

# Stresstest für die Nuklearfirma Eckert & Ziegler

BISS Braunschweig e.V.

01. November 2017

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Einführung	1
2. Methodisches Vorgehen	2
2.1 Nuklidvektor	2
2.2 Umgangsgenehmigung und Freisetzungsanteil	3
2.3 Ausbreitungsmodell	5
2.4 Wetterszenarien	8
3. Ergebnis	9
4. Fazit	11
Literaturverzeichnis	12
Anhang	13
A.1 Beispielrechnung (für Punkt 1 aus Abbildung 1)	14
A.2 Beispielrechnung (für Punkt 2 aus Abbildung 1)	15
A.3 Beispielrechnung (für Diffusionskategorie E)	16

# Zusammenfassung

Die Entsorgungskommission des Bundes (ESK) hat als ein Ergebnis ihres bundesweiten Stresstests für den Braunschweiger Nuklearstandort Eckert & Ziegler einen spezifischen Stresstest angemahnt. Da ein solcher von den zuständigen Behörden bislang nicht durchgeführt wurde, hat die Bürgerinitiative Strahlenschutz Braunschweig (BISS e.V.) entsprechende Berechnungen vorgenommen.

Die hier vorgelegten spezifischen Stresstest-Berechnungen für den Braunschweiger Standort folgen den Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (SSK). Sie berücksichtigen, dass die Umgangsgenehmigungen von Eckert & Ziegler für radioaktive Stoffe um ein Vielfaches über den generischen Annahmen der ESK-Stresstest-Untersuchungen liegen.

Unsere Untersuchungen betrachten das ESK-Stresstest-Szenario "Thermische Einwirkung" und kommen für den Braunschweiger Standort zu dem Fazit, dass bereits eine Freisetzung von lediglich 0,1 % des genehmigten Aktivitätsinventars (im ESK-Stresstest wurde ein weitaus höherer Freisetzunganteil angenommen) bei ungünstigen Wetterverhältnissen noch in 19 km Entfernung zu einer Überschreitung des Eingreifrichtwerts für die Evakuierung führen kann.

Dieser Eingreifrichtwert für die Evakuierung greift erst bei erheblichen radioaktiven Dosen, die zu einem deutlich erhöhten Krebsrisiko führen. Der hier durchgeführte Stresstest zeigt, dass der Eingreifrichtwert zum Teil um ein Vielfaches überschritten würde.

Die radioaktive Belastung resultiert in allen Szenarien in erster Linie aus der Inhalationsdosis. Eine rechtzeitige Evakuierung ist somit in der Nähe der Nuklearfirma nicht möglich. Auch die Evakuierung aus weiter entfernt liegenden Bereichen erscheint aufgrund des starken Wettereinflusses (u.a. Windrichtung und Windstärke) und der logistischen Anforderungen - wenn auf dem Gebiet der Großstadt Braunschweig mehrere 10.000 Menschen betroffen sind - fraglich.

## 1. Einführung

Die Entsorgungskommission des Bundes (ESK) hat 2013 einen Stresstest für Anlagen und Einrichtungen der Ver- und Entsorgung in Deutschland erstellt. In diesem „Teil 2“ wurden die Lager und stationären Konditionierungseinrichtungen für gering wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle einem Stresstest unterzogen (ESK 2013). Die ESK fasste Konditionierungsanlagen und Zwischenlager zusammen: *„Sowohl die Zwischenlager als auch die Konditionierungseinrichtungen für schwach- und mittlradioaktive Abfälle weisen im Hinblick auf mögliche Freisetzungen radioaktiver Stoffe bei auslegungsüberschreitenden Einwirkungen gemeinsame Eigenschaften auf.“* (vgl. ESK 2013, Seite 10).

Die ESK hat hierbei Anlagen berücksichtigt, die radioaktive Inventare aufweisen, bei denen das genehmigte radioaktive Inventar das 10-Millionen-Fache ( $10^7$ -Fache) der Freigrenzen (im Folgenden mit FG abgekürzt) für offene radioaktive Stoffe oder das 10-Milliarden-Fache ( $10^{10}$ -Fache) der Freigrenzen für umschlossene radioaktive Stoffe überschreiten (vgl. ESK 2013, Seite 5).

