abtransporten mit dieselbetriebenen Fremdfahrzeugen wird im betrieblichen Regelwerk festgelegt, mit welchen Maßnahmen eine Gefährdung der Schutzziele durch hohe Brandlasten (Dieseltank) bei einem unterstellten Brand des Transportfahrzeuges verhindert werden kann. Die Freisetzung von Radioaktivität wird von dem unterstellten abdeckenden Brand mit abgedeckt.

Brände auf Freiflächen oder auch Brände von motorgetriebenen Transportfahrzeugen führen zu keiner relevanten Freisetzung von radioaktiven Stoffen, da diese in Stahlblech- bzw. Gussbehältern verpackt sind und keine Brandlast darstellen.

Potentielle Brände durch Hydrauliköl oder Batterien in Kombination mit Lastabstürzen werden durch das potentielle Ereignis „Lastabsturz und Brand beim Transport außerhalb der Anlagengebäude“ der Störfallanalyse Zerlegehalle RDB-OH /14/ mit abgedeckt.

Ein Brand, der durch ein Erdbeben oder einen potentiellen Flugzeugabsturz verursacht wird, ist separat in den entsprechenden Kapiteln 5.1.1 und 7.2 beschrieben. Darüber hinaus ergeben sich keine weiteren Ereigniskombinationen mit Bränden, die eine gemeinsame Ursache haben.

4.2 Leckage von Behältern

Alle in den Anlagen befindlichen Systeme und Einrichtungen, die betrieblich radioaktive Wasser führen, sind vorsorglich so ausgelegt, dass Leckagen entweder

- gesammelt werden, z. B. Anlagenentwässerungssystem (KTA 01),
- in bautechnischen Wannern aufgefangen werden, z. B. Abwassersammelbehälterräume, Verbindungsschächte (1/2UKZ), Sumpf RA-Keller sowie
- Systeme und Einrichtungen doppelwandig ausgelegt sind (zum Teil inklusive Leck-Überwachung), z. B. Abwassersammelbehälter, Ableitungsleitung in die Elbe,

und somit eine unkontrollierte Ausbreitung ausgeschlossen werden kann.

Zu Beginn des Abbaus der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors befindet sich das Primärwasser noch innerhalb der Reaktorbecken. Dies stellt zwar die größte Wassermenge innerhalb der Anlage dar, jedoch liegt die Aktivitätskonzentration des Primärwassers bereits jetzt im Bereich bzw. unterhalb des Grenzwertes der Aktivitätskonzentration für die Abgabe mit Wasser ($3,7E+06$ Bq/m³).

Bei einer Leckage und dem Austritt von Primärwasser, z. B. in den RA-Keller, würde dieses innerhalb der Anlage zurückgehalten werden. Die durch Verdunstung in die Anlagenatmosphäre freigesetzte Aktivität entspricht in etwa derselben Aktivität, die zurzeit durch Verdunstung aus den Reaktorbecken in die Reaktorhalle freigesetzt wird. Die Verdunstung aus den Reaktorbecken in die Reaktorhalle führt zu keiner relevanten Aktivitätskonzentration in der Luft der Reaktorhalle. Eine relevante Aktivitätsfreisetzung durch den Austritt von Primärwasser ist nicht zu erwarten. Eine Leckage von Primärwasser in der Forschungsreaktoranlage wird daher nicht näher betrachtet. Unzulässige Auswirkungen auf die Umgebung ergeben sich nicht.

Weitere größere Mengen radioaktiven Wassers befinden sich gegebenenfalls in den Abwassertanks im Keller der FRG bzw. des Heißen Labors. Solange die Abwassertanks gefüllt sind, finden in den entsprechenden Räumen keine Abbautätigkeiten statt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Leckage eines Abwassertanks ist daher sehr gering.

Unabhängig von der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit wird dennoch nachfolgend die Leckage eines komplett gefüllten Abwassertanks im Keller der FRG bzw. des Heißen Labors betrachtet. Konservativ wird eine Aktivitätskonzentration des Abwassers von $1,0E+10$ Bq/m³ unterstellt (die Aktivitätswerte des betrieblichen radioaktiven Abwassers lagen in der Vergangenheit im Bereich von $1,0E+08$ Bq/m³). Bei einem Volumen von 8 m³ beträgt das maximale Gesamtaktivitätsinventar eines Abwassertanks $8,0E+10$ Bq. Es wird unterstellt, dass der gesamte Inhalt eines Abwasserbehälters ausläuft. Die Abwassertanks sind in Auffangwannen aufgestellt, die den gesamten Tankinhalt aufnehmen können. Eine Ausbreitung des Wassers in benachbarte Räume wird somit verhindert. Die Freisetzung der Radionuklide aus dem Abwasser wird konservativ (Wert gilt für siedendes Wasser, nicht nuklidspezifisch) mit $5,0E-04$ /6/ angesetzt. Damit erhält man eine Freisetzung in die Anlagenatmosphäre von $4,0E+07$ Bq. Es wird analog zu /11/ angenommen, dass sich 50 % der aus dem Abwasser freigesetzten Radioaktivität in der Anlage ablagern. Die restliche luftgetragene Aktivität strömt über die Fortluftfilter. Bei einem zu unterstellenden Rückhaltegrad von 99,9 Prozent für Schwebstoffe /6/ ergibt sich damit ein Quellterm von $2,0E+04$ Bq. Die potentiell resultierenden Abgaben sind um mehrere Größenordnungen kleiner als die beantragten Ableitungen ($3,7E+07$ Bq für Schwebstoffe). Daher wird dieser Quellterm in der Auswahl des abdeckenden Ereignisses nicht weiter berücksichtigt. Ein zusätzlich unterstellter Ausfall der Lüftung führt aufgrund des Schließens der Absperrklappen zu einer noch geringeren Abgabe (siehe Kapitel 3.2.2).

Die Ermittlung des Quellterms ist zusammenfassend in Tabelle 4-2 dargestellt.

Tabelle 4-2: Quellterm Leckage eines Abwasserbehälters

Ereignis	Aktivitätskonzentration im Abwasser [Bq/m ³]	Freisetzung in die Anlagenatmosphäre [Bq]	Ablagerung in der Anlage [Bq]	Freisetzung in die Umgebung Quellterm [Bq]
Leckage Abwasserbehälter	$1,0E+10$	$4,0E+07$	$2,0E+07$	$2,0E+04$

Die 12 erdverlegten Sammelbehälter mit einer Gesamtkapazität von insgesamt 350 m³ sind doppelwandig ausgelegt, mit kathodischem Korrosionsschutz versehen und zusätzlich mit einer Leckageüberwachung ausgestattet. Eine Beschädigung der gefüllten Sammelbehälter durch Abbautätigkeiten ist auszuschließen, da in diesem Bereich keine Tätigkeiten stattfinden, solange die Sammelbehälter noch gefüllt sind. Der Abbau der Tanks wird nach deren Entleerung im Rahmen einer administrativen Regelung im aufsichtlichen Verfahren durchgeführt. Eine Leckage der erdverlegten Sammelbehälter wird daher nicht betrachtet. Unzulässige Auswirkungen auf die Umgebung ergeben sich nicht.

4.3 Überflutungen in der Anlage

Generell sind Gebäudestrukturen so ausgebildet, dass bei einer Leckage die austretenden Wässer über Wannen oder Abläufe aufgefangen werden und sich nicht unkontrolliert in der FRG oder dem HL ausbreiten können. Das Potential für anlageninterne Überflutungen ist im Restbetrieb gegenüber dem Forschungsbetrieb noch weiter verringert.

Das für eine Überflutung erforderliche Wasservolumen ist ausschließlich im Reaktorbecken vorhanden. Aufgrund der Konstruktion des Reaktorbeckens (2-Barrierensystem der Beton- und Liner-Durchdringungen) ist ein Versagen der Beckendurchführungen nicht zu unterstellen. Im Rahmen des Abbaufortschritts kann eine Überflutung mit radioaktivem Wasser mit Erreichen der Wasserfreiheit ausgeschlossen werden.

Ein Versagen oder eine Fehlbedienung der Wasserversorgungssysteme (Trink- / Löschwasserleitung) kann allerdings nicht ausgeschlossen werden. Findet ein entsprechender Austritt statt, fließt das Trinkwasser mittelbar in die Kellerräume der FRG bzw. des HL und sammelt sich dort. Die entsprechenden Kellerräume sind mit Wasserdetektionsmeldern versehen, die bei Auftreten von Wasser eine Alarmierung im Leitstand bzw. in der Wache auslösen. Aufgrund von geeigneten Maßnahmen kann eine Überflutung von sicherheitstechnisch relevanten Restbetriebssystemen ausgeschlossen werden. In Abhängigkeit der von der Leckage betroffenen Systeme und Komponenten kann es zu einer betrieblichen Einschränkung der Verfügbarkeit kommen. Eine Aktivitätsfreisetzung kann ausgeschlossen werden.

4.4 Komponentenversagen

Die vorhandenen Systeme und Behälter sind kalt und drucklos. Die Medien weisen nur geringe Aktivitätskonzentrationen auf. Potentielle Freisetzungen werden von dem Ereignis „Leckage von Behältern“ abgedeckt.

4.5 Ereignisse bei der Handhabung von Lasten

Bei der Handhabung von Lasten sind Ereignisse zu betrachten, bei denen es zu einer nicht zu vernachlässigbaren Freisetzung von radioaktiven Stoffen kommen kann. Dies ist bei den radioaktiven Reststoffen, Abfällen und Gebinden gegeben, bei denen Schwebstoffe durch entsprechende mechanische Einwirkung mobilisiert werden können. Ein entsprechendes Freisetzungspotential kann bei aktivierten metallischen Reststoffen und Abfällen (Einschluss in der Metallstruktur) sowie in Stahlgussbehältern verpackten Abfällen (aufgrund der Auslegung) ausgeschlossen werden.

Die Handhabung der hochradioaktiven Strahlenquellen (Cs-Präparat, Präparat Tristan) erfolgt entweder mittels Stahlgussbehälter und / oder die Strahlenquellen selbst sind mehrfach in Behältern dicht verschlossen (verschweißt). Administrativ wird zusätzlich zu den Sicherheitsmaßnahmen (z. B. Ladungssicherung) sichergestellt, dass die Transporthöhe auf die minimale erforderliche Höhe begrenzt bleibt. Somit kann eine relevante Freisetzung ausgeschlossen werden.

4.5.1 Absturz von Behältern mit freisetzbarem radioaktivem Inventar (Lastabsturz)

Während der Durchführung der Abbaumaßnahmen ist es erforderlich, verschiedene Anlagenteile und gefüllte Behälter zu transportieren. Hierfür werden geeignete Transportmittel eingesetzt. In der Anlage stehen diverse Kräne zur Verfügung, die regelmäßig entsprechend den anzuwendenden Vorschriften geprüft und gewartet werden. Für die Bedienung der Kräne wird ausschließlich geschultes Fachpersonal eingesetzt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass ein Lastabsturz praktisch ausgeschlossen ist. Weiterhin werden Transporte mit Transportmitteln wie Hubwagen oder Gabelstapler durchgeführt, bei denen die mögliche Absturzhöhe technisch begrenzt ist oder durch entsprechende Betriebsanweisungen mit Vorgabe maximaler Hubhöhen begrenzt werden kann. Somit sind die Auswirkungen potenzieller Lastabstürze

wirksam zu begrenzen. Nachfolgend werden potentielle Lastabstürze beim Abbau der FRG und des HL betrachtet und ein abdeckender Lastabsturz hergeleitet.

Geplante Abbautätigkeiten sind beispielsweise der Ausbau der aktivierten Reaktorbeckeneinbauten und der Abbau des aktivierten Betons des Becken I. Die Materialien werden in Behälter (200-l-Fass) verpackt und abtransportiert. Die Reaktorbeckeneinbauten und der aktivierte Bauschutt sind die Materialien mit der höchsten spezifischen Aktivität innerhalb der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors. Kontaminierte Anlagenteile bzw. Sekundärabfälle wie z. B. Putzlappen haben eine deutlich geringere spezifische Aktivität.

Die Behälter werden sowohl innerhalb der Anlage als auch außerhalb der Anlage zur vorgesehenen Transportbereitstellungshalle transportiert. Ein Lastabsturz außerhalb der Anlage ist abdeckend, da hier die freigesetzte Aktivität nicht über die Schwebstoffe der Fortluftanlage, sondern direkt in die Umgebung freigesetzt wird. Außerdem führt eine bodennahe Freisetzung außerhalb der Anlage im Vergleich zu einer Freisetzung über den ca. 60 m hohen Fortluftkamin zu einer höheren Dosis. Nachfolgend wird daher der Lastabsturz eines Behälters während des Transports auf dem Betriebsgelände der FRG betrachtet.

Die Verpackung der radioaktiven Abfälle erfolgt überwiegend in 200-l-Fässern. Die Fallhöhe kann über 1 m betragen, so dass davon auszugehen ist, dass der Behälter beschädigt wird. Bei aktivierten metallischen Reaktorbeckeneinbauten liegt die Aktivität überwiegend fest eingebunden in der Materialstruktur vor. Die durch einen Lastabsturz eingebrachte Energie reicht nicht aus, eine relevante Freisetzung aerosolförmiger Aktivität zu verursachen. Die gegebenenfalls aus dem Behälter ausgetretenen aktivierten Reaktorbeckeneinbauten können in einen neuen Behälter umgeladen werden. Unzulässige Auswirkungen auf die Umgebung außerhalb des Anlagengeländes sind nicht zu erwarten.

Auch beim aktivierten Betonschutt liegt die Aktivität überwiegend fest eingebunden in der Materialstruktur vor. Jedoch kann die durch einen Lastabsturz eingebrachte Energie zu einer Staubfreisetzung und damit einer Aktivitätsfreisetzung in die Atmosphäre führen. Als Freisetzunganteil wurde in Versuchen für den Absturz eines zementierten 200-l-Fasses aus einer Höhe von 9 m auf einen Dorn ein nicht nuklidspezifischer Wert von 0,062 % ermittelt /15/. Da die hier betrachteten Abfälle nicht zementiert oder anders fixiert sind, wird für die weitere Betrachtung ein um Faktor 10 höherer Freisetzunganteil von 0,62 % angenommen. Der Freisetzunganteil wird auch für H-3 und C-14 angewendet, da diese Nuklide größtenteils chemisch

gebunden in der Betonmatrix vorliegen und kein zusätzlicher Energieeintrag, z. B. durch Hitze vorliegt. Somit liegt das gleiche Freisetzungsverhalten wie für sonstige Schwebstoffe vor.

Der Vergleich des in dieser Betrachtung für den Lastabsturz unterstellten Freisetzunganteils mit den in der Transportstudie Konrad /12, 13/ verwendeten Anteilen zeigt, dass der unterstellte Freisetzunganteil von 0,62 % (6,2E-03) in hohem Maße abdeckend ist. Der in dieser Störfallanalyse betrachtete Lastabsturz wäre gemäß /12, 13/ in die Belastungsklasse BK 1 (Aufprallgeschwindigkeit ≤ 35 km/h, ohne Brand) einzustufen. Das abstürzende Abfallgebinde wäre gemäß /12, 13/ in die Abfallgebindergruppe AGG 2 (unfixierte und nicht kompaktierbare metallische und nichtmetallische Abfälle ... in Stahlblechcontainern oder Betonbehältern) einzustufen. Damit ergäben sich gemäß Tabelle 8.2 aus /12, 13/ Freisetzunganteile von $5,0 \text{ E-}06$ bis $1,0 \text{ E-}05$. Bei dieser Kombination von Belastungsklasse und Abfallgebindergruppe sind auch die Freisetzunganteile für H-3 und C-14 gemäß Tabelle 8.3 aus /12, 13/ wie die der sonstigen Nuklide anzusetzen.