Aus dem generischen ESK-Stresstest ergeben sich Mindestabstände zur nächsten Wohnbebauung von 350 m (vgl. Kapitel 5.4.4.2 des ESK-Stresstests). Dieser Mindestabstand wird bei Eckert & Ziegler in Braunschweig aufgrund der engen räumlichen Nähe zur Wohnbebauung deutlich unterschritten.

Die ESK geht explizit auf den Braunschweiger Nuklearstandort ein: *„Am Standort Braunschweig betreibt die Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH Konditionierungseinrichtungen für radioaktive Abfälle. Diese Anlagen und Einrichtungen wurden in den ESK-Stresstest mit einbezogen. Am gleichen Standort werden durch die GE Healthcare Buchler GmbH & Co. KG aber auch Radiopharmaka in einer Einrichtung hergestellt, die – da sie keine Entsorgungsfunktion hat – nicht unter den ESK-Stresstest fällt. [Anmerkung: Auch die Firma Eckert & Ziegler geht außerhalb des radioaktiven Abfallgeschäfts in erheblichem Umfang mit radioaktiven Stoffen um.] Die Möglichkeit des Zusammenwirkens von Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus diesen Anlagen und Einrichtungen war daher von der ESK nicht zu untersuchen, sollte aber durch die zuständige Behörde betrachtet werden. [...] Dabei stellt sich die Frage, inwieweit ein Stressfall zu einer gleichzeitigen Einwirkung auf mehrere der am Ort vorhandenen Anlagen führen könnte, die insgesamt zu einer deutlich höheren Auswirkung führt als in den typisierten Rechnungen ermittelt wurde.“*

Die Notwendigkeit des spezifischen Stresstests für die Braunschweiger Nuklearfirma Eckert & Ziegler ergibt sich darüber hinaus aus den folgenden spezifischen Umständen:

- Das Öko-Institut (Küppers 2014) kommt für Eckert & Ziegler zu folgendem Fazit: *„Der Flughafen Braunschweig-Wolfsburg stellt ein besonderes Risiko im Hinblick auf einen Flugzeugabsturz auf Gebäude der Gewerbebetriebe am Standort Braunschweig-Thune und Freisetzungen von radioaktiven Stoffen dar.“*
- Sowohl das Gewerbeaufsichtsamt Braunschweig (GAA-BS 2012a) als auch die Rechtsanwälte Eckert & Ziegler (siehe Wollenteit 2015) haben unabhängig voneinander die Gefahr terroristischer Anschläge angesprochen.

## 2. Methodisches Vorgehen

### 2.1 Nuklidvektor

Die ESK hat in ihrem generischen Stresstest für Landessammelstellen und Zwischenlager / Konditionierungseinrichtungen einen Nuklidvektor aus 90 % Co-60 und 10 % Ra-226 angenommen (vgl. ESK 2013, Seite 16, Tab. 1).

Die Nuklearfirma Eckert & Ziegler in Braunschweig geht nach Auskunft des GAA Braunschweig mit einer großen Anzahl radioaktiver Stoffe um. Die Aktivitätsbilanz gibt für den 31.12.2011 170 Nuklide an (GAA-BS 2012b). Hiervon sind 163 Nuklide in ihren Aktivitätsbilanzen offen gelegt. Sieben weitere Nuklide werden nicht offen gelegt. Unter den 163 offen gelegten Nukliden weist Co-60 die zweithöchste Aktivitätsbilanz auf (hinter H-3), und Ra-226 stellt hier das Nuklid mit der vierthäufigsten Aktivität dar (hinter Pu-238).

**Da sowohl Co-60 als auch Ra-226 am Braunschweiger Standort Eckert & Ziegler in hohen Aktivitäten vorkommen, wurde hier derselbe Nuklidvektor wie im ESK-Stresstest angenommen.** Ein Nuklidvektor aus 90 % Co-60 und 10 % Ra-226 ist durch die Genehmigung gedeckt und daher auch prinzipiell möglich. Hierbei sei darauf hingewiesen, dass **auch Nuklidvektoren denkbar sind, die zu höheren Dosen führen** würden (z.B. wenn das am Standort vorhandene Am-241 berücksichtigt würde).

Aufgrund der langen Halbwertszeit (1600 Jahre für Ra-226 und 5,27 Jahre für Co-60) und des im allgemeinen kurzen Emissionszeitraumes (vgl. SSK 2013, S. 17, Kap. 4.4) sind Tochternuklide für den Stresstest nicht von Relevanz.

## 2.2 Umgangsgenehmigung und Freisetzunganteil

### Im ESK-Stresstest angenommenes Gesamtinventar

Die ESK geht in ihrem Stresstest für Anlagen der hier relevanten Gruppe II von einem Inventar bestehend aus 10.000 200-Liter-Fässern aus. Für diese Fässer wurde von der ESK ein Aktivitätsinventar von jeweils  $10^8$  Bq angenommen, wobei eine nicht näher benannte Anzahl „einzelner“ Fässer ein höheres Aktivitätsinventar von  $4 \cdot 10^{11}$  Bq aufweist (vgl. ESK 2013, S.15, Tab. 1).

Aufgrund des großen Unterschiedes in der Aktivität der Fässer mit mittlerem und hohem Aktivitätsinventar (4.000 Fässer mit mittlerem Inventar von je  $10^8$  Bq entsprechen in ihrer Aktivität einem Fass mit hohem Inventar von  $4 \cdot 10^{11}$  Bq) sind letztere für die Ermittlung der von der ESK angenommenen Gesamtaktivität entscheidend. Die Anzahl der insgesamt angenommenen Fässer mit hohem Aktivitätsinventar ist jedoch im Bericht der ESK nicht angegeben.

Allerdings gibt die ESK für das Szenario „Thermische Einwirkung“ an, dass 475 Fässer mit mittlerem Aktivitätsinventar (jeweils  $10^8$  Bq) und 25 Fässer mit hohem Aktivitätsinventar (jeweils  $4 \cdot 10^{11}$  Bq) als betroffen angenommen werden (vgl. ESK 2013, S. 19). Aufgrund der relativ großen Stichprobe (500 von 10.000 Fässern) kann vermutet werden, dass die ESK von einer statistisch repräsentativen Stichprobe ausgegangen ist (95 % Fässer mit mittlerem Inventar und 5 % Fässer mit hohem Inventar). Die Gesamtaktivität der 10.000 200-l-Fässer würde somit  $2,01 \cdot 10^{14}$  Becquerel betragen ( $9500 \text{ Fässer} \cdot 10^8 \text{ Bq} + 500 \text{ Fässer} \cdot 4 \cdot 10^{11} \text{ Bq} = 2,01 \cdot 10^{14} \text{ Bq}$ ).

Die tatsächlich von der ESK angenommene Gesamtaktivität beträgt mindestens  $1,1 \cdot 10^{13}$  Bq. Die ESK wäre dann in einem extrem konservativen Ansatz davon ausgegangen, dass unter den 10.000 Fässern insgesamt nur 25 Fässer mit hohem Aktivitätsinventar vorkommen und alle 25 Fässer im Stressfall zerstört werden ( $9975 \text{ Fässer} \cdot 10^8 \text{ Bq} + 25 \text{ Fässer} \cdot 4 \cdot 10^{11} \text{ Bq} = 1,1 \cdot 10^{13} \text{ Bq}$ ).

Die Gesamtaktivität kann nicht höher als die genannten  $2,01 \cdot 10^{14}$  Bq sein, da die ESK ansonsten für das genannte Szenario davon ausgegangen wäre, dass von den 500 betroffenen Fässern zufällig nur eine unterdurchschnittliche Anzahl der besonders kritischen Fässer mit hohem Aktivitätsinventar betroffen wären. Dies würde allen Regeln der konservativen Abschätzung widersprechen und ist auch nirgends benannt oder nahegelegt.