Die maximale spezifische Aktivität des aktivierten Normalbetons beträgt $8,46\text{E}+05$ Bq/g /3/ (Tabelle 4-2, AP1), die maximale spezifische Aktivität des aktivierten Barytbetons beträgt $8,81\text{E}+03$ Bq/g /3/ (Tabelle 4-2, AP3). Bei einer Nettomasse von 250 kg beträgt die maximale Aktivität in einem 200-l-Fass mit Normalbeton $2,12\text{E}+11$ Bq. /3/. Bei einer Nettomasse von 360 kg beträgt die maximale Aktivität in einem 200-l-Fass mit Barytbeton $3,17\text{E}+09$ Bq. Mit dem oben genannten Freisetzunganteil führt der Lastabsturz eines mit aktiviertem Normalbeton gefüllten 200-l-Fasses zu einer Freisetzung von $1,31\text{E}+09$ Bq bzw. der Lastabsturz eines mit aktiviertem Barytbeton gefüllten 200-l-Fasses zu einer Freisetzung von $1,97\text{E}+07$ Bq. Eine Rückhaltung wird nicht unterstellt, da sich der angenommene Lastabsturz nicht in der Anlage ereignet. Aufgrund der potentiellen Aktivitätsabgabe unterhalb der beantragten Ableitungswerte ($1,5\text{E}+11$ Bq für Tritium, $1,2\text{E}+09$ Bq für C-14 und $3,7\text{E}+07$ Bq für Schwebstoffe) sowie Bewertung als Störung, wird dieser Quellterm in der Auswahl des abdeckenden Ereignisses nicht weiter berücksichtigt.

Eine Abschätzung der Exposition des Personals aufgrund eines potentiellen Absturzes innerhalb der FRG und des HL befindet sich in der Anlage 2.

Tabelle 4-3: Quellterm Lastabsturz Normalbeton

Nuklid	Spez. Aktivität Normalbeton (AP1) [Bq / g]	Aktivität pro Abfallgebände [Bq]	Freisetzung in die Umgebung Quellterm [Bq]
H-3	8,35E+05	2,09E+11	1,29E+09
C-14	8,06E+02	2,02E+08	1,25E+06
Ar-39	3,68E+00	9,20E+05	5,70E+03
Ca-41	3,73E+02	9,33E+07	5,78E+05
Mn-54	9,21E-03	2,30E+03	1,43E+01
Fe-55	5,06E+03	1,27E+09	7,84E+06
Co-60	5,29E+02	1,32E+08	8,20E+05
Cs-134	1,34E-04	3,35E+01	2,08E-01
Cs-137	3,09E+01	7,73E+06	4,79E+04
Sm-151	1,08E+00	2,70E+05	1,67E+03
Eu-152	3,53E+03	8,83E+08	5,47E+06
Eu-154	1,78E+02	4,45E+07	2,76E+05
Summe:	8,46E+05	2,12E+11	1,31E+09

Tabelle 4-4: Quellterm Lastabsturz Barytbeton

Nuklid	Spez. Aktivität Barytbeton (AP3) [Bq / g]	Aktivität pro Abfallgebände [Bq]	Freisetzung in die Umgebung Quellterm [Bq]
H-3	5,26E+03	1,89E+09	1,17E+07
C-14	7,21E+01	2,60E+07	1,61E+05
Ar-39	3,03E+01	1,09E+07	6,76E+04
Ca-41	1,27E+01	4,57E+06	2,83E+04
Mn-54	1,06E-04	3,82E+01	2,37E-01
Fe-55	2,43E+01	8,75E+06	5,42E+04
Co-60	2,43E+02	8,75E+07	5,42E+05
Ni-63	3,09E+00	1,11E+06	6,90E+03
Cs-134	7,55E-01	2,72E+05	1,69E+03
Cs-137	2,93E+00	1,05E+06	6,54E+03
Ba-133	2,02E+03	7,27E+08	4,51E+06

Nuklid	Spez. Aktivität Barytbeton (AP3) [Bq / g]	Aktivität pro Abfallgebinde [Bq]	Freisetzung in die Umgebung Quellterm [Bq]
Sm-151	1,06E-01	3,82E+04	2,37E+02
Eu-152	1,09E+03	3,92E+08	2,43E+06
Eu-154	6,26E+01	2,25E+07	1,40E+05
Summe:	8,81E+03	3,17E+09	1,97E+07

4.5.2 Kollision von Lasten mit Behältern oder Systemen mit freisetzbarem radioaktivem Inventar

Die Abbaureihenfolge und die Transportwege von Lasten sind in der Planung so gewählt, dass Kollisionen von Lasten mit Systemen und Behältern mit freisetzbarem radioaktivem Inventar weitgehend ausgeschlossen werden können.

In der Anlage befinden sich nur noch wenige Behälter oder Systeme, die freisetzbare Aktivitäten aufweisen, z. B. Abwassersammelbehälter, Beckenreinigung. Ebenso sind diese Systeme und Behälter drucklos und weisen nur geringe Aktivitätskonzentrationen auf. Die betreffenden Behälter und Systeme befinden sich in anderen Räumen / Bereichen der Anlage / Gebäude, an denen ein Abbau und eine Handhabung von Lasten erst dann erfolgt, wenn die Systeme entleert sind und damit kein relevantes freisetzbares Aktivitätsinventar mehr vorhanden ist.

Selbst bei einer hypothetischen Freisetzung von Aktivität innerhalb der Anlage erfolgt die Rückhaltung über die Gebäudestrukturen und den Fortluftfilter. Die Freisetzungen werden von dem Ereignis „Leckagen / Komponentenversagen“ (siehe Kapitel 4.2) bzw. „Absturz von Lasten“ (siehe Kapitel 4.5.1) abgedeckt.

4.6 Ereignisse bei Transportvorgängen

Während der Durchführung der Abbaumaßnahmen ist es erforderlich, verschiedene Anlagenteile und gefüllte Behältnisse zu transportieren. Hierfür werden geeignete Transportmittel und geschultes Fachpersonal eingesetzt. Die Transportwege werden so gewählt, dass eine Ge-

fährdung von sicherheitstechnisch wichtigen Restbetriebssystemen durch logistische Prozesse minimiert werden. Kann in Einzelfällen eine Kollision von Lasten mit sicherheitstechnisch wichtigen Bauwerken, Systemen und Komponenten nicht ausgeschlossen werden, wird im Vorfeld eine abdeckende Gefährdungsbeurteilung und eine Einsatzbesprechung aller beteiligten Mitarbeiter vor Durchführung des Transportvorganges durchgeführt.

Trotzdem können bei Transportvorgängen in der Anlage, z. B. durch Kollision, Gebinde oder Verpackungen von radioaktiven Reststoffen und Abfällen beschädigt werden. Ebenso ist auch ein Absturz während eines Transportes auch außerhalb der Gebäude zu unterstellen.

Ereignisse bei Transportvorgängen werden dabei von dem Ereignis „Absturz von Lasten“ (siehe Kapitel 4.5) abgedeckt, da bei Abstürzen potentiell die höheren Aufprallgeschwindigkeiten und -energien zu unterstellen sind.

Ereignisse bei Transportvorgängen von zerlegten Teilen des RDB-OH für die Umverpackung und Optimierung der Behälterbeladung im Heißen Labor sind in der Störfallanalyse Zerlegehalle RDB-OH beschrieben /14/ bzw. von dieser mit abgedeckt. Bei diesem Ereignis wird der Absturz eines abdeckenden Gebindes mit anschließendem Stützbrand durch brennbare Medien (Treibstoff / Gase) oder Batterien des Transportfahrzeuges unterstellt. Aufgrund der direkten Freisetzung in die Umgebung (ohne Fortluftfilterung) deckt dieses Ereignis auch Ereignisse (Absturz / Brand) außerhalb als auch innerhalb der Gebäude ab.

4.7 Gegenseitige Beeinflussung von Mehrblockanlagen und benachbarten Anlagen am Standort

4.7.1 Wechselwirkungen mit der Transportbereitstellungshalle (TBH)

Die auf dem Gelände der Betriebsstätte FRG/HL befindliche neue Versuchshalle soll nach baulicher Ertüchtigung und genehmigter Nutzungsänderung als Transportbereitstellungshalle für radioaktive Abfälle bis zum Abtransport an das Bundesendlager genutzt werden.

Dieses Gebäude grenzt unmittelbar an die abzubauenen Gebäude der FRG. Auf Grund der autarken Versorgung der TBH hat ein Ausfall der Energieversorgung im Bereich der FRG und HL keinen Einfluss auf die TBH und die einzuhaltenen Schutzziele.

Ein anlageninterner Brand im Bereich FRG und HL kann sich nicht auf die TBH ausbreiten oder eine direkte Wärmeeinwirkung verursachen, da die TBH aus nicht brennbaren Baustoffen besteht. Der Einsatz der Feuerwehr oder Raucheinwirkungen können Tätigkeiten in der TBH beeinflussen. Nach Branderkennung im Bereich FRG und HL werden die laufenden Tätigkeiten unterbrochen und das Personal verlässt die TBH.

Eine anlageninterne Überflutung im Bereich der FRG und HL führt zu keiner Gefährdung für die TBH, da diese über keine Kellerräume verfügt und keine verfahrenstechnische Verbindung zum FRG und HL hat.

Bei der baulichen Anpassung der neuen Versuchshalle und beim Gebäudeabbruch der FRG und HL kann es zu Einsätzen von Schwenk- und Baukränen kommen.

Beim Einsatz von Schwenk- und Baukränen ist der Einsatz gemäß Betriebsreglement so zu planen, dass keine Gefährdung schutzzielrelevanter Gebäude und Ausrüstungen zu besorgen ist.

4.7.2 Wechselwirkungen zu anderen Anlagen

Es besteht aufgrund der räumlichen Distanz mit anderen Anlagen am Standort, wie

- der zu errichtenden Zerlegehalle für den RDB der Otto Hahn,
- der Halle zur Komponentennachuntersuchung (HAKONA),
- der Bereitstellungshalle und
- der Sammelstelle

keine Wechselwirkung im Hinblick auf zu beherrschende Ereignisse.

4.8 Anlageninterne Explosionen

Beim Abbau von Anlagenteilen können technische Gase zum Einsatz kommen (z. B. Schweißgase), die potentiell explosionsfähig sind. Daher besteht die prinzipielle Möglichkeit einer mechanischen oder thermischen Einwirkung. Für die Verwendung und Lagerung der technischen Gase werden die einschlägigen Normen eingehalten. Explosionsfähige Gase treten nur lokal

und in geringen Konzentrationen auf. Sofern überhaupt anlageninterne Explosionen im Hinblick auf die Brandschutzmaßnahmen zu unterstellen sind, ist mit einer Deflagration (sehr schnelle Verbrennung) des Gases zu rechnen. Eine Detonation mit Druckwelle kann aufgrund der zum Einsatz kommenden Gase und fehlender Verdämmung ausgeschlossen werden. Somit ist nicht mit maßgeblichen mechanischen Einwirkungen zu rechnen. Radiologische Auswirkungen auf die Umgebung sind durch die betrachteten Ereignisse Anlageninterner Brand und Lastabsturz (siehe Kapitel 4.1 und 4.5.1) abgedeckt.

4.9 Chemische Einwirkungen

Bei der Dekontamination von Anlagenteilen können im begrenzten Umfang chemische Substanzen zum Einsatz kommen. Es handelt sich hierbei um eine kurzzeitige Einwirkung chemischer Substanzen, die das ausführende Personal beim Einsatz kontrolliert. Für die Verwendung und Lagerung der chemischen Substanzen werden die einschlägigen Normen eingehalten. Daher sind Auswirkungen auf Systeme des Restbetriebs, die eine nennenswerte Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Anlage zur Folge haben, nicht zu unterstellen.

Auswirkungen auf den Betrieb und radiologische Auswirkungen auf die Umgebung aufgrund chemischer Einwirkungen sind deshalb nicht zu besorgen.

4.10 Ausfälle und Störungen sicherheitstechnisch wichtiger Einrichtungen

Die Ausfälle von sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen unterteilt sich in die folgenden Unterkategorien.

- Ausfälle und Störungen von Versorgungseinrichtungen,
- Ausfälle und Störungen von leittechnischen und Überwachungseinrichtungen,
- Ausfälle und Störungen von Brandschutzeinrichtungen,
- Ausfälle und Störungen von Lüftungsanlagen und Einrichtungen zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe.

Diese werden in den folgenden Kapiteln 4.10.1 – 4.10.4 erläutert.

4.10.1 Ausfälle und Störungen von Versorgungseinrichtungen

Relevante Versorgungssysteme im Restbetrieb der FRG und dem HL sind

- Versorgung mit Elektrizität,
- Versorgung mit Wasser,
- Versorgung mit Druckluft,
- Versorgung mit Gasen.

Der Ausfall der Versorgung mit Wasser, Druckluft und Gasen hat keinen sicherheitstechnischen Einfluss auf die Anlagen, da diese z. B. nur für betriebliche Systeme erforderlich sind.

Der Ausfall der Druckluftversorgung hat auch auf die sicherheitstechnische Funktion der Absperrklappen der Lüftungsanlage keinen Einfluss, da die Auslösung der Absperrklappen über den Druckspeicher erfolgt.

Bei Ausfall der elektrischen Versorgung können sämtliche Systeme und Einrichtungen nicht weiterbetrieben werden, es sei denn, sie sind batteriegepuffert bzw. ersatzstromgesichert. Dies ist z. B. der Fall beim Informations- und Meldesystem inklusive der Brandmeldeanlage und der Fluchtwegebeleuchtung. Aus Verfügbarkeitsgründen sind zunächst weitere, sicherheitstechnisch nicht bedeutsame Anlagen und Einrichtungen batteriegepuffert bzw. ersatzstromgesichert. Dies sind z. B.:

- Versorgung ODL-System,
- Gegensprechanlage, Funkanlage,
- Fernsehanlage,
- Schleusenanlage.

Die Batterie- bzw. Ersatzstromversorgung dieser Anlagen und Einrichtungen kann im Verlauf des Abbaus ohne Auswirkungen auf diese Störfallanalyse außer Betrieb genommen werden.

Bei Ausfall der elektrischen Versorgung oder auch der Lüftungstechnischen Anlage werden in den betroffenen Bereichen die Tätigkeiten, die eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Anlagenatmosphäre bewirken können, sofort eingestellt und das Personal verlässt, falls

erforderlich, die Kontrollbereiche. Für die Kontaminationskontrolle an den Kontrollbereichsausgängen werden ersatzweise mobile Oberflächenkontaminationsmonitore eingesetzt. Weitere erforderliche Strahlenschutzmaßnahmen werden veranlasst.

Durch die elektrische Spannungslosigkeit der Lüftungsanlagen FRG/HL erfolgt für die Reaktorhalle (FRG) sowie für die Betonzellen 2, 3 und 4 (HL) automatisch die Lüftungstechnische Isolation über pneumatischen Absperrklappen.

Unzulässige Auswirkungen auf die Umgebung ergeben sich nicht.

4.10.2 Ausfälle und Störungen von leittechnischen und Überwachungseinrichtungen

Für die Rückhaltung von radioaktiven Stoffen sowie für die Begrenzung und Kontrolle des Aktivitätsflusses sind aufgrund der Art und des Zustands der Anlagen keine aktiven Einrichtungen mehr erforderlich. Somit führt ein Ausfall von leittechnischen Einrichtungen nicht zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe.

4.10.3 Ausfälle und Störungen von Brandschutzeinrichtungen

Die Brandschutzeinrichtungen des FRG und des HL basieren im Wesentlichen auf dem baulichen Brandschutz (passive Einrichtungen). Ausfälle und Störungen sind daher für diese Einrichtungen nicht zu unterstellen. Die Brandschutzeinrichtungen, die von einem Ausfall oder einer Störung betroffen sein können, sind die Brandmeldeanlage (CYE) und die CO₂-Feuerlöschanlage (HL, Betonzellen 2 – 4, SGJ01). Mit einem potentiellen Ausfall oder einer Störung der Einrichtungen als solche, sind keine Freisetzungen von radioaktiven Stoffen als auch keine zusätzlichen Ableitungen verbunden.

Brandschutztüren sind federbetrieben (passive Einrichtungen) und werden entweder geschlossen gehalten oder schließen bei Stromausfall, Handauslösung oder Auslösen des Rauchmelders automatisch (Brandschutztüren mit Feststellanlage). Über administrative Maßnahmen wird sichergestellt, dass das Schließen der Türen durch verkeilen, verstellen, festbinden etc. nicht blockiert wird.

Bei allen eingesetzten Brandschutzklappen der FRG und des HL sind Schmelzlotauslösungen installiert. Wird das Schießen der Brandschutzklappen bei einem Brand über Schmelzloten ausgelöst, schließen die federbelasteten Brandschutzklappen automatisch. Um rechtzeitig einen brandschutztechnischen Lüftungsabschluss vor Auslösung des Schmelzlotes sicherzustellen, sind gemäß KTA-Regel 2101.3 /16/ Abschnitt 7.5.1 und 7.5.3 Brandschutzklappen mit zusätzlichen Auslöseeinrichtungen ausgerüstet. Da bei allen Brandschutzklappen die Voraussetzungen erfüllt sind, ist eine Fehlfunktion nach KTA-Regel 2101.3 /16/ nicht zu unterstellen.

4.10.4 Ausfälle und Störungen von Lüftungsanlagen und Einrichtungen zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe

In Bezug auf Ausfälle und Störungen von Einrichtungen zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe verleiht die Betrachtung von Ausfällen und Störungen der Lüftung FRG und HL. Der Störfallablauf ist bezüglich der Lüftung weitgehend identisch zum Ereignis „Ausfälle und Störungen sicherheitstechnisch wichtiger Versorgungseinrichtungen (Ausfall der Versorgung mit Elektrizität)“, siehe Kapitel 4.10.1.

Abbaubereiche, in denen radioaktive Schwebstoffbildung zu erwarten ist, werden von den anderen Arbeitsbereichen lufttechnisch abgeschottet. Eine solche Abschottung wird in der Regel durch Einhausungen realisiert. Die Einhausung wird mit einer oder mehreren mobilen Filteranlagen ausgerüstet.

Eine der geplanten Abbautätigkeiten ist beispielsweise das Abfräsen des aktivierten Betons der Reaktorbeckenwand. Hierzu wird der Bereich oberhalb der Reaktorbecken I bis IV eingehaust. Die Einhausung hat eine Länge von ca. 26 m, eine Breite von ca. 8 m und eine Höhe von ca. 1 m. Zusammen mit dem Luftvolumen in den Reaktorbecken selbst ergibt sich somit ein Volumen von maximal 900 m³. Das Versagen dieser Einhausung kann als abdeckendes Ereignis für den Ausfall von Strahlenschutzanlagen angesehen werden, da beim Abbau des aktivierten Betons der Reaktorbeckenwand die maximale Aktivitätskonzentration innerhalb einer Einhausung entstehen wird und diese Einhausung die größten Abmessungen hat.

Die zulässige Schwebstoffkonzentration in der Atmosphäre innerhalb der Einhausung beträgt ca. 1,0E+05 Bq/m³. Bei Tätigkeiten mit P3 Maske innerhalb der Einhausung erhöht sich dieser Wert auf ca. 3,0E+06 Bq/m³. Die zulässige Schwebstoffkonzentration ergibt sich aus dem Dosisgrenzwert für exponiertes Personal der Kategorie A von 20 mSv/a, dem Nuklidvektor des

abzubauenen Normal- bzw. Barytbetons und den entsprechenden Dosisfaktoren für Inhalation /17/.

Es wird unterstellt, dass ein Flurförderzeug die Einhausung beschädigt und dass die gesamte luftgetragene Aktivität innerhalb der Einhausung in die Reaktorhalle freigesetzt wird.

Weiterhin wird angenommen, dass sich 50 Prozent der Aktivität an den inneren Wänden der Anlage ablagern. Die restliche luftgetragene Aktivität strömt über die Fortluftfilter. Bei einem zu unterstellenden Rückhaltegrad von 99,9 Prozent für Schwebstoffe /6/ erhält man bei dem beschriebenen Szenario einen Quellterm von $1,35E+06$ Bq. Aufgrund der größeren Eintrittswahrscheinlichkeit ist das Ereignis als Störung zu bewerten. Als Bewertungskriterium sind hierbei die beantragten Ableitungen mit der Luft (Schwebstoffe) mit $3,7E+07$ Bq pro Kalenderjahr heranzuziehen. Die potentiell resultierenden Abgaben sind um mehr als eine Größenordnung kleiner als die beantragten Ableitungen und damit nicht unzulässig. Aufgrund der potentiellen Aktivitätsabgabe unterhalb der beantragten Ableitungswerte ($3,7E+07$ Bq für Schwebstoffe) sowie Bewertung als Störung, wird dieser Quellterm in der Auswahl des abdeckenden Ereignisses nicht weiter berücksichtigt. Ein zusätzlich unterstellter Ausfall der Lüftung führt aufgrund des Schließens der Absperrklappen zu einer noch geringeren Abgabe (siehe Kapitel 3.2.2).

Die Ermittlung des Quellterms ist zusammenfassend in Tabelle 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-5: Quellterm Ausfall Strahlenschutzeinrichtung

Ereignis	Aerosolkonzentration innerhalb Einhausung [Bq/m ³]	Freisetzung in die Anlagenatmosphäre [Bq]	Ablagerung in der Anlage [Bq]	Freisetzung in die Umgebung Quellterm [Bq]
Ausfall Strahlenschutzeinrichtung	3,0E+06	2,7E+09	1,35E+09	1,35E+06

4.11 Handhabungsfehler

Handhabungsfehler können beim Restbetrieb und Abbau der FRG und des HL nicht ausgeschlossen werden. Beim Restbetrieb und den Abbautätigkeiten ist der Einsatz von geschultem

Personal, die Anwendung bewährter Verfahren sowie Schutzmaßnahmen an den Einrichtungen vorgesehen, die in Verbindung mit verbindlichen Anweisungen Handhabungsfehlern entgegenwirken.

Allen Handhabungsfehlern gemeinsam ist, dass sie durch die untersuchten Ereignisabläufe infolge Einwirkungen von innen, insbesondere bei einem zu unterstellenden Lastabsturz oder auch einem Ausfall von Versorgungseinrichtungen abgedeckt sind und keine Auswirkungen haben.

5 Einwirkungen von außen

Gegen Einwirkungen von außen wie z. B. Hochwasser, Regen, Hagel, Sturm, Schneefall, Schneelasten, Frost, Blitzschlag, außergewöhnliche Hitzeperioden, hohe und niedrige Luftfeuchtigkeit, biologische Einwirkungen, Waldbrände, Eindringen von Gasen, anlagenexterne Explosion, äußere Brände, Erdbeben und Flugzeugabsturz werden für die Durchführung der Abbautätigkeiten keine besonderen sicherheitstechnischen Maßnahmen getroffen. Die Aussagen, die zu den oben genannten Ereignissen für die Phase Forschungsbetrieb gemacht wurden, sind weiterhin gültig, wobei das jetzige Gefährdungspotential wegen der Verringerung des Aktivitätsinventars im Vergleich zum Forschungsbetrieb um Größenordnungen geringer ist.

5.1 Naturbedingte Einwirkungen

5.1.1 Erdbeben

Der Standort Hereon liegt in der norddeutschen Tiefebene. Die Gebietseinheit befindet sich gemäß der DIN EN 1998-1/NA /18/ in der niedrigsten Amplitudenkategorie (0,0 – 0,1 m/s²). Gebiete mit der nächst höheren Amplitude (0,1 – 0,2 m/s²) sind in etwa 200 km Entfernung vorzufinden. Eine Gefährdung durch Bodenbewegungen, insbesondere durch Erdbeben, ist nicht zu erwarten.

Die Bauwerke Forschungsreaktoranlage, Heißes Labor sowie die weiteren Nebengebäude sind nicht gegen ein Bemessungserdbeben ausgelegt. Daher werden konservativ ein Versagen der Reaktorhalle und der Gebäudehülle des HL sowie eine ungefilterte Freisetzung der Raumluft in die Umgebung unterstellt.

Ebenso kann ein Versagen der Systeme und Komponenten, die gemäß kerntechnischen Regelwerken nicht gegen Erdbeben ausgelegt sind, im Erdbebenfall nicht ausgeschlossen werden.

Ungeachtet davon wird abdeckend das erdbebeninduzierte Umstürzen von Abfallgebindestapeln, großflächige mechanische Einwirkung und Brand in der FRG sowie Freisetzungen aus den Betonzellen des HL unterstellt.

5.1.1.1 Umstürzen von Abfallgebindestapeln in der FRG

Im Rahmen des Abbaus wird der aktivierte Reaktorbeckenbeton abgebaut und in Abfallbehälter verpackt. Diese können zum Teil in der FRG abgestellt werden. Bei einem Erdbeben wird das Umstürzen von Abfallgebinden bzw. das Herabstürzen von Abfallgebinden eines Stapels unterstellt. Konservativ wird dabei das gesamte Aktivitätsinventar des Reaktorbeckenbetons (ca. $2,06 \text{ E}+12 \text{ Bq}$, siehe Tabelle 5-1) als betroffen angenommen, da Beton bei mechanischer Einwirkung entsprechende Schwebstoffe erzeugen kann.

Es werden die Freisetzungsteile der Transportstudie Konrad /12, 13/ herangezogen. Es werden konservativ die Freisetzungsteile der AGG 2 (Rohabfall, nicht brennbar) und Belastungsklasse BK 1 (Absturz ohne Brand, $\leq 35 \text{ km/h}$) verwendet. Bei den Freisetzungsteilen wird zwischen zwei Partikelgrößenklassen (AED) unterschieden:

- AED 0 – 10 μm : $5,0 \text{ E}-06$
- AED 10 – 100 μm : $1,0 \text{ E}-05$

Aufgrund des zu unterstellenden Versagens der Gebäude wird konservativ keine Rückhaltung oder Ablagerung der freigesetzten Aktivität unterstellt (100 % Freisetzung in die Umgebung). Daraus ergibt sich ein Gesamtfreisetzungsteil von $1,5 \text{ E}-05$ (AED 0 – 100 μm) und eine potentielle Freisetzung von ca. $3,08 \text{ E}+07 \text{ Bq}$. Dieser Wert ist kleiner als die beantragten Ableitungen ($3,7\text{E}+07 \text{ Bq}$ für Schwebstoffe) und damit nicht unzulässig. Die nuklidspezifischen Freisetzungen sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Auf den Außenflächen werden nur nicht radioaktive Stoffe, freigemessene und freigegebene radioaktive Reststoffe abgestellt sowie radioaktive Reststoffe abgestellt, welche bei der Orientierungsmessung die Werte für die Oberflächenkontamination gemäß Tabelle 1 Spalte 5 Anlage 4 StrlSchV einhalten. Eine dosisrelevante Freisetzung kann für die Gebinde auf den Außenflächen ausgeschlossen werden.

Tabelle 5-1: Aktivitätsinventar Reaktorbeckenbeton und Freisetzung durch umstürzende Abfallgebände

Nuklid	Aktivität in Bq			Freisetzung in Bq (Anteil 1,5E-05)
	Normal- beton	Baryt- beton	Summe Beton	
H-3	2,0E+12	1,9E+10	2,02E+12	3,03E+07
C-14	2,0E+09	2,6E+08	2,26E+09	3,39E+04
Ar-39	–	1,3E+08	1,30E+08	1,95E+03
Ca-41	–	3,2E+07	3,20E+07	4,80E+02
Fe-55	1,0E+10	9,6E+07	1,01E+10	1,52E+05
Co-60	2,0E+09	9,0E+08	2,90E+09	4,35E+04
Ba-133	–	7,6E+09	7,60E+09	1,14E+05
Eu-152	8,0E+09	4,0E+09	1,20E+10	1,80E+05
Eu-154	–	2,6E+08	2,60E+08	3,90E+03
Summe	2,0E+12	3,2E+10	2,06E+12	3,08E+07

5.1.1.2 Großflächige mechanische Einwirkung in der FRG

Aufgrund eines Erdbebens ist eine großflächige Einwirkung, z. B. durch einen Absturz eines Dachbinders zu unterstellen. Wie auch im vorherigen Unterkapitel wird die Betroffenheit des kompletten Aktivitätsinventars des Reaktorbeckenbetons unterstellt (siehe Tabelle 5-1, Spalte 4). Es wird dabei von verpackten Rohabfällen ausgegangen, da die Betroffenheit des kompletten Reaktorbeckenbetons im Einbauzustand nicht zu unterstellen wäre. Für die Freisetzung werden die Faktoren des ESK-Stresstest /19/ mit einem Wert von 1,0 E-02 (davon 50 % lungengängig) herangezogen. Aufgrund des zu unterstellenden Versagens der Gebäude wird konservativ keine Rückhaltung oder Ablagerung der freigesetzten Aktivität unterstellt (100 % Freisetzung in die Umgebung). Daraus ergibt sich ein Gesamtfreisetzungsanteil von 1,0 E-02 und eine potentielle Freisetzung von ca. 2,06 E+10 Bq.

Die Ermittlung des Quellterms ist zusammenfassend in Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2: Quellterm Erdbeben mit großflächiger mechanischer Einwirkung

Nuklid	Aktivität in Bq	
	Summe Beton	Freisetzung (Anteil 1,0 E-02)
H-3	2,02E+12	2,02E+10
C-14	2,26E+09	2,26E+07
Ar-39	1,30E+08	1,30E+06
Ca-41	3,20E+07	3,20E+05
Fe-55	1,01E+10	1,01E+08
Co-60	2,90E+09	2,90E+07
Ba-133	7,60E+09	7,60E+07
Eu-152	1,20E+10	1,20E+08
Eu-154	2,60E+08	2,60E+06
Summe	2,06E+12	2,06E+10

5.1.1.3 Brand

Es wird zusätzlich ein erdbebeninduzierter Brand, z. B. von kontaminierten Reinigungstüchern unterstellt. Dazu wird auf die in die Anlagenatmosphäre freigesetzte Aktivität (siehe Tabelle 4-1, Spalte 3) ein Freisetzunganteil in die Umgebung von 100 % unterstellt. Damit ergeben sich die in Tabelle 5-3 zusammengefassten Freisetzungen.

Tabelle 5-3: Quellterm Erdbeben mit Brand eines Fasses

Nuklid	Freisetzung in die Anlagenatmosphäre	Freisetzung in die Umgebung
	in Bq	in Bq
Co-60	6,35E+06	6,35E+06
Cs-137	7,31E+08	7,31E+08
Am-241	2,70E+05	2,70E+05
Summe	7,37E+08	7,37E+08

5.1.1.4 Betonzellen 2 – 4 des HL

Ein erdbebeninduzierter Absturz von radioaktiven Stoffen in den Betonzellen führt aufgrund der geringen Fallhöhen zu keiner relevanten Freisetzung sofern diese Stoffe nicht sowieso auf dem Boden abgestellt sind.

Aufgrund der Dicke der Betonwand/-decke ($> 1,1$ m) sowie der Stahlinnenauskleidung (Stahl-liner) führt eine großflächige mechanische Einwirkung (z. B. Absturz eines Dachbinders) nicht zu einer entsprechenden Einwirkung auf die radioaktiven Stoffe, die sich in der Betonzelle befinden.

Auch im Rahmen des Abbaus werden diese Stoffe weitestgehend in Stahlgussbehälter verpackt. Eine Freisetzung aus diesen Gebinden ist aufgrund der Auslegung der Behälter nicht zu unterstellen.

Abgesehen von den bereits aufgeführten Punkten, bestehen die radioaktiven Stoffe in den Betonzellen 2–4 zum überwiegenden Teil aus aktivierten Stoffen oder auch gekapselten Präparaten. Eine mechanische Einwirkung führt aufgrund des Einschlusses der radioaktiven Stoffe in den Materialien zu keiner relevanten Freisetzung. Ebenso wäre ein relevanter Brand aufgrund fehlender geeigneter Brandlasten auszuschließen.

Zur Abschätzung einer Freisetzung wird die Mobilisierung der Oberflächenkontamination in den Betonzellen herangezogen. Diese wird für das HL gemäß /3/ mit $5,0 \text{ E}+09$ Bq abgeschätzt. Bei einem Erdbeben wird angenommen, dass die Lüftungsanlage ausfällt und dadurch keine gerichtete Luftströmung mehr aufrechterhalten werden kann.