### In der vorliegenden Untersuchung angenommenes Gesamtinventar

Dem so ermittelten **von der ESK maximal angenommenen Gesamtinventar** von  $2,01 \cdot 10^{14}$  Bq steht in Braunschweig aufgrund der Umgangsgenehmigung Eckert & Zieglers ein genehmigtes auf dem Gelände lagerbares radioaktives Aktivitätsinventar von  $10^{10}$  FG (offen) und  $10^{13}$  FG (umgeschlossen) gegenüber. Die Ausnutzung dieser Freigrenzen durch verschiedenen Nuklide ist im Wesentlichen in das Belieben der Inhaberin der Genehmigung gestellt, die Aktivität pro Freigrenze für die Nuklide ist in der Anlage III der Strahlenschutzverordnung in Spalte 2 der Tabelle 1 definiert.

Für den oben definierten Nuklidvektor aus 90 % Co-60 zu 10 % Ra-226 ergibt sich mit der Freigrenze von  $10^5$  Bq für Co-60 und der Freigrenze von  $10^4$  Bq für Ra-226 eine **genehmigte Gesamtaktivität** von  $5 \cdot 10^{17}$  Bq (90 % Co-60:  $4,5 \cdot 10^{17}$  Bq und 10 % Ra-226:  $5 \cdot 10^{16}$  Bq).

### Freisetzunganteil im ESK-Stresstest

Für die Ermittlung der Folgen einer Freisetzung kommt es nicht nur auf die auf dem Gelände gelagerte bzw. dort genehmigte Gesamtaktivität an, sondern auch darauf, welcher Anteil davon tatsächlich freigesetzt wird.

Die ESK geht für das Szenario „Thermische Einwirkung“ von einem Brand von 5 Tonnen Kerosin nach einem Flugzeugabsturz mit einer Branddauer von 60 Minuten bei 600 °C aus (vgl. ESK 2013, S. 11), durch den insgesamt 500 von 10.000 200-l-Fässer beschädigt werden. Das entspricht einem Anteil von 5 % des Gesamtinventars. Die ESK nimmt weiterhin an, dass aus diesen beschädigten Fässern die Hälfte des radioaktiven Inventars freigesetzt wird. **Der von der ESK angenommene Freisetzunganteil beträgt somit 2,5 %<sup>1</sup> der Gesamtaktivität.** Entsprechend der 90-10-Verteilung von Co-60 zu Ra-226 geht die ESK in ihrem generischen Stresstest bei einer thermischen Einwirkung von einer Aktivitätsfreisetzung von insgesamt  $5,02 \cdot 10^{12}$  Bq aus,  $4,52 \cdot 10^{12}$  Bq für Co-60 und  $5 \cdot 10^{11}$  Bq für Ra-226 (vgl. ESK 2013, S. 19, Tab. 3).

### **Freisetzunganteil gemäß der vorliegenden Untersuchung**

Für eine Abschätzung einer für Braunschweig erwartbaren Freisetzung ist zunächst ein relevantes Schadensszenario zu bestimmen.

Für den Braunschweiger Standort „*besteht ein erhebliches Risiko durch unfallbedingte Flugzeugabstürze*“ (Becker 2015, vgl. auch Küppers 2014). Der Braunschweiger Flughafen ist weniger als 3 km entfernt und die Haupteinflugschneise, die auch von Flugzeugen der A-320-Klasse genutzt wird, führt in räumlicher Nähe an der Firma Eckert & Ziegler vorbei. Im Gegensatz zum ESK-Stresstest, der den Absturz einer relativ kleinen Militärmaschine und dabei nur den Brand von 5 Tonnen Kerosin ohne mechanische Einwirkung einerseits und den Einschlag einer Triebwerkswelle ohne Brand andererseits betrachtet hat (in dem Szenario „punktförmige mechanische Einwirkung“), ergeben sich durch den Absturz eines vollgetankten A-320 aufgrund der erheblich höheren Masse (ca. 77 t) größere mechanische und - aufgrund der wesentlich höheren Kerosinmengen (ca. 24 t) - auch größere thermische Einwirkungen. Hinzu kommt das am Standort genehmigte und vorhandene chemische Inventar mit seinen brennbaren Stoffen (u.a. die auf dem selben Betriebsgelände benachbarte Chemiefabrik Buchler mit erheblichen weiteren Brandlasten aus Methanol und Toluol; genehmigt sind ca. 78 t) sowie eine unterirdisch unmittelbar neben den Gebäuden verlaufende 70-bar-Gasleitung. Becker (2015) kommt daher zu dem Fazit, dass „*von einer längeren Branddauer und einem größeren von einem Brand betroffenen Bereich und so von einem höheren Anteil der von einem Brand betroffenen Fässer bzw. radioaktiven Inventare und so von höheren Freisetzungen auszugehen*“ ist.