Die Betonzellen sind mit Stahllinern vollständig und luftdicht ausgekleidet. Daher kann eine potentielle Freisetzung aus den Betonzellen nur durch Undichtigkeiten der Öffnungsabdeckungen zum einen sowie durch die Undichtigkeit der Zu- und Abluftklappen in Verbindung mit erdbebeninduzierten Undichtigkeiten der Lüftungskanäle zum anderen erfolgen. Die Freisetzunganteile werden mit $< 1 \%$ abgeschätzt. Weiter wird abdeckend eine Freisetzung aus dem Gebäude in die Umgebung von 10% unterstellt. Eine Ablagerung wird konservativ nicht unterstellt. Somit ergibt sich ein Gesamtfreisetzunganteil von $1,0 \text{ E}-03$ und eine potentielle Freisetzung von ca. $5,0 \text{ E}+06$ Bq (siehe Tabelle 5-4). Dieser Wert ist deutlich kleiner als die beantragten Ableitungen und damit nicht unzulässig. Ebenso ist dieser gegenüber der großflächigen mechanischen Einwirkung in der FRG vernachlässigbar.

Tabelle 5-4: Quellterm Erdbeben Heißes Labor

Nuklid	Kontamination Betonzellen in Bq	Freisetzung in Bq (Anteil 1 %)
Co-60	7,00E+08	7,00E+06
Cs-137	4,25E+09	4,25E+07
Am-241	5,00E+07	5,00E+05
Summe	5,00E+09	5,00E+07

5.1.1.5 Zusammenfassung der Freisetzungen

Aufgrund der unterschiedlichen erdbebeninduzierten Ereignisse ergeben sich mehrere Freisetzungsquellterme, die in Tabelle 5-5 zusammengefasst sind.

Tabelle 5-5: Gesamtquellterm Erdbeben

Nuklid	Aktivität in Bq				Summe
	Umstürzen Abfallge- bindestapel	Großflächige mechanische Einwirkung FRG	Brand in der FRG	Betonzellen HL	
H-3	3,03E+07	2,02E+10	–	–	2,02E+10
C-14	3,39E+04	2,26E+07	–	–	2,26E+07
Ar-39	1,95E+03	1,30E+06	–	–	1,30E+06
Ca-41	4,80E+02	3,20E+05	–	–	3,20E+05
Fe-55	1,52E+05	1,01E+08	–	–	1,01E+08
Co-60	4,35E+04	2,90E+07	6,35E+06	7,00E+06	4,24E+07
Cs-137	–	–	7,31E+08	4,25E+07	7,74E+08
Ba-133	1,14E+05	7,60E+07	–	–	7,61E+07
Eu-152	1,80E+05	1,20E+08	–	–	1,20E+08
Eu-154	3,90E+03	2,60E+06	–	–	2,60E+06
Am-241	–	–	2,70E+05	5,00E+05	7,70E+05
Summe	3,08E+07	2,06E+10	7,38E+08	5,00E+07	2,14E+10

Dieser Quellterm (Tabelle 5-5, Spalte 6) wird in Kapitel 6.1 zur Auswahl des abdeckenden Ereignisses für die Ausbreitungs- und Dosisrechnung herangezogen.

5.1.2 Überflutung (Hochwasser)

Der Standort liegt auf einer Höhe von 50 m über NN und damit deutlich oberhalb der Elbe. Eine Überflutung durch Hochwasser ist ausgeschlossen.

5.1.3 Regen (auch Starkregenereignisse)

Gemäß KOSTRA-Katalog /20/ sind für ein Starkregenereignis mit 100 Jahren Wiederkehrzeit Bemessungsniederschlagswerte von 17,9 mm innerhalb von 5 Minuten zu unterstellen.

Die Ableitung von Regenwasser der Dachentwässerung und der befestigten Flächen der FRG/HL erfolgt über eine gesonderte Leitung, die aus erdverlegten Betonröhren besteht, sowie einem Vorfluter in die Elbe. Das Wasser fließt mit natürlichem Gefälle der Elbe zu. Zwischen dem Rohrleitungssystem für Regenwasser und den übrigen Systemen besteht keine Verbindung. Die Auslegung erfolgte gemäß den zum Zeitpunkt der Errichtung der Bauwerke geltenden Normen.

Im Rahmen des Ausbaus der Forschungseinrichtungen am Standort wurden seit Errichtung der FRG/HL außerhalb der FRG/HL weitere konventionelle Gebäude errichtet. Ein Teil dieser Gebäude und befestigte Flächen nutzt die Regenwasserleitung der FRG/HL zur Abgabe in die Elbe, ein anderer Teil nutzt Flächenversickerung und Rigolenversickerung zur Entwässerung.

Die Regenwasserkanalisation der Betriebsstätte FRG/HL ist ausreichend leistungsfähig und es besteht keine Gefahr der Überflutung für die Betriebsstätte bei Starkregenereignissen auch nicht durch Rückstau von außerhalb der Betriebsstätte liegenden Anlagen der Regenwasserkanalisation /21/. Aufgrund der Dimensionierung der Regenentwässerungssysteme nach Maßgabe der zum Zeitpunkt der Errichtung der FRG/HL geltenden Normen sind bei einem Jahrhundertregen die Straßenabläufe und Fallrohre nicht in der Lage sind, die Niederschlagswassermengen rückstaufrei an die Kanalisation abzugeben und das von den Dachflächen überlaufende Niederschlagswasser zum Teil über die umliegenden Grünflächen versickert.

Aufgrund der Hanglage ist allerdings ein relevantes Aufstauen von Wasser nicht zu unterstellen. Dennoch wird im Bereich südlich des HL eine Lachenbildung und ein Eindringen von Wasser im Bereich der Fahrzeugschleuse (USX10 R119) nicht vollständig ausgeschlossen. Allerdings führt potentiell eindringendes Wasser nicht zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe.

Ebenso besteht keine Gefährdung von schutzzielrelevanten Systemen und Einrichtungen, siehe auch Ereignis Überflutungen der Anlage in Kapitel 4.3.

Darüber hinaus sind die Gebäude gegen die bei Starkregen üblicherweise auftretenden Belastungen ausgelegt (Schwellen, Barrieren etc.). Eine Überflutung der FRG und des HL und Freisetzung von radioaktiven Stoffen aufgrund von Starkniederschlag ist daher nicht zu unterstellen.

5.1.4 Hagel

Die Auslegung der FRG und des HL gegen Hagel erfolgte gemäß den zum Zeitpunkt der Errichtung der Bauwerke geltenden Normen. Ein Störfall sowie eine Aktivitätsfreisetzung aufgrund von Hagel werden ausgeschlossen.

5.1.5 Sturm (einschließlich Tornado)

Die Auslegung der FRG und des HL gegen Sturm erfolgte gemäß den zum Zeitpunkt der Errichtung der Bauwerke geltenden Normen. Inzwischen haben sich die Berechnungs- bzw. Bemessungsverfahren geändert. Daher wurde eine Bewertung der gemäß Bestandsunterlagen angesetzten Lastannahmen mit den heutigen Anforderungen hinsichtlich der Tragfähigkeit durchgeführt /22/. Die Bewertung zeigt, dass die Gebäude der FRG und HL mit Ausnahme des Fortluftkamins auch nach heutigem Ermessen ausreichend für Windlasten bemessen sind.

5.1.5.1 Absturz von Ziegeln des Fortluftkamins

Die Bewertung des Fortluftkamins nach heutigen Anforderungen zeigt, dass im oberen Bereich des Fortluftkamins der Nachweis nicht eingehalten werden kann. Da die maximale Windbelastung auf den Fortluftkamin nur auf der Leeseite auftreten kann, würde eine Beschädigung am Fortluftkamin dazu führen, dass Mauerwerksstücke in Richtung der Reaktorhalle und des Heißen Labors fallen könnten. Prinzipiell kann eine Rissbildung der Gebäudedecken durch herabfallende Mauerwerksstücke nicht vollständig ausgeschlossen werden. Dies kann dann zu geringen Undichtigkeiten führen, durch die potentiell eine Freisetzung der Raumluft (Reaktorhalle) in die Umgebung erfolgen kann.

Durch die Lüftungsanlage wird eine Freisetzung durch die vorhandene Unterdruckhaltung eingeschränkt bzw. verhindert. Ein zusätzlicher Ausfall der Lüftung ist aufgrund unabhängiger Ursachen nicht zu unterstellen.

Nichtsdestotrotz wird selbst bei einem zusätzlich unterstellten Ausfall der Lüftungsanlage eine potentielle Freisetzung durch das Ereignis „Erdbeben“ mit abgedeckt.

5.1.5.2 Tornado

Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Wirbelsturmereignisses (Tornado) wird als sehr gering und damit als auslegungsüberschreitend eingeschätzt. Zur Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit werden Tornados anhand ihres Wirkungsbereichs bewertet. Dabei wird zwischen den unterschiedlichen Stärken gemäß Fujita-Skala im Folgenden unterschieden. Die Fujita-Skala bewertet Tornados anhand ihres Schadensbildes von F0 – F12, wobei nur Ereignisse von F0 (leichte Schäden) – F5 (unglaubliche Schäden) bisher beobachtet wurden.

Aufgrund der Auslegung der Gebäude lassen sich relevante Schäden, die potentiell zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen führen, für die Stufen F0 (leicht) – F1 (mäßig) ausschließen. Ebenso wird die Eintrittswahrscheinlichkeit von Tornados der Stufen F4 (verheerend) und F5 (unglaublich) am Standort aufgrund der Seltenheit als äußerst gering eingestuft (ca. 2 F5-Ereignisse in den letzten 300 Jahren und ca. 7 F4-Ereignisse in den letzten 150 Jahren in Deutschland). Damit liegen die F4 oder stärkere Ereignisse im Bereich des Restrisikos.

Für die Stufen F2 und F3 werden die Daten der European Severe Weather Database (ESWD) /23/ herangezogen.

Es wird ein Ausschnitt $53,40^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$ nördliche Breite und $10,43^{\circ} \pm 1,0^{\circ}$ östliche Länge (ca. $111,2 \text{ km} \times 132,6 \text{ km}$, ca. $14\,745 \text{ km}^2$) ausgewählt, siehe Abbildung 5-1. Darin finden sich in den letzten 100 Jahren (1922 – 2022) 12 F2-Ereignisse und 3 F3-Ereignisse.

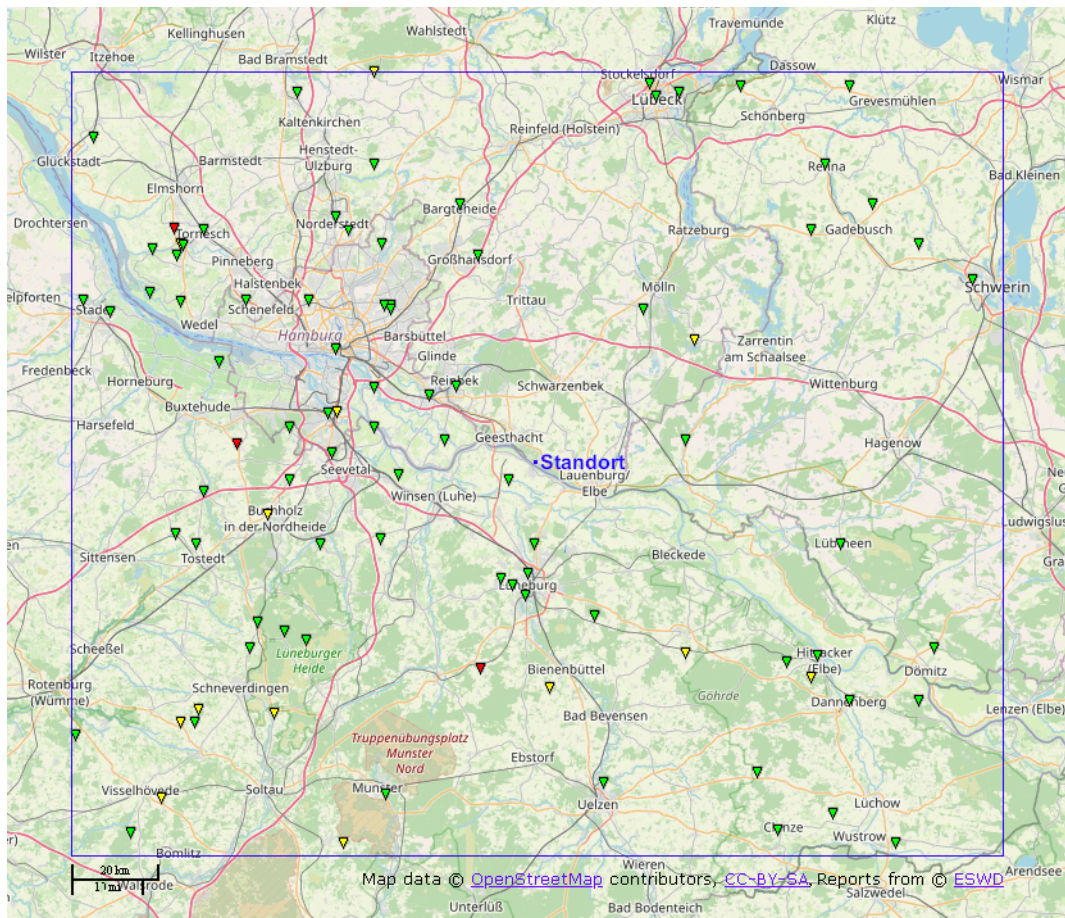


Abbildung 5-1: Karte der beobachteten Tornados (rot: F3, gelb: F2, grün: $\leq F1$)

Quelle: ESWD /23/

Zu den jeweiligen Schadensstufen (nach Fujita Skala) liegen leider keine geeignete Werte oder Statistiken vor. Daher wurde eine Abschätzung aufgrund der individuellen Daten der Tornados im Betrachtungsraum durchgeführt (ESWD). Dazu wurden die Mittelwerte der verfügbaren Pfadbreiten und -längen gebildet. Sofern nur die Angabe der maximalen Pfadbreite vorhanden war, wurde die halbe maximale Pfadbreite als mittlere Pfadbreite angenommen. Es ergeben sich aus der Mittelwertbildung von jeweils 10 verfügbaren Angaben für F2 Tornados (Pfadbreite zwischen 20 – 100 m und Pfadlänge zwischen 2,3 – 16 km) eine gemittelte Breite von 62,5 m und Länge von 7,44 km. Diese Werte wurden auf eine mittlere Pfadbreite von 75 m und eine mittlere Pfadlänge von 7,5 km gerundet.

Um auch die Ausdehnung des Standorts selbst zu berücksichtigen, wird die Pfadbreite um die Breite des Gebäudes 3 (ca. 90 m) erweitert. Damit ergibt sich eine Betroffenheitsfläche von

ca. 1,24 km² (7,5 km × 0,165 km) pro F2-Ereignis. Als Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt sich daraus:

$$P(F2) = \frac{\text{Anzahl Ereignisse} \cdot \text{betroffene Fläche}}{\text{Zeitraum} \cdot \text{Gesamtfläche}} = \frac{12 \cdot 1,24 \text{ km}^2}{100 \text{ a} \cdot 14\,745 \text{ km}^2} = 1,0 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{a}}$$

F3-Ereignisse weisen einen größeren Wirkungsbereich im Vergleich zu F2-Ereignissen auf. Zur Abschätzung der Schadensfläche der F3-Tornados sind im Betrachtungsraum, auch aufgrund der Seltenheit, keine Daten verfügbar. Daher wurde auf deutschlandweite F3-Tornado-Ereignisse zurückgegriffen und entsprechend eine mittlere Pfadbreite von 200 m und eine mittlere Pfadlänge von 15 km grob abgeschätzt. Damit ergibt sich als Betroffenheitsfläche ca. 4,35 km² (15 km × 0,29 km) pro F3-Ereignis. Als Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt sich daraus:

$$P(F3) = \frac{3 \cdot 4,35 \text{ km}^2}{100 \text{ a} \cdot 14\,745 \text{ km}^2} = 8,9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{a}}$$

Bei wetterbedingten Einwirkungen von außen ist eine Zuordnung zu Auslegungsstörfällen bis zu einer Eintrittshäufigkeit von 10⁻⁴/a gemäß RSK-Stellungnahme /24/ ausreichend. Damit wird der Tornado als auslegungsüberschreitendes Ereignis eingestuft.

Das auslegungsüberschreitende Ereignis wird durch das Ereignis Flugzeugabsturz im Kapitel 7.2 mit abgedeckt.