Aufgrund der mechanischen Zerstörungen aus einem Absturz eines auf das Gelände stürzenden Großflugzeugs der Airbus-A-320-Klasse ist aufgrund der Spannweite von ca. 34 m und der Anordnung der Gebäude davon auszugehen, dass ein Großteil der auf dem Gelände gelagerten Gebinde mechanisch zerstört würde. Auch davon unabhängig besteht abweichend von den Annahmen der ESK die Gefahr, dass ein Großteil der auf dem Gelände vorhandenen Radioaktivität räumlich stark konzentriert gelagert wird und schon durch den Treffer einer einzigen Triebwerkswelle freigesetzt werden könnte. Hinzu kommt, dass die Effekte der mechanischen Einwirkung aus dem Flugzeugabsturz und die thermische Einwirkung aufgrund des nachfolgenden Brandes des mitgeführten Kerosins und ggf. der weiteren Brandlasten kombiniert aufträten, wobei der Brand auch auf bereits zerstörte oder zumindest vorgeschädigte Behälter einwirken würde.

**Aus den vorgenannten Gründen erscheint im hier relevanten Szenario eines Flugzeugabsturzes eines Großflugzeugs die Annahme eines Freisetzunganteils von wesentlich mehr als den von der ESK maximal angenommenen 2,5 % plausibel, wobei sich dieser höhere Freisetzung-**

---

<sup>1</sup> Der Freisetzunganteil ist noch höher, wenn die ESK davon ausgegangen ist, dass die Fässer mit höherem Aktivitätsinventar in den zerstörten Fässern überrepräsentiert sind (siehe Teilkapitel „Im ESK-Stresstest angenommenes Gesamtinventar“).

anteil zudem auf ein wesentlich höheres Inventar beziehen würde. Dies unterstreicht auch die Experten-Einschätzung, dass ein „*ein signifikantes Risiko durch einen Terroranschlag*“ besteht (Becker 2015; siehe auch entsprechende Zitate des Braunschweiger GAA oder der Rechtsanwälte Eckert & Ziegler im Literaturverzeichnis), da befürchtet werden muss, dass Terroristen gezielt eine möglichst umfangreiche Freisetzung radioaktiver Stoffe erzwingen wollen.

Um trotz der Plausibilität von mehr als 2,5 % Freisetzunganteil Annahmen mit zu hohen Freisetzungsmengen auszuschließen, haben wir im Folgenden nicht einen im Vergleich zur ESK höheren Freisetzunganteil betrachtet, sondern zwei Szenarien mit **deutlich geringerem Freisetzunganteil von lediglich 0,1 % bzw. 1 %** des genehmigten Aktivitätsinventars.

Da die Genehmigung weitaus höhere Gesamtaktivitäten zulässt als im Stresstest angenommen, ergibt sich hier bei einer Freisetzung von 0,1 % der Umgangsgenehmigung eine Aktivitätsfreisetzung von  $4,5 \cdot 10^{14}$  Bq für Co-60 und  $5 \cdot 10^{13}$  Bq für Ra-226. Die freigesetzte Aktivität liegt also - wenn lediglich 0,1 % der Umgangsgenehmigung freigesetzt werden - um den Faktor 100 über den generischen ESK-Annahmen. Bei einer Freisetzung von 1 % der Umgangsgenehmigung liegt die freigesetzte Aktivität bei  $4,5 \cdot 10^{15}$  Bq für Co-60 und  $5 \cdot 10^{14}$  Bq für Ra-226 und damit um den Faktor 1.000 über den generischen Stresstest-Annahmen der ESK.

### Zur Bedeutung der Wahl des prozentualen Freisetzunganteils:

Der Wahl des Freisetzunganteils kommt für die weitere Berechnung eine entscheidende Bedeutung zu, da die weiteren Rechenschritte auf Basis dieses Eingangsparameters standardisiert erfolgen (siehe unten: 2.3 Ausbreitungsmodell und 2.4 Wetterszenarien).

Die beiden Freisetzungsszenarien von 0,1 % und 1 % sind zudem gut geeignet, um die Auswirkungen einer Reduktion der Umgangsgenehmigung von Eckert & Ziegler zu vergleichen. Beispielsweise würden die Ergebnisse der 0,1-Prozent-Berechnung nach einer fiktiven Verringerung der Umgangsgenehmigung um 90 % die Folgen einer Freisetzung von 1 % beschreiben.

## 2.3 Ausbreitungsmodell

Die Strahlendosis wird basierend auf den Störfallberechnungsgrundlagen der Strahlenschutzkommission (vgl. SSK 2003) und dem Katastrophenschutz-Leitfaden (vgl. SSK 2004) berechnet.

Analog zum ESK-Stresstest (vgl. ESK 2013 S. 26) wird unterstellt, dass die Aktivitätsfreisetzung vollständig innerhalb von 8 Stunden erfolgt.

Die Ausbreitung der freigesetzten Nuklide wird nach den Vorgaben der SSK berechnet. Die in diesem Zusammenhang relevanten Faktoren - Ausbreitungsfaktor ( $\chi$ ), Falloutfaktor ( $F$ ) und Washoutfaktor ( $W$ ) - hängen vom betrachteten Aufpunkt bzw. dessen Aufpunktkoordinaten ab.

$$\chi = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \sigma_{z,j}(x) \cdot \bar{u}} \cdot \exp\left(-\frac{h_{\text{eff}}^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}\right) \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_{y,j}^2(x)}\right) \quad (\text{SSK 2003, S. 18, 4.17})$$

$$F = \nu_g \cdot \chi \quad (\text{SSK 2003, S. 19, 4.21})$$

$$W = \frac{\Lambda}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \bar{u}} \quad (\text{SSK 2003, S. 20, 4.22})$$

mit

$x$  : Quelledistanz in [m]

$y$  : Aufpunktabstand quer zur Hauptwindzugrichtung in [m]

$h_{eff}$  : Freisetzungshöhe, hier:  $h_{eff} = 50$  [m] (SSK 2003, S. 33; ESK 2013, S. 24)

$\sigma_{y,j}(x)$  : Horizontaler Ausbreitungsparameter für jeweiligen Aufpunkt (SSK 2003, S. 33)  
 $\sigma_{y,j}(x) = p_{y,j} \cdot x^{q_{y,j}}$  [m]

$\sigma_{z,j}(x)$  : Vertikaler Ausbreitungsparameter für jeweiligen Aufpunkt (SSK 2003, S. 33)  
 $\sigma_{z,j}(x) = p_{z,j} \cdot x^{q_{z,j}}$  [m]

$p_y$  und  $q_y$  sowie  $p_z$  und  $q_z$  sind abhängig von der effektiven Emissionshöhe (hier, analog zur ESK-Betrachtung, 50 m) und der Diffusionskategorie:

Diffusions- kategorie	Ausbreitungskoeffizient bzw. Ausbreitungsexponent			
	$p_y$	$q_y$	$p_z$	$q_z$
E	$p_{y,E} = 0,801$	$q_{y,E} = 0,754$	$p_{z,E} = 0,264$	$q_{z,E} = 0,774$
F	$p_{y,F} = 1,294$	$q_{y,F} = 0,718$	$p_{z,F} = 0,241$	$q_{z,F} = 0,662$