5.1.6 Schneefall

Die Auslegung der FRG und des HL gegen Schneefall erfolgte gemäß den zum Zeitpunkt der Errichtung der Bauwerke geltenden Normen. Ein Störfall sowie eine Aktivitätsfreisetzung aufgrund von Schneefall werden ausgeschlossen.

5.1.7 Schneelasten

Die Auslegung der FRG und des HL gegen Schneelasten erfolgte gemäß den zum Zeitpunkt der Errichtung der Bauwerke geltenden Normen. Inzwischen haben sich die Berechnungs-

bzw. Bemessungsverfahren geändert. Daher wurde eine Bewertung der gemäß Bestandsunterlagen angesetzten Lastannahmen mit den heutigen Anforderungen hinsichtlich der Tragfähigkeit durchgeführt /22/. Die Bewertung zeigt, dass die Dachflächen in den Normalbereichen auch nach heutigem Ermessen ausreichend für Schnee und Windlasten bemessen sind. Bei besonderen Wetterlagen (Schneesturm) besteht im Bereich von Höhenversprüngen die Gefahr von „Schneesackbildungen“ durch Schneeverwehungen. Daher werden die betreffenden Teilbereiche bei entsprechenden Wetterlagen beobachtet und gegebenenfalls geräumt.

Aufgrund der ausreichenden Bemessung und den administrativen Maßnahmen sind somit Auswirkungen auf den Restbetrieb und radiologische Auswirkungen auf die Umgebung durch diese Ereignisse nicht zu besorgen.

5.1.8 Frost

Die Auslegung der FRG und des HL gegen Frost erfolgte gemäß den geltenden einschlägigen Normen. Ein Störfall sowie eine Aktivitätsfreisetzung aufgrund von Frost werden ausgeschlossen.

5.1.9 Blitzschlag

Die FRG und das HL verfügen über eine Blitzschutzanlage nach geltenden Bestimmungen (VDE). Damit ist eine ausreichende Vorsorge gegen Blitzschlag getroffen.

Auswirkungen auf den Restbetrieb und radiologische Auswirkungen auf die Umgebung aufgrund von Blitzschlag sind deshalb nicht zu besorgen.

5.1.10 Außergewöhnliche Hitzeperioden

Die durch außergewöhnliche Hitzeperioden möglichen Ereignisabläufe können zu Ausfällen und Störungen an Betriebssystemen oder zu Störfällen durch menschliches Versagen (z. B. Lastabstürze) führen. Allen Ereignissen gemeinsam ist jedoch, dass sie keine Auswirkungen haben, die nicht durch die untersuchten Ereignisabläufe infolge Einwirkungen von innen bereits abgedeckt sind.

5.1.11 Hohe oder niedrige Luftfeuchtigkeit

Die Lüftungsanlagen sind bezüglich hoher oder niedriger Luftfeuchtigkeit ausgelegt. Ein Störfall sowie eine Aktivitätsfreisetzung aufgrund von hoher oder niedriger Luftfeuchtigkeit werden ausgeschlossen. Ebenso hat eine hohe oder niedrige Luftfeuchtigkeit keine Auswirkungen auf die im Restbetrieb sicherheitstechnisch relevanten Systeme, die zu einer Freisetzung führen würden.

5.1.12 Biologische Einwirkungen

Die durch biologische Einwirkungen möglichen Ereignisabläufe können zu Ausfällen und Störungen an Betriebssystemen oder zu Störfällen durch menschliches Versagen (z. B. Lastabstürze) führen.

Eine Verstopfung des Kühlwassereinlaufes durch Muschelbewuchs, Algen, Fische, Laub, Treibgut etc. sowie mikrobiologische Korrosion gemäß /25/ ist auf die FRG und das HL nicht anwendbar und daher nicht zu unterstellen.

Sofern ein sicheres Durchführen von Abbautätigkeiten nicht möglich sein sollte, werden die Tätigkeiten entsprechend unterbrochen. Allen Ereignissen gemeinsam ist jedoch, dass sie keine Auswirkungen haben, die nicht durch die untersuchten Ereignisabläufe infolge Einwirkungen von innen bereits abgedeckt sind.

5.1.13 Waldbrände

Ein Übergreifen eines Waldbrandes auf die Gebäude der FRG und des HL kann aufgrund der räumlichen Distanz ausgeschlossen werden.

Das Eindringen von Rauchgasen ist in Kapitel 5.2.1 sowie äußere Brände abdeckend in Kapitel 5.2.2 betrachtet.

5.2 Zivilisatorisch bedingte Einwirkungen

5.2.1 Eindringen gefährlicher Stoffe

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten ist das Auftreten von signifikanten Mengen toxischer oder korrosiver Gase nicht zu unterstellen. Auf dem Hereon-Gelände sind gefährliche Stoffe überwiegend in den Laboren vorhanden und liegen in täglichen Verbrauchsmengen vor. Größere Mengen werden in zugelassenen Gefahrstoffschränken aufbewahrt und sind somit ausreichend sicher.

In der näheren Umgebung gibt es keine Einrichtungen, die als mögliche Quelle hierfür in Frage kommen (siehe auch Kapitel 7.1). Ein dennoch unterstelltes Eindringen gefährlicher Stoffe hat keinen relevanten Einfluss auf die kerntechnische Anlage und eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen. Bei unterstellten anlagenexternen Bränden ergeben sich aufgrund der thermischen Überhöhung und der Abstände auch bei ungünstigen Windrichtungen entsprechende Verdünnungen und damit nur geringe Brandgaskonzentrationen. Sofern ein sicheres Durchführen von Abbautätigkeiten nicht möglich sein sollte bzw. eine Gefährdung durch Gase bekannt wird, werden die Tätigkeiten entsprechend unterbrochen und das Personal begibt sich in Sicherheit. Eine durch gefährliche Gase bedingte Fehlbedienung des Personals wird durch das Szenario „Absturz von Lasten“ abgedeckt.

Auf dem Hereon-Gelände um die FRG und das HL gibt es keine Einrichtungen, in denen entsprechend große Mengen an Gasen vorhanden wären. Bei einer unterstellten Quelle außerhalb dieses Geländes (minimale Entfernung > 140 m) ergibt sich bei ungünstigster Ausbreitungsrichtung aufgrund der Durchmischung (Ausbreitungsklasse F) keine ausreichend hohe Konzentration in der Atmosphäre an der FRG und dem HL (Konzentration < untere Explosionsgrenze, z. B. Wasserstoff, Methan etc.). Somit wird ein Eindringen von Gasen, die in der FRG und dem HL zu einem explosionsfähigen Gemisch führen, als sehr unwahrscheinlich bewertet. Sofern eine Explosion trotzdem zu unterstellen ist, wird dieses Ereignis durch den Flugzeugabsturz mit abgedeckt.

Dies gilt gleichermaßen bei einem späteren Betrieb der Versuchsanlage zur Wasserstoffspeicherung HTTF 2 auf dem Hereon-Gelände mit einer Entfernung von ca. 300 m, siehe Kapitel 7.1.

5.2.2 Anlagenexterner Brand

In der näheren Umgebung der FRG und des HL befindet sich das Notstromgebäude mit entsprechendem Kraftstoff. Zur frühzeitigen Branderkennung und Alarmierung verfügt das Notstromgebäude über eine Brandmeldeanlage.

Die FRG ist über einen Verbindungsgang mit der Transportbereitstellungshalle (TBH) verbunden. Sowohl in der TBH, als auch im Verbindungsgang befinden sich keine relevanten Brandlasten. Die betreffenden Wände und Tore zum Verbindungsgang sind brandschutztechnisch ausgelegt (F90 Brandwand, T90 Tore nach DIN 4102 /26/).

Aufgrund der vorhandenen Brandschutzmaßnahmen und Einrichtungen sowie den Einsatz der alarmierten Feuerwehr, kann ein wechselseitiges Übergreifen eines Brandes zwischen FRG / HL sowohl über den Verbindungsgang zur TBH, als auch vom und zum Notstromgebäude ausgeschlossen werden.

Ein Übergreifen eines potentiellen Brandes außerhalb des Anlagengeländes der FRG und des HL auf das Anlagengelände, z. B. durch Brand umliegender Bäume oder Gebäude, kann auf Grund der räumlichen Distanz ausgeschlossen werden. Ebenso bleibt ein potentieller Brand auf dem Anlagengelände FRG/HL auf diesen Bereich beschränkt.

5.3 Ereignisse, die nicht durch das Ereignisspektrum im Abschnitt 8.3 der ESK-Leitlinien abgedeckt sind

Die Analyse zur der am Standort befindlichen Erdgasleitung sowie zu einer chemischen Reaktion auf einem vorbeifahrenden Schiff auf der Elbe ist in Kapitel 7.1 beschrieben.

Es ergeben sich keine weiteren Ereignisse, die nicht durch die oben beschriebenen Ereignisse mit abgedeckt wären.

6 Betrachtung des abdeckenden Ereignisses

6.1 Auswahl des abdeckenden Ereignisses für die Ausbreitungs- und Dosisrechnung

Bei der Bestimmung des abdeckenden Ereignisses werden diejenigen hier nicht weiter berücksichtigt, aus denen potentiell Freisetzungen resultieren, die deutlich unterhalb der beantragten Ableitungen liegen bzw. als Störungen zu bewerten sind.

Als abdeckendes Ereignis ergibt sich das Ereignis „Erdbeben“ (Kapitel 5.1.1.5) mit einer potentiellen Freisetzung in die Umgebung von 2,14+10 Bq. Es wird im Folgenden das Ereignis „Erdbeben“ näher betrachtet.

6.2 Berechnung der Exposition in der Umgebung

Auf der Basis des ermittelten Quellterms und der oben angegebenen Nuklidgemische wurde eine Ausbreitungsrechnung mit dem Programm STRESS 2007 /27/ durchgeführt. Hierbei wurden folgende Randbedingungen zugrunde gelegt:

- Effektive Emissionshöhe: 5 m (halbe Gebäudehöhe)
- Zeitintervall der Freisetzung: 0 – 8 h
- Minimale angenommener Abstand: 140 m
- Gebäudeeinfluss: 10 m Höhe, 20 m Breite

Der minimal angenommene Abstand ergibt sich dabei aus der kürzesten Entfernung der Kontrollbereiche zum Zaun des Hereon-Geländes. Dieser beträgt ca. 140 m und liegt zwischen Reaktorhalle FRG und Geländezaun (Hereon) im Bereich des Zugangs „Reaktorstraße“ (Sektor 6).

Die Ausbreitungs- und Dosisrechnung mit dem Programm STRESS 2007 erfolgt gemäß den Vorgaben der Neufassung des Kapitels 4 der Störfallberechnungsgrundlage zu § 49 StrlSchV (alt) /6/ inklusive aller Expositionspfade und 6 Altersgruppen. Es werden die erhöhten Atemraten und Verzehrswerten, unter Anwendung der Konservativitätsfaktoren, verwendet. Als Dosiskoeffizienten werden die in der Beilage 160 a und b zum Bundesanzeiger vom 28. August 2001 /17/ veröffentlichten Werte verwendet. Es wird für die Dosisberechnung der Inhalation

nuklidspezifisch diejenige Absorptionsklasse verwendet, die den größten Inhalationskoeffizienten aufweist und damit den höchsten Dosisbeitrag liefert.

Da das Programm STRESS 2007 nicht die Möglichkeit bietet, Ba-133 als freigesetztes Nuklid auszuwählen, wurde der Aktivitätswert des Ba-133 in der Berechnung als Cs-137 Freisetzung berücksichtigt. Die für die Folgedosisberechnung relevanten Dosiskoeffizienten bei innerer Exposition für Einzelpersonen der Bevölkerung von Ba-133 und Cs-137 liegen in derselben Größenordnung (vergleiche /17/).

Um die Exposition aufgrund einer ungefilterten Freisetzung nicht zu unterschätzen, wurde folgende Partikelverteilung der Schwebstoffe unterstellt:

- 0 – 5 µm: 25,0 %
 - 5 – 10 µm: 25,0 %
 - 10 – 20 µm: 20,0 %
 - 20 – 40 µm: 15,0 %
 - 40 – 70 µm: 10,0 %
 - 70 – 100 µm: 5,0 %
- } 50 %
- } 50 %

Bei der gewählten Verteilung wurde die entsprechende Partikelgrößenverteilung (AED) der Freisetzungsteile des Hauptaktivitätsbeitrags (großflächige mechanische Einwirkung) des ESK-Stresstests /19/ (Kapitel 5.4.3.1, Tabelle 2, 50 % lungengängig) berücksichtigt.

Bei diesen Bedingungen ergibt sich für die ungünstigste Referenzperson und die ungünstigste Diffusionskategorie „D“ (neutral) für das Ereignis „Erdbeben“ eine effektive Dosis von ca. 11,0 mSv („Kind > 2 – ≤ 7 Jahr“). Der ungünstigste Aufpunkt befindet sich im Abstand von ca. 150 m am Hereon-Geländezaun.

Die Dokumentation der Berechnung der Exposition in der Umgebung ist als Anlage 1 beigefügt.

6.3 Vergleich der ermittelten Dosiswerte mit dem Grenzwert der StrISchV

Die Begrenzung der Exposition als Folge von Störfällen bei sonstigen Anlagen und Einrichtungen und bei Stilllegungen regelt § 104 Abs. 3 der Strahlenschutzverordnung /2/. Demnach sind

bei der Stilllegung von Anlagen Schutzmaßnahmen zu treffen, so dass im Falle eines möglichen Störfalls mit Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung ein festgelegter Wert für die Exposition in der Umgebung nicht überschritten wird. Dieser Wert ist in den Übergangsvorschriften der StrlSchV § 194 /2/ auf eine effektive Dosis von 50 mSv begrenzt.

In der Störfallanalyse wurden sicherheitstechnisch bedeutsame Ereignisabläufe bei der Stilllegung und dem Abbau der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors analysiert. Es wurde nachgewiesen, dass die mögliche Exposition als Folge von Störfällen bei der Stilllegung maximal 22 % der gemäß StrlSchV /2/ zulässigen Exposition beträgt.

7 Betrachtung von abdeckenden, auslegungsüberschreitenden Ereignissen

7.1 Anlagenexterne Explosion

Die Wärmeversorgung mehrerer Gebäude des Hereon erfolgt über ein zentrales Heizwerk (in ca. 135 m Entfernung zu den Gebäuden des FRG und des HL). Als Brennstoff wird Erdgas verwendet, das über eine Verteilleitung der Stadtwerke Geesthacht (STWG) und ein Hereon-eigenes Leitungsnetz bezogen wird. Die Gasleitung der STWG überquert die Außengrenze des Hereon-Geländes im Bereich der Pforte bis zu einer Gasregelstation (ca. 480 m Entfernung von der FRG und vom HL). Eine weitere Gasleitung, die der Versorgung des Ortsteils Tesperhude dient, nähert sich dem Hereon-Gelände von Südosten (mit einer minimalen Entfernung von ca. 100 m zu den Gebäuden der FRG und des HL).

Der Bau und der Betrieb von Gasleitungen bis zum letzten Absperrorgan vor der Verbrauchsstelle unterliegen insbesondere auch auf Werksgeländen dem Energiewirtschaftsgesetz und sind dem DVGW-Regelwerk (DVGW – Deutscher Verband des Gas- und Wasserfachs) entsprechend auszuführen. Sofern die Anlagen und Leitungen der Gasversorgung nicht durch den Eingriff Dritter beschädigt werden, sind Gefährdungen, die von dieser Technik ausgehen, vernünftigerweise ausgeschlossen. Dennoch wird der vollständige Abriss der Leitung im Bereich der Gasversorgungsleitung im Südosten, an der Gasregelstation und am Heizwerk unterstellt. Dabei wird konservativ angenommen, dass sich eine große Gaswolke ansammelt und zu einem späten Zeitpunkt zündet (Late Explosion). Die durchgeführte Sicherheitsanalyse /28/ zeigt für alle drei Fälle, dass unter den konservativen Annahmen mit keiner Druckwelle zu rechnen ist und es somit zu keiner Gefährdung der kerntechnisch relevanten Anlagen kommt. Ebenso kann eine Gefährdung durch Trümmerflug ausgeschlossen werden.

Auf dem Hereon- wurde in ca. 300 m Entfernung zu den kerntechnischen Anlagen eine Versuchsanlage zur Wasserstoffspeicherung HTTF 2 errichtet. Die HTTF 2 ist gemäß allen anzuwendenden technischen Regeln und Richtlinien errichtet und befindet sich auf dem Stand von Wissenschaft und Technik. Die HTTF 2 ist keine erlaubnispflichtige Anlage nach § 18 Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) /29/. Die HTTF 2 wird erst in Betrieb genommen, wenn der Nachweis der Rückwirkungsfreiheit des Betriebs der HTTF 2 auf die FRG und das HL im aufsichtlichen Verfahren erfolgt ist.

Weiter muss eine Explosion auf einem vorbeifahrenden Schiff auf der Elbe als sehr seltenes Ereignis unterstellt werden. Aufgrund der GGBVOHH /30/ dürfen explosionsgefährliche Stoffe, bei denen eine Explosion nicht auf das Versandstück beschränkt bleibt, im Regelungsbereich nicht abgestellt werden. Ebenso ist die Masse von explosionsgefährlichen Stoffen, die den Regelungsbereich der GGBVOHH /30/ durchfahren bzw. die direkt überladen werden, beschränkt (2 000 kg für Explosivstoffe der Gefahrgutklasse 1.1). Als Sicherheitsbestimmung sind solche Güter bordseitig besonders zu überwachen.

Aufgrund der Nähe zum Regelungsbereich der GGBVOHH /30/ und der damit verbundenen Einschränkungen und Sicherheitsmaßnahmen ist eine Explosion auf einem vorbeifahrenden Schiff auf der Elbe als sehr seltenes Ereignis einzustufen. Gemäß 2. SprengV /31/ ist bei Explosivstoffen (2 000 kg der Gefahrgutklasse 1.1 und Gefährdung durch schwere Sprengstücke) ein Sicherheitsabstand von 275 m einzuhalten. Für Explosivstoffe der anderen Gefahrgutklasse 1.2 – 1.6 ergeben sich geringere Sicherheitsabstände. Aufgrund einer Entfernung von ca. 450 m zur Fahrinne sind daher keine relevanten Auswirkungen zu erwarten, die nicht durch die betrachteten „Einwirkungen von Innen“ sowie den „Flugzeugabsturz“ abgedeckt sind.

Die Durchfahrt von gefährlichen Gütern auf der K63 (Elbuferstraße) wird durch die Negativliste der „Fahrwegbestimmung nach der Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB)“ /32/ ausgeschlossen. Aktive Bahnstrecken sind in der näheren Umgebung nicht vorhanden. Somit geht hiervon keine Gefährdung für den Abbau des FRG und des HL aus.

Im Übrigen finden sich im Umkreis des Standorts Hereons keine chemischen Betriebe, in denen mit explosionsgefährlichen Stoffen umgegangen wird.

7.2 Flugzeugabsturz

In einem Umkreis von circa 50 km um den Standort Hereon befinden sich der internationale Flughafen Hamburg (37 km NW), der Flugplatz Uetersen-Heist (54 km NW) sowie die Landeplätze Lüneburg (17 km SSO), Hamburg-Finkenwerder (41 km WNW) und Lübeck-Blankensee (48 km NNO). Die Anlage liegt nicht unter einer der Einflug- oder Abflugschneisen eines Flughafens oder Landeplatzes. Ebenso befinden sich Flugbeschränkungen (ED-R3) im Bereich der FRG und des HL.

Die Wahrscheinlichkeit eines Flugzeugabsturzes auf das Standort-Zwischenlager des Kernkraftwerks Krümmel (SZK) wird mit ca. $1,0 \cdot 10^{-6}$ /33/ angegeben. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wahrscheinlichkeit eines Flugzeugabsturzes auf die Forschungsreaktoranlage und das Heiße Labor identisch zum Standort-Zwischenlager SZK ist, da die Standorte nur eine räumliche Distanz von ca. 1,2 km aufweisen.

Trotz des sehr unwahrscheinlichen Falles eines Flugzeugabsturzes auf die Forschungsreaktoranlage und das Heiße Labor wird ein Absturz einer Militärmaschine auf die Gebäude der FRG und des HL unterstellt. Dabei wird angenommen, dass die Maschine die Gebäudedecken durchschlägt und eine punktförmige mechanische Einwirkung erfolgt, die hauptsächlich durch die massive Triebwerkswelle verursacht wird. Es wird weiter unterstellt, dass es aufgrund des austretenden Treibstoffs der Maschine zu einem Stützbrand (thermische Einwirkung) kommt.

Da es sich um ein auslegungsüberschreitendes Ereignis handelt, wird der Flugzeugabsturz nach den Vorgaben und Maßstäben der Notfall-Dosiswerte-Verordnung (NDVV) /7/ sowie gemäß ESK-Leitlinie /5/ unter realistischen Randbedingungen betrachtet.

Aufgrund der räumlichen Trennung der FRG von dem HL wird die gleichzeitige Betroffenheit der beiden Anlagenteile ausgeschlossen. Im Folgenden werden daher separate Quellterme ermittelt.

7.2.1 Freisetzungsquellterm Flugzeugabsturz auf die FRG

Die wesentlichen Aktivitäten in der FRG befinden sich in den Reaktorbecken inklusive Beckenwand. Dabei handelt es sich zum Großteil um Metalle sowie mineralische Stoffe (nicht brennbar). Diese wurden während des Forschungsbetriebs zum einen durch die Neutronenfelder der Kerne aktiviert und zum anderen an der Oberfläche kontaminiert. Für die Ereignisbetrachtung ist vor allem der Anteil relevant, der freigesetzt werden kann und sich mit der Luft ausbreitet. Die Radioaktivität der aktivierten Stoffe ist dabei in dem Metall- bzw. Mineralgefüge eingeschlossen und kann nicht durch die zu betrachtenden Ereignisse freigesetzt werden (siehe auch Graphit beim „Anlageninternen Brand“, Kapitel 4.1).

Eine relevante Freisetzung von Oberflächenkontamination durch einen Störfall kann aufgrund der Überdeckung mit Wasser ausgeschlossen werden (die Becken werden erst nach der Räumung entleert). Auswirkungen einer potentiellen Leckage sind in Kapitel 4.2 beschrieben.

Eine nicht vernachlässigbare potentielle Freisetzung ergibt sich bei geräumten und entleertem Reaktorbecken. Hierbei kann durch entsprechende mechanische und thermische Einwirkung ein Teil der Aktivität des aktivierten Beckenbetons als radioaktive Schwebstoffe und Gase freigesetzt werden. Um eine entsprechende Freisetzung nicht zu unterschätzen wird die Summe der Aktivitäten des Normalbeton und des Schwerbetons (Barytbeton) herangezogen (Tabelle 5-1). Dabei spielt zum einen die genaue Abstellposition innerhalb der Gebäude keine Rolle, als auch zum anderen, ob sich der Beckenbeton noch in Einbaulage befindet oder bereits in Container verpackt ist. Ein Abstellen des aktivierten Betons mit dosisrelevanter Aktivität erfolgt nur innerhalb der Gebäude.

Für die Bestimmung der Freisetzung werden konservativ die Freisetzungsteile des ESK-Stresstest /19/ als auch die Freisetzungsteile der Transportstudie Konrad /12, 13/ berücksichtigt. Für die Freisetzungen aufgrund der punktförmigen mechanischen Einwirkung werden abdeckend die entsprechenden Anteile des ESK-Stresstests für Rohabfälle (15 %, davon 50 % lungengängig) verwendet.

Weiter ist eine thermische Einwirkung zu berücksichtigen. Für den Reaktorbeckenbeton wird dabei die Belastungsklasse BK 8 mit Aufprallgeschwindigkeiten > 80 km/h (durch Trümmersteile) und ein Brand bei 800 °C für 30 Minuten angesetzt (/12, 13/). Dem aktivierten Beton wird die Abfallgebindegruppe (AGG) AGG 2 („Unfixierte und nicht kompaktierbare metallische und nichtmetallische Abfälle (einschließlich Verdampferkonzentrate) in Stahlblechcontainern oder Betonbehältern“) zugeordnet. Dies ist abdeckend für die AGG mit den höchsten Freisetzungsteilen von nicht brennbaren Abfällen. Die Freisetzungsteile betragen gemäß (/12, 13/) $5,0E-03$ für AED $0 - 10$ μm und $6,0E-04$ für AED $10 - 100$ μm (insgesamt $0,56$ %) und sind größer als die entsprechenden Werte des ESK-Stresstests /19/. Da die Betroffenheit aller radioaktiven Stoffe unterstellt wird, spielt die Kerosinmenge für die weitere Betrachtung keine Rolle (Maximalansatz).

Als Gesamtfreisetzungsteil ergibt sich konservativ aus den Summen der punktförmigen mechanischen Einwirkung (15 %) und thermischen Einwirkung ($0,56$ %) ein Anteil von $15,56$ % für Schwebstoffe und 100 % für die Nuklide H-3 und C-14 (siehe Tabelle 7-1). Aufgrund des maßgeblichen Beitrags durch die mechanische Einwirkung wird eine Partikelgrößenverteilung von 50 % AED $0 - 10$ μm und 50 % AED $10 - 100$ μm angenommen.

Der Brand verursacht in Verbindung mit der Zerstörung der Hallendecke einen entsprechenden direkten Transport in die Umgebung. Eine Rückhaltung oder Ablagerung von radioaktiven Stoffen durch die Gebäudestrukturen wird daher nicht berücksichtigt.

Die sich ergebenden Freisetzungsteile und die entsprechende freigesetzte Aktivität ist in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Nuklidspezifischer Quellterm Flugzeugabsturz auf die FRG

Nuklid	Aktivität in Bq	Freisetzungsteile /19, 12, 13/	Freisetzung in die Umgebung in Bq
H-3	2,02E+12	100 %	2,02E+12
C-14	2,26E+09	100 %	2,26E+09
Ar-39	1,30E+08	15,56 %	2,02E+07
Ca-41	3,20E+07		4,98E+06
Fe-55	1,01E+10		1,57E+09
Co-60	2,90E+09		4,51E+08
Ba-133	7,60E+09		1,18E+09
Eu-152	1,20E+10		1,87E+09
Eu-154	2,60E+08		4,05E+07
Summe	2,03E+12		–

7.2.2 Freisetzungsquellterm Flugzeugabsturz auf das HL

Bei einem potentiellen Absturz auf das Heiße Labor wird eine mechanische Einwirkung und Brand in den Betonzellen 2–4 unterstellt. Trotz einer Wandstärke von > 1,1 m Beton und 8 mm Stahl kann ein Durchstanzen der Triebwerkswelle nicht vollständig ausgeschlossen werden. Ebenso kann ein Teil des Treibstoffs durch die entstandene Öffnung und die Spalte zwischen den Betonstopfen und der Zellendecke in das Innere der Betonzelle gelangen. Der unterstellte Stützbrand in der Betonzelle wird aufgrund der begrenzten Treibstoffmenge auf eine maximale Branddauer von 30 Minuten beschränkt. Es wird von der Nichtverfügbarkeit der CO₂-Löschanlage ausgegangen.

Die wesentlichen Inhalte der Betonzellen, die zu freisetzbaren Aktivitäten führen können, sind die dort vorhandenen Mischabfälle, die auch geringe brennbare Bestandteile aufweisen. Die

Mischabfälle bestehen weitestgehend aus aktivierten metallischen Komponenten (Stähle, Aluminium, Beryllium wie z. B. Schrauben, Metallhalterungen, Drähte etc.). Der Anteil an brennbaren Abfällen wie Filter und Staubsaugerbeutel etc. fällt sehr gering aus und beträgt weniger als 1 % der Gesamtmasse. Somit ergibt sich auch ein nur sehr geringer Anteil an mobilisierbarer Aktivität, die freigesetzt werden könnte. Das vorhandene Aktivitätsinventar ist weitestgehend in den Metallen eingeschlossen.

In Bezug auf eine nicht vollständig auszuschließende punktförmige mechanische Einwirkung würde die Verwendung der Freisetzungsteile des ESK-Stresstest /19/ für Rohabfälle (mit einem Anteil von 15 %) bei den metallischen Abfällen des Heißen Labors zu einer massiven Überschätzung der potentiellen Freisetzungen führen. Dieser wäre gegebenenfalls nur auf den nichtmetallischen Anteil (< 1 %) anzuwenden.

Weiter sind auch Freisetzungen aufgrund der thermischen Einwirkung zu unterstellen. Dazu werden die Freisetzungsteile der Transportstudie Konrad /12, 13/ herangezogen. Um sowohl die thermische Einwirkung auf die Abfälle als auch die mechanische Einwirkung auf die oben genannten nichtmetallischen Abfälle zu berücksichtigen, werden die Abfallgebindergruppe AGG und der Belastungsklasse BK entsprechend konservativ gewählt, dass beide Freisetzungseffekte sicher abgedeckt sind.

Es wird die Belastungsklasse BK 8 mit Aufprallgeschwindigkeiten > 80 km/h und einem Brand bei 800 °C für 30 Minuten angesetzt. Die Mischabfälle werden der Abfallgebindergruppe (AGG) AGG 2 zugeordnet („Unfixierte und nicht kompaktierbare metallische und nichtmetallische Abfälle (einschließlich Verdampferkonzentrate) in Stahlblechcontainern oder Betonbehältern“). Im Rahmen der Räumung der Betonzellen werden die Abfälle in Stahlgussbehälter verpackt. Eine Freisetzung aus den verschlossenen Stahlgussbehälter (unabhängig von deren Abstellposition) ist durch die gewählten Freisetzungsteile ebenfalls mit abgedeckt.

Weiter befinden sich das Präparat Tristan (Sr-90) in den Kellerräumen des Heißen Labors und das Cs-Präparat (Cs-137) in den Betonzellen. Das Cs-Präparat wird ebenso AGG 2 zugeordnet. Dies ist insofern konservativ, da sich das Cs-Präparat bis zur Verpackung zum Abtransport im Probenlager unterhalb der Betonzelle 2 befindet und zu dieser hin mit 40 cm Stahl abgeschirmt ist. Eine relevante mechanische Einwirkung kann aufgrund der massiven Stahlabdeckung (dreifache Dicke im Vergleich zu Stahlgussbehälter) ausgeschlossen werden. Ebenso ist ein Brand innerhalb des Probenlagers äußerst unwahrscheinlich.

Das Präparat Tristan befindet sich in den Kellerräumen außerhalb der Betonzellen. Trotz der abweichenden Position wird angenommen, dass das Präparat durch den Flugzeugabsturz ebenso betroffen sein wird. Aufgrund der Lagerung in den Kellerräumen bzw. im Brennelementlager (UKC10R011) ist das Durchschlagen mehrerer Wände bzw. Decken erforderlich. Es wird angenommen, dass der überwiegende Teil des Treibstoffes durch Abscherung der Tragflächen beim Durchstoßen der Decken und Wände nicht bis zum Präparat gelangt. Weiter erzeugt das Präparat aufgrund seiner ehemaligen Aufgabe als Radionuklidbatterie selbst Wärme und ist entsprechend ausgelegt ($> 1\,000\text{ °C}$). Die Quelle selbst besteht aus hochschmelzendem Strontiumtitanat ($> 2\,000\text{ °C}$, Siedepunkt unbekannt) und ist durch mehrere ineinander geschachtelte und verschweißte Metallbehälter geschützt. Trotzdem wird eine mechanische Beschädigung (Undichtigkeit) der Behälter und der eigentlichen Quelle unterstellt. Da die Quelle gegen entsprechende hohe Temperaturen ausgelegt ist und auch keine brennbaren Bestandteile aufweist, werden die Freisetzungsfaktoren der BK 7 (Aufprallgeschwindigkeiten $> 80\text{ km/h}$ ohne Brand) und AGG 2 herangezogen (keine relevante Sublimation oder Verdampfung durch einen Brand, vergleiche /13/ Kapitel 7.2, Satz 3).

Die sich aus der Zuordnung ergebenden Freisetzungssanteile für die zwei aerodynamischen Partikelgrößenäquivalenten (AED) und die entsprechende freigesetzte Aktivität sind in Tabelle 7-2 zusammengefasst.