$\bar{u}$  : Mittlere Windgeschwindigkeit in Freisetzungshöhe  $> 10$  m (SSK 2003, S. 32)  
mit Windgeschwindigkeit  $u_1 = 1$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] und Bezugshöhe  $z_1 = 10$  [m]

$$\bar{u} = u_1 \cdot \left( \frac{h_{eff}}{z_1} \right)^m = 1 \cdot \left( \frac{50}{10} \right)^m \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{SSK 2003, S. 32})$$

$m = 0,37$  (für Diffusionskategorie E) und  $m = 0,42$  (für Diffusionskategorie E)

$v_g$  : Ablagerungsgeschwindigkeit für Schwebstoffe  
 $v_g = 1,5 \cdot 10^{-3}$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] (SSK 2003, S. 35, Tab. 1)

$\Lambda$  : Washoutkoeffizient in [ $s^{-1}$ ] (SSK 2003, S. 20, 4.23)

$$\Lambda = \Lambda_0 \cdot \left( \frac{I}{I_0} \right)^\kappa = 7 \cdot 10^{-5} \left( \frac{5}{1} \right)^{0,8} \simeq 2,54 \cdot 10^{-4} \quad [\text{s}^{-1}]$$

$\Lambda_0 = 7 \cdot 10^{-5}$  [ $s^{-1}$ ] (SSK 2003, S. 35, Tab. 3)

$I_0 = 1$  [ $mm \cdot h^{-1}$ ] Niederschlagsmenge (SSK 2003, S. 20)

$I = 5$  [ $mm \cdot h^{-1}$ ] Niederschlagsintensität in 0-8 h (SSK 2003, S. 35, Tab. 2)

$\kappa = 0,8$  Exponent für Schwebstoffe und Iod (SSK 2003, S. 20)

Die Strahlendosis in den ersten sieben Tagen wird vereinfachend nur als Summe von Gamma-Bodenstrahlung und inhalierter Dosis angenommen. Weitere Strahlendosen ergäben sich aus den hier nicht berücksichtigten Expositionen infolge von Submersion, Direktstrahlung und Ingestion.

Die effektive **Strahlendosis durch Gamma-Bodenstrahlung** in sieben Tagen  $H_{b,r}^{\text{eff.}}$  [ $mSv$ ] ergibt sich für Erwachsene nach der SSK (2004) für jedes Nuklid  $r$  mit der Formel:

$$H_{b,r}^{\text{eff.}} = \frac{1 - e^{(-\lambda_r \cdot 604800)}}{\lambda_r} \cdot g_{b,r}^{>17a} \cdot (F + W) \cdot Q_r \quad (\text{SSK 2004, S. 29ff.})$$

Der Korrekturfaktor für die Bodenrauhigkeit  $b$  entfällt, da nur ein Zeitraum kurz nach der Ablagerung betrachtet wird (vgl. SSK, 2004, S. 29: „ $b$  wird hier mit wegen der Kürze der zunächst zu betrachtenden Expositionszeit (typisch 7d) mit 1 angesetzt.“).

mit

$\lambda_r$  : Zerfallskonstante des Nuklids  $r$  [ $s^{-1}$ ]

$g_{b,r}^{>17a}$  : Dosiskoeffizient für Gamma-Bodenstrahlung [ $mSv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$ ]  
für Erwachsene  
 $g_{h,Co-60}^{>17a} = 2,2 \cdot 10^{-12}$  und  $g_{h,Ra-226}^{>17a} = 1,6 \cdot 10^{-12}$  (Bundesanzeiger 2001)

$F$  : Falloutfaktor (Ermittlung siehe oben) [ $m^2$ ]

$W$  : Washoutfaktor (Ermittlung siehe oben) [ $m^{-2}$ ]

$Q_r$  : Freigesetzte Aktivität des Nuklids  $r$  (siehe Kapitel 2.2) [ $Bq$ ]

Die effektive **Strahlen(folge)dosis durch Inhalation**  $H_{h,r}^{\text{eff.}}$  [ $mSv$ ] ergibt sich nach der SSK (2003) für Erwachsene für jedes Nuklid  $r$  mit der Formel:

$$H_{h,r}^{\text{eff.}} = \chi \cdot \dot{V} \cdot g_{h,r}^{>17a} \cdot Q_r \quad (\text{SSK 2003, S. 11, 4.10})$$

mit

$\chi$  : Ausbreitungsfaktor (Ermittlung siehe nächste Seite) [ $s \cdot m^{-3}$ ]