Tabelle 7-2: Nuklidspezifischer Quellterm Flugzeugabsturz auf das HL

Abfälle	Nuklid	Aktivitätsinventar in Bq	Freisetzungssanteile /12, 13/		Freisetzung in die Umgebung in Bq
			AED: 0 – 10 µm	AED: 10 – 100 µm	
Mischabfälle (AGG 2, BK 8)	Co-60	8,4E+12	5,0E-03	6,0E-04	4,70E+10
Präparat Tristan (AGG 2, BK 7)	Sr-90	5,6E+14	3,0E-04	6,0E-04	5,04E+11
Cs-Präparat (AGG 2, BK 8)	Cs-137	1,9E+12	5,0E-03	6,0E-04	1,06E+10
Summe		5,6E+14	–	–	5,62E+11

Eine Rückhaltung oder eine Ablagerung an Gebäudestrukturen wird nicht unterstellt.

7.2.3 Berechnung der Exposition in der Umgebung

Auf der Basis der ermittelten Quellterme gemäß Kapitel 7.2.1 wurde eine Berechnung der äußeren Exposition in sieben Tagen und der effektiven Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide mit dem Simulationsprogramm „SAFER 2“ /34/ durchgeführt.

Die Ausbreitungs- und Dosisrechnung mit dem Programm SAFER 2 erfolgt gemäß „Leitfaden für den fachlichen Berater der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen“ /35/. Dabei werden gemäß /7/ nur die Expositionspfade:

- äußere Exposition:
 - Gammasubmersion
 - Betasubmersion
 - Bodenstrahlung
- innere Exposition:
 - Inhalation

berücksichtigt. Es werden die Altersgruppen Kleinkind ($> 1 - \leq 2$ Jahre) und Erwachsene (> 17 Jahre) betrachtet und die erhöhten Atemraten nach /6/ verwendet. Als Dosiskoeffizienten werden die in der Beilage 160 a und b zum Bundesanzeiger vom 28. August 2001 /17/ veröffentlichten Werte verwendet.

Die Nuklide Ar-39, Ca-41, Ba-133, Eu-152 und Eu-154 sind in dem Programm SAFER 2 nicht verfügbar. Um trotzdem eine abdeckende Berechnung mit SAFER 2 durchführen zu können, wurde bezüglich der entsprechenden Nuklide wie folgt vorgegangen:

- Ar-39: Die Dosiskoeffizienten der effektiven Dosis sind 0 und die Aktivität wurde daher nicht berücksichtigt.
- Ca-41: Der potentiell freigesetzte Anteil ist sehr gering und ist (als reiner Betastrahler) mit relativ niedrigen Dosiskoeffizienten gegenüber Co-60 vernachlässigbar. Die Ca-41 Aktivität wurde daher vernachlässigt.
- Ba-133: Aktivität wird dem abdeckenden Nuklid Cs-137 zugeschlagen.
- Eu-152: Dosiskoeffizienten für das Nuklid Cs-137 sind nicht vollständig abdeckend für Eu-152, daher wird die Aktivität dem Nuklid Cs-137 mit dem Faktor 2 zugeschlagen.
- Eu-154: wie Eu-152

Es wurden weiter die folgenden Randbedingungen zugrunde gelegt:

- mittlere effektive Emissionshöhe: 50 m (thermische Überhöhung) /19/
- Zeitintervall der Freisetzung: 1 h
- Minimal angenommener Abstand: 140 m
- Expositionsdauer 7 Tage
- Partikelgrößenverteilung (AED) Aufteilung gemäß Anteil Freisetzungsfaktoren (0 – 10 µm und 10 – 100 µm)

Der minimal angenommene Abstand ergibt sich dabei aus der kürzesten Entfernung der Kontrollbereiche zum Zaun des Hereon-Geländes. Dieser beträgt ca. 140 m und liegt zwischen Reaktorhalle FRG und Geländezaun (Hereon) im Bereich des Zugangs „Reaktorstraße“ (Sektor 6).

Die in den Rechnungen verwendeten Partikelgrößenverteilungen sind in Tabelle 7-3 zusammengefasst.

Tabelle 7-3: Zusammenfassung der Partikelgrößenverteilung (AED) beim Flugzeugabsturz

AED	Quellterm			
	FRG (Reaktorbecken)	HL: Mischabfälle	HL: Präparat Tris- tan	HL: Cs-Präparat
0 – 5 µm	25 %	45 %	16,7 %	45 %
5 – 10 µm	25 %	44 %	16,6 %	44 %
10 – 20 µm	20 %	5 %	40 %	5 %
20 – 40 µm	15 %	3 %	20 %	3 %
40 – 70 µm	10 %	2 %	6,7 %	2 %
70 – 100 µm	5 %	1 %	–	1 %

In der Tabelle 7-4 sind die Ergebnisse der Ausbreitungs- und Dosisrechnungen für eine äußere Exposition von sieben Tagen und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhaillierte Radionuklide für die ungünstigste Referenzperson zusammengefasst.

Tabelle 7-4: Zusammenfassung der potentiellen Exposition beim Flugzeugabsturz

Potentielle Freisetzungsquelle	Potentielle effektive Dosis in mSv	
	Kleinkind (> 1 - ≤ 2 a)	Erwachsener (> 17 a)
FRG (Reaktorbecken)	3,65E-03	3,22E-03
HL: Mischabfälle	2,75E-02	2,40E-02
HL: Präparat Tristan	1,50E-01	2,60E-01
HL: Cs-Präparat	2,76E-03	3,54E-03
Summe HL	1,80E-01	2,88E-01

Als höchste effektive Dosis ergibt sich ein Wert von ca. 0,29 mSv (Erwachsene > 17 Jahren) für den potentiellen Absturz auf das HL. Die ungünstigste Diffusionskategorie ist „A“ (labil).

7.3 Vergleich der ermittelten Dosiswerte mit den radiologischen Kriterien der Notfall-Dosiswerte-Verordnung

In der Notfall-Dosiswerte-Verordnung (NDWV) /7/ sind radiologische Kriterien für die Angemessenheit von Schutzmaßnahmen festgelegt. Bei einer zu erwartenden effektiven Dosis von 10 mSv, welche betroffene Personen ohne Schutzmaßnahmen bei einem Daueraufenthalt im Freien innerhalb von sieben Tagen erhalten würden, ist die Aufforderung der Bevölkerung zum „Aufenthalt in Gebäuden“ angemessen. Dabei ist für die Dosis die Summe aus äußerer Exposition und Inhalation zu bilden. Bei einer zu erwartenden effektiven Dosis von 100 mSv ist entsprechend eine „Evakuierung“ angemessen.

Die zu erwartende effektive Dosis für die ungünstigste Referenzperson durch einen Flugzeugabsturz auf die Forschungsreaktoranlage und das Heiße Labor beträgt ca. 3 % des Eingreifrichtwertes für die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ sowie ca. 0,3 % des Eingreifrichtwertes für die Evakuierung. Es sind somit für die Umgebung der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors auch im Falle eines auslegungsüberschreitenden Ereignisses keine frühen Notfallschutzmaßnahmen erforderlich.

8 Zusammenfassung der Störfallanalyse

Für die Abschätzung der Auswirkungen von Störfällen wurden die Szenarien in Betracht gezogen, bei denen mit der höchsten Freisetzung von Radioaktivität zu rechnen ist. Die betrachteten Ereignisse und die daraus resultierende höchste Exposition in der Umgebung ergeben für das Ereignis „Erdbeben“, für die ungünstigste Referenzperson Kind ($> 2 - \leq 7$ Jahre) und die ungünstigste Diffusionskategorie („D“) einen Wert von ca. 11,0 mSv für die effektive Dosis. Dieser liegt deutlich unterhalb des Störfallplanungswertes der StrlSchV (§ 194) von 50 mSv.

Die zu erwartende effektive Dosis für die ungünstigste Referenzperson durch einen auslegungsüberschreitenden, abdeckenden Flugzeugabsturz zeigt, dass für die Umgebung der FRG und des HL keine frühen Notfallschutzmaßnahmen erforderlich sind.

9 Literatur

- /1/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz – AtG) vom 23.1.1959 (BGBl. I S.814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2153).

- /2/ Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. Oktober 2021 (BGBl. I S. 4645).

- /3/ Ermittlung des Aktivitätsinventars der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors – Erläuterungsbericht zur Stilllegung des Forschungsreaktors FRG-1 und Abbau der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors sowie die Zerlegung des Reaktordruckbehälters des Nuklearschiffs Otto Hahn, Helmholtz-Zentrum hereon GmbH, EB-FRG/HL/RDB-OH-07.

- /4/ Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen oder Anlagenteilen nach § 7 Atomgesetz, 16. September 2021 (BANz AT 23.11.2021 B2).

- /5/ Empfehlung der Entsorgungskommission (ESK), Leitlinien zur Stilllegung kerntechnischer Anlagen, vom 05.11.2020.

- /6/ Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gemäß § 28 Abs. 3 StrlSchV vom 18. Oktober 1983 (BANz. 1983, Nr. 245a), Fassung des Kapitels 4 "Berechnung der Strahlenexposition" vom 29. Juni 1994 (BANz. 1994, Nr. 222a), Neufassung des Kapitels 4 "Berechnung der Strahlenexposition" gemäß § 49 StrlSchV vom 20. Juli 2001 verabschiedet auf der 186. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 11. September 2003, veröffentlicht in der Reihe "Berichte der Strahlenschutzkommission", Heft 44, 2004.

- /7/ Verordnung zur Festlegung von Dosiswerten für frühe Notfallschutzmaßnahmen (Notfall-Dosiswerte-Verordnung – NDWV) vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2172; 2021 I S. 5261).
- /8/ GRS „Forschungsarbeiten zur Analyse von Rückbauerschwerpunkten bei Stilllegungsvorhaben infolge von Vorkommnissen“, GRS-547, März 2021.
- /9/ Restbetriebshandbuch FRG, HL und Zerlegehalle RDB-OH, Teil 1, Kapitel 7 Brandschutzordnung.
- /10/ Großes Handbuch Chemie, Buch und Zeit Verlagsgesellschaft mbH, Köln, (ISBN 3-8166-0379-3), S. 165 f.
- /11/ Gutachterliche Stellungnahme zur Nutzung des Ostteils der HAKONA als Bereitstellungshalle, Technischer Überwachungs-Verein Nord e. V., Hamburg, Juli 1994.
- /12/ GRS: „Transportstudie Konrad 2009“, GRS-256, Dezember 2009 mit Corrigendum vom April 2010.
- /13/ GRS: „Überprüfung des unfallbedingten Freisetzungsverhaltens bei der Beförderung radioaktiver Stoffe“, GRS-482, Oktober 2017.
- /14/ Störfallanalyse für die Zerlegung des Reaktordruckbehälters des Nuklearschiffs Otto Hahn – Erläuterungsbericht zur Stilllegung des Forschungsreaktors FRG-1 und Abbau der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors sowie die Zerlegung des Reaktordruckbehälters des Nuklearschiffs Otto Hahn, Bericht Nr. EB-FRG/HL/RDB-OH-17, Helmholtz-Zentrum hereon GmbH.
- /15/ Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, Freisetzung von Radionukliden bei Störfällen in Anlagen des Brennstoffkreislaufes – Experimentelle Kenntnisse, BMU-1990-274, Juli 1990, ISSN0724-3316.

- /16/ KTA-Regel 2101.3 – Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 3: Brandschutz an maschinen- und elektrotechnischen Anlagen, Fassung 2015-11.

- /17/ Dosiskoeffizienten bei äußerer und innerer Strahlenexposition, Bundesanzeiger Nr. 160a und b vom 28. August 2001.

- /18/ DIN EN 1998-1/NA, Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau – Nationaler Anhang, Ausgabe 2021-07.

- /19/ Stellungnahme der Entsorgungskommission, „ESK-Stresstest für Anlagen und Einrichtungen der Ver- und Entsorgung in Deutschland – Teil 2: Lager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, stationäre Einrichtungen zur Konditionierung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle, Endlager für radioaktive Abfälle“, revidierte Fassung vom 18.10.2013.

- /20/ Deutscher Wetterdienst, KOSTRA DWD 2020 Katalog, Fassung Dezember 2022.

- /21/ Hydraulische Überprüfung der Regenwasserkanalisation der Betriebsstätte FRG/HL, Ingenieurbüro für Bauwesen Ohlenroth + Brunckhorst GmbH, Stand 03.05.2023.

- /22/ Überprüfung der Lastannahmen für Schnee- und Windlasten – Gebäude 03 – Reaktor-gebäude, Helmholtz-Zentrum hereon GmbH.

- /23/ European Severe Weather Database (ESWD), <https://www.eswd.eu/>, abgerufen 06.12.2022.

- /24/ Bekanntmachung einer Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission („RSK – Verständnis der Sicherheitsphilosophie“ vom 29. August 2013), BAnz AT 05.12.2013 B4.

- /25/ RS-Handbuch 3.0.1: Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. März 2015 (BAnz AT 30.03.2015 B2), geändert am 25. Februar 2022 (BAnz AT 15.03.2022 B3).
- /26/ DIN 4102-2, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Ausgabe 1977-09.
- /27/ STRESS 2007, Version 4.0.2, TÜV NORD, Bereich Energie- und Systemtechnik, Hamburg.
- /28/ Sicherheitsanalyse der Gasanschlussleitung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht vom 06. Januar 2019.
- /29/ Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV) vom 3. Februar 2015 (BGBl. I S. 49), zuletzt geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146).
- /30/ Verordnung über die Sicherheit bei der Beförderung von gefährlichen Gütern und zur Erhöhung des Brandschutzes im Hamburger Hafen (Gefahrgut- und Brandschutzverordnung Hafen Hamburg – GGBVOHH) vom 19. März 2013 (HmbGVBl. S 93), zuletzt geändert durch Verordnung vom 21. September 2021 (HmbGVBl. S. 666).
- /31/ Zweite Verordnung zum Sprengstoffgesetz (2. SprengV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. September 2002 (BGBl. I S. 3543), zuletzt geändert durch Artikel 111 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626).
- /32/ Fahrwegbestimmung nach der Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. März 2021 (BGBl. I S. 481) – Allgemeinverfügung des Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr, Arbeit, Technologie und Tourismus Schleswig-Holstein vom 8. August 2022 -VII 436-36402/2022.

- /33/ Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen am Standort-Zwischenlager in Krümmel der Kernkraftwerk Krümmel GmbH & Co. oHG; Az.: GZ-V4 8541 510 vom 19. Dezember 2003.

- /34/ Simulationsprogramm „SAFER 2“ (Version 2.5.2), TÜV NORD.

- /35/ Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) – Hefte 37 (2004): Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen & Heft 38 (2004): Erläuterungsbericht zum Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen Bonn, September 2003, frühere Fassung von 1993.

Anlage 1: Dokumentation der Berechnung der Exposition in der Umgebung

Protokoll STRESS:	Erdbeben	75
Protokoll SAFER 2:	Flugzeugabsturz FRG (Beckenbeton)	77
Protokoll SAFER 2:	Flugzeugabsturz HL – Mischabfälle	79
Protokoll SAFER 2:	Flugzeugabsturz HL – Präparat Tristan	81
Protokoll SAFER 2:	Flugzeugabsturz HL – Cs-Präparat	83

2023-03-21 Erdbeben FRG/HL**Angaben zur Quelle**

Anzahl Quellen : 1

Quelle 1 : 2023-03-21 Erdbeben FRG/HL
kürzester Abstand zum Zaun : 140 m

Anzahl Freisetzungintervalle : 1

Intervall 1 00:00 - 08:00 h

Eingabedaten Aktivitätsfreisetzung

Quelle 1, Intervall 1

Summen der freigesetzten AktivitätEdelgase : 2,02E+10 Bq / -
Jod : 0,00E+00 Bq / -
Aerosole : 1,12E+09 Bq / -
Summe : 2,13E+10 Bq / -**Einzelnuclide - Freisetzungen / Lungenretentionsklasse**H 3 (HTO) 2,02E+10 Bq / -
C 14 (Dioxid) 2,26E+07 Bq / -
Ar 39 1,30E+06 Bq / -
Ca 41 3,20E+05 Bq / -
Fe 55 1,01E+08 Bq / -
Co 60 4,24E+07 Bq / -
Cs 137 8,50E+08 Bq / -
Eu 152 1,20E+08 Bq / -
Eu 154 2,60E+06 Bq / -
Am 241 7,70E+05 Bq / -**Größenspektrum der Aerosolpartikel (hinter Filter)**

Quelle 1

0 - 5 µm : 25 %
5 - 10 µm : 25 %
10 - 20 µm : 20 %
20 - 40 µm : 15 %
40 - 70 µm : 10 %
70 - 100 µm : 5 %**Eingabedaten Freisetzungshöhe**

Quelle 1

Höhe der Quelle : 5 m

Angaben zum GebäudeeinflussGebäudehöhe 10 m
Gebäudebreite 20 m

2023-03-21 Erdbeben FRG/HL

kritisches Organ, effektiv
Referenzperson: Kind 2-7 a
Diff.-kat. 0-8h: D

Exposition	Dosis [Sv]	Entf. [m]
Inhalation	3,35E-06	150
Gamma-Submersion	1,69E-09	150
Gamma-Boden	8,85E-03	150
Ingestion		
Blattgemüse	3,54E-05	150
sonst. Pflanzen	9,33E-04	150
Milch	5,47E-04	150
Fleisch	6,84E-04	150
Summe Ingestion	2,20E-03	
Summe Exposition	1,10E-02	

2022-12-13 FRG Beton Flugzeugabsturz

Angaben zur Quelle

Kraftwerk : HZG
Zahl der Freisetzungsterme : 1
Ausbreitungsfaktoren : Neuer Leitfaden (zeitabhängig)
Dosis Sd Inhalation nur aus Jodnukliden berechnen

Eingabedaten Aktivitätsfreisetzung

Quelle 1

Quellterm : Quellterm bekannt
Quelltermart : Aktivitätseingabe (nuklidspezifisch)
Freisetzungsdauer : 1 h

Freigesetzte Aktivität

Edelgase, H3, C14 : 2,02E+12 Bq
Jod : 0,00E+00 Bq
Aerosole : 7,02E+09 Bq
Summe : 2,03E+12 Bq

Einzelnuclide

H 3 (Wasser) 2,02E+12 Bq
C 14 (aeros) 2,26E+09 Bq
Fe 55 1,57E+09 Bq
Co 60 4,51E+08 Bq
Cs 137 5,00E+09 Bq

Größenspektrum der Aerosolpartikel (hinter Filter)

Quelle 1

0 - 5 µm : 25 %
5 - 10 µm : 25 %
10 - 20 µm : 20 %
20 - 40 µm : 15 %
40 - 70 µm : 10 %
70 - 100 µm : 5 %

Eingabedaten Meteorologie

Quelle 1

Windrichtung : 330 Grad
Windgeschwindigkeit : 1 m/s
Messhöhe : 0 m
Niederschlagsrate : 5 mm/h
Diffusionskategorie : A Labil

Eingabedaten Freisetzungshöhe

Quelle 1

Bauhöhe : 0 m
effektive Überhöhung : 50 m
effektive Freisetzungshöhe : 50 m

Angaben zur Quellhöhe

Bauhöhe : 0 m
mechanische Quellerhöhung : 0 m
thermische Quellerhöhung : 50 m

2022-12-13 FRG Beton Flugzeugabsturz**Maximale Dosiswerte der Expositionspfade in Bodennähe
Summe aller Quellen**

Expositionspfad	Kleinkind (1 - 2 a)			Erwachsener (>17 a)		
	Dosis mSv	Entf. m	Sektor	Dosis mSv	Entf. m	Sektor
Inhalation, eff.	8,23E-04	200	6	1,33E-03	200	6
Inhalation, Schilddr.	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-
-Boden, eff., (7d)	2,82E-03	200	6	1,88E-03	200	6
-Subm., eff.	6,76E-06	200	6	4,83E-06	200	6
externe Dosis, eff.	2,82E-03	200	6	1,88E-03	200	6
Summe Dosis, eff.	3,65E-03	200	6	3,22E-03	200	6

"-" bedeutet, dieser Wert wurde nicht berechnet

Inhalation Schilddrüse wird nur für Jodnuklide berechnet

2022-06-13 HL Mischabf. Flugzeugabsturz**Angaben zur Quelle**

Kraftwerk : HZG
Zahl der Freisetzungsterme : 1
Ausbreitungsfaktoren : Neuer Leitfaden (zeitabhängig)
Dosis Sd Inhalation nur aus Jodnukliden berechnen

Eingabedaten Aktivitätsfreisetzung**Quelle 1**

Quellterm : Quellterm bekannt
Quelltermart : Aktivitätseingabe (nuklidspezifisch)
Freisetzungsdauer : 1 h

Freigesetzte Aktivität

Edelgase, H3, C14 : 0,00E+00 Bq
Jod : 0,00E+00 Bq
Aerosole : 4,70E+10 Bq
Summe : 4,70E+10 Bq

Einzelnuclide

Co 60 4,70E+10 Bq

Größenspektrum der Aerosolpartikel (hinter Filter)**Quelle 1**

0 - 5 µm : 45 %
5 - 10 µm : 44 %
10 - 20 µm : 5 %
20 - 40 µm : 3 %
40 - 70 µm : 2 %
70 - 100 µm : 1 %

Eingabedaten Meteorologie**Quelle 1**

Windrichtung : 240 Grad
Windgeschwindigkeit : 1 m/s
Messhöhe : 0 m
Niederschlagsrate : 5 mm/h
Diffusionskategorie : A Labil

Eingabedaten Freisetzungshöhe**Quelle 1**

Bauhöhe : 0 m
effektive Überhöhung : 50 m
effektive Freisetzungshöhe : 50 m

Angaben zur Quelhöhe

Bauhöhe : 0 m
mechanische Quellerhöhung : 0 m
thermische Quellerhöhung : 50 m

2022-06-13 HL Mischabf. Flugzeugabsturz**Maximale Dosiswerte der Expositionspfade in Bodennähe
Summe aller Quellen**

Expositionspfad	Kleinkind (1 - 2 a)			Erwachsener (>17 a)		
	Dosis mSv	Entf. m	Sektor	Dosis mSv	Entf. m	Sektor
Inhalation, eff.	6,33E-03	200	3	9,88E-03	200	3
Inhalation, Schilddr.	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-
-Boden, eff., (7d)	2,10E-02	200	3	1,40E-02	200	3
-Subm., eff.	2,26E-04	200	3	1,61E-04	200	3
externe Dosis, eff.	2,12E-02	200	3	1,41E-02	200	3
Summe Dosis, eff.	2,75E-02	200	3	2,40E-02	200	3

"-" bedeutet, dieser Wert wurde nicht berechnet
Inhalation Schilddrüse wird nur für Jodnuklide berechnet

2022-06-13 HL TristanFlugzeugabsturz**Angaben zur Quelle**

Kraftwerk : HZG
Zahl der Freisetzungsterme : 1
Ausbreitungsfaktoren : Neuer Leitfaden (zeitabhängig)
Dosis Sd Inhalation nur aus Jodnukliden berechnen

Eingabedaten Aktivitätsfreisetzung**Quelle 1**

Quellterm : Quellterm bekannt
Quelltermart : Aktivitätseingabe (nuklidspezifisch)
Freisetzungsdauer : 1 h

Freigesetzte Aktivität

Edelgase, H3, C14 : 0,00E+00 Bq
Jod : 0,00E+00 Bq
Aerosole : 5,04E+11 Bq
Summe : 5,04E+11 Bq

Einzelnuclide

Sr 90 5,04E+11 Bq

Größenspektrum der Aerosolpartikel (hinter Filter)**Quelle 1**

0 - 5 µm : 16,7 %
5 - 10 µm : 16,6 %
10 - 20 µm : 40 %
20 - 40 µm : 20 %
40 - 70 µm : 6,7 %

Eingabedaten Meteorologie**Quelle 1**

Windrichtung : 240 Grad
Windgeschwindigkeit : 1 m/s
Messhöhe : 0 m
Niederschlagsrate : 5 mm/h
Diffusionskategorie : A Labil

Eingabedaten Freisetzungshöhe**Quelle 1**

Bauhöhe : 0 m
effektive Überhöhung : 50 m
effektive Freisetzungshöhe : 50 m

Angaben zur Quellhöhe

Bauhöhe : 0 m
mechanische Quellerhöhung : 0 m
thermische Quellerhöhung : 50 m

2022-06-13 HL TristanFlugzeugabsturz**Maximale Dosiswerte der Expositionspfade in Bodennähe
Summe aller Quellen**

Expositionspfad	Kleinkind (1 - 2 a)			Erwachsener (>17 a)		
	Dosis mSv	Entf. m	Sektor	Dosis mSv	Entf. m	Sektor
Inhalation, eff.	1,50E-01	200	3	2,60E-01	200	3
Inhalation, Schilddr.	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-
-Boden, eff., (7d)	-	-	-	-	-	-
-Subm., eff.	-	-	-	-	-	-
externe Dosis, eff.	-	-	-	-	-	-
Summe Dosis, eff.	1,50E-01	200	3	2,60E-01	200	3

"-" bedeutet, dieser Wert wurde nicht berechnet

Inhalation Schilddrüse wird nur für Jodnuklide berechnet

2022-06-13HL Cs-Präparat Flugzeugabsturz

Angaben zur Quelle

Kraftwerk : HZG
Zahl der Freisetzungsterme : 1
Ausbreitungsfaktoren : Neuer Leitfaden (zeitabhängig)
Dosis Sd Inhalation nur aus Jodnukliden berechnen

Eingabedaten Aktivitätsfreisetzung

Quelle 1

Quellterm : Quellterm bekannt
Quelltermart : Aktivitätseingabe (nuklidspezifisch)
Freisetzungsdauer : 1 h

Freigesetzte Aktivität

Edelgase, H3, C14 : 0,00E+00 Bq
Jod : 0,00E+00 Bq
Aerosole : 1,06E+10 Bq
Summe : 1,06E+10 Bq

Einzelnuclide

Cs 137 1,06E+10 Bq

Größenspektrum der Aerosolpartikel (hinter Filter)

Quelle 1

0 - 5 µm : 45 %
5 - 10 µm : 44 %
10 - 20 µm : 5 %
20 - 40 µm : 3 %
40 - 70 µm : 2 %
70 - 100 µm : 1 %

Eingabedaten Meteorologie

Quelle 1

Windrichtung : 240 Grad
Windgeschwindigkeit : 1 m/s
Messhöhe : 0 m
Niederschlagsrate : 5 mm/h
Diffusionskategorie : A Labil

Eingabedaten Freisetzungshöhe

Quelle 1

Bauhöhe : 0 m
effektive Überhöhung : 50 m
effektive Freisetzungshöhe : 50 m

Angaben zur Quelhöhe

Bauhöhe : 0 m
mechanische Quellerhöhung : 0 m
thermische Quellerhöhung : 50 m

2022-06-13HL Cs-Präparat Flugzeugabsturz**Maximale Dosiswerte der Expositionspfade in Bodennähe
Summe aller Quellen**

Expositionspfad	Kleinkind (1 - 2 a)			Erwachsener (>17 a)		
	Dosis mSv	Entf. m	Sektor	Dosis mSv	Entf. m	Sektor
Inhalation, eff.	1,66E-03	200	3	2,80E-03	200	3
Inhalation, Schilddr.	0,00E+00	-	-	0,00E+00	-	-
-Boden, eff., (7d)	1,09E-03	200	3	7,27E-04	200	3
-Subm., eff.	9,75E-06	200	3	6,96E-06	200	3
externe Dosis, eff.	1,10E-03	200	3	7,34E-04	200	3
Summe Dosis, eff.	2,76E-03	200	3	3,54E-03	200	3

"-" bedeutet, dieser Wert wurde nicht berechnet
Inhalation Schilddrüse wird nur für Jodnuklide berechnet

Anlage 2: Exposition von beruflich exponiertem Personal durch Lastabsturz

Für die Beurteilung der Anforderungen an die Hebezeuge in der FRG und dem HL ist gemäß KTA-Regel 3902 (Auslegung von Hebezeugen in Kernkraftwerken, Fassung 2020-12) die Folgedosis des beruflich exponierten Personals bei einem potentiellen abdeckenden Lastabsturz zu ermitteln. Für die Abschätzung der Folgedosis des Personals werden bei einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Raumluft die folgenden Parameter angenommen:

- Atemrate: 3,8E-04 m³/s /6/
- Inhalationsdauer: 60 s

Grundlage für die Ermittlung der Dosis sind die in /17/ hinterlegten Dosiskoeffizienten der zu betrachtenden Nuklide, die mit ihrem jeweiligen Aktivitätsanteil multipliziert und über alle betrachteten Nuklide aufsummiert werden. Konservativ wird für die Inhalationsdosis die Absorptionsklasse und chemische Form (H-3 und C-14) mit den höchsten Dosiskoeffizienten für beruflich exponiertes Personal verwendet.

Beiträge durch die störfallbedingte Direktstrahlung, aufgrund freigesetzter Schwebstoffe in die Anlagenatmosphäre, sind ca. 5 Größenordnungen kleiner als die Dosisbeiträge durch Inhalation und daher im Folgenden vernachlässigbar.

In Bezug auf Stahlgussbehälter kann eine dosisrelevante Freisetzung aufgrund der Transporthöhen über dem Boden (bis ca. 10 m) und der Behälterauslegung ausgeschlossen werden. Ebenso ergeben sich durch einen potentiellen Absturz keine dosisrelevanten Unterschiede durch externe Exposition (Gammastrahlung).

Innerhalb der Betonzellen 2–4 des HL erfolgen Transporte über die Manipulatoren (Schwerlastmanipulator). Dabei befindet sich kein Personal innerhalb der Betonzellen. Somit kann eine dosisrelevante Exposition ausgeschlossen werden. Der Abtransport der radioaktiven Stoffe aus den Betonzellen erfolgt wiederum in Stahlgussbehältern. Die Betonzellen sind außerdem ausreichend bezüglich einer externen Exposition ausgelegt.

Als abdeckender Fall wird daher der potentielle Absturz von aktiviertem Reaktorbeckenbeton beim Transport von der Reaktorhalle über eine Deckenöffnung in die Versuchshalle betrachtet.

Dabei wird einerseits die maximale Absturzhöhe (ca. 15 m) unterstellt und andererseits die Stoffarten mit den höchsten Freisetzungspotentialen berücksichtigt.

Als zu transportierendes Aktivitätsinventar und Aktivitätsfreisetzung werden die gleichen Annahmen wie in Kapitel 4.5.1 angesetzt. Auch für eine potentielle Absturzhöhe von bis zu 15 m ist der verwendete Freisetzunganteil immer noch konservativ. Vergleicht man diesen mit den Freisetzunganteilen der Transportstudie Konrad /12, 13/ sind die dort verwendeten Freisetzungsteile von $1,5E-04$ (AED 0 – 100 μm) für AGG 1/2 (Rohabfall) und BK 4 (Aufprallgeschwindigkeit $> 35 - \leq 80$ km/h, entspricht einer Höhe von ca. 25 m, ohne Brand) immer noch um mehr als eine Größenordnung geringer (ca. Faktor 40 geringer).

Bei dem potentiellen Lastabsturz wird die Freisetzung der in Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 (Spalte 4) angegebenen Aktivitäten innerhalb der Reaktor- bzw. alte Versuchshalle angenommen. Es wird weiterhin unterstellt, dass $\frac{1}{3}$ der in die Hallenatmosphäre freigesetzten Schwebstoffe gemäß Freisetzungverteilung /12, 13/ lungengängig (AED: 0 – 10 μm) sind.

Das innerhalb der Reaktorhalle bzw. alten Versuchshalle tätige Personal inhaliert bei der Flucht aus dem Gefahrenbereich ca. $2,0 E+04$ Bq (Normalbeton) bzw. ca. $3,0E+02$ Bq (Baryt-beton) der an lungengängigen Schwebstoff gebundenen radioaktiven Stoffe. Dabei wird die Verteilung der Schwebstoffe in einem Volumen von konservativ 500 m^3 (z. B. $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ in der Reaktorhalle) angenommen. Die resultierende Folgedosis (effektive Dosis) beträgt ca. $3,1 \mu\text{Sv}$ beim Absturz von Normalbeton und ca. $1,3 \mu\text{Sv}$ beim Absturz von Barytbeton. Die resultierende Folgedosis ist damit mehr als zwei Größenordnungen unterhalb des Kriteriums von 1 mSv zur Auslegung der „Hebezeuge mit zusätzlichen Anforderungen“.