$\dot{V}$  : Atemrate für Erwachsene für das Zeitintervall 0-8 h [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]  
 $\dot{V} = 3,8 \cdot 10^{-4}$  (SSK 2003, S. 26, Tab. 3)

$g_{h,r}^{>17a}$  : Dosiskoeffizient für Inhalation für Erwachsene [ $mSv \cdot Bq^{-1}$ ]  
 $g_{h,Co-60}^{>17a} = 3,1 \cdot 10^{-5}$  und  $g_{h,Ra-226}^{>17a} = 9,5 \cdot 10^{-3}$  (Bundesanzeiger 2001)

$Q_r$  : Freigesetzte Aktivität des Nuklids  $r$  [ $Bq$ ]

Die betrachtete **effektive Gesamtstrahlendosis**  $H^{\text{eff}}$  ergibt sich durch die Gamma-Bodenstrahlung der einzelnen Nuklide ( $H_{\text{b,r}}^{\text{eff}}$ ) sowie durch die Strahlen(folge)dosis, die sich durch die Inhalation der freigesetzten Nuklide ergibt ( $H_{\text{h,r}}^{\text{eff}}$ ). „Trockene Ablagerung, Washout und radioaktiver Zerfall vermindern die Menge der Aktivität der radioaktiven Stoffe in der Wolke“ (SSK 2003, S. 18). Daher sind die Korrekturfaktoren  $f_A$ ,  $f_B$  und  $f_Z$  notwendig.

$$H^{\text{eff}} = \sum_r \left( H_{\text{b,r}}^{\text{eff}} + H_{\text{h,r}}^{\text{eff}} \right) \cdot f_A \cdot f_R \cdot f_Z \quad (\text{SSK 2004})$$

mit

$f_A$  : Korrekturfaktor für durch trockene Ablagerung reduzierte Aktivität: (SSK 2003, S. 18, 4.18)

$$f_A = \exp \left( -\frac{v_g}{\bar{u}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^x \frac{\exp \frac{h_{\text{eff}}^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}}{\sigma_{z,j}(x)} dx \right)$$

$f_R$  : Korrekturfaktor für durch Washout reduzierte Aktivität: (SSK 2003, S. 18, 4.19)

$$f_R = \exp \left( -\frac{\Lambda \cdot x}{\bar{u}} \right)$$

$f_Z$  : Der Korrekturfaktor für den radioaktiven Zerfall ist (SSK 2003, S. 19, 4.20) aufgrund der kurzen Zeitspanne (0-8 h) und der langen Halbwertszeit (1600 Jahre für Ra-226 und 5,27 Jahre für Co-60) vernachlässigbar.

$$f_Z = \exp \left( -\frac{\lambda_r \cdot x}{\bar{u}} \right)$$

Für die maximal betrachtete Entfernung (20.000 m) - und somit den  $f_Z$ -Wert mit der theoretisch größten Abweichung von 1 - ergibt sich sowohl für Ra-226 als auch für Co-60 bei einer Rundung auf vier Nachkommastellen:  $f_Z = 1,0000$ .

## 2.4 Wetterszenarien

In Kapitel 3 (Ergebnis) werden die Stresstest-Ergebnisse für die folgenden zwei von der SSK berücksichtigten Wetterszenarien betrachtet:

I. **Niederschlag bei stabiler Temperaturschichtung** (Diffusionskategorie E; vgl. SSK 2003)

II. **Stabile Temperaturschichtung ohne Niederschlag** (Diffusionskategorie F; vgl. SSK 2003)

Bei diesem Wetterszenario entfallen aufgrund der fehlenden Niederschläge die mit Niederschlägen zusammenhängenden Parameter: der Washoutfaktor  $W$  und der Korrekturfaktor  $f_R$  für durch Washout reduzierte Aktivität.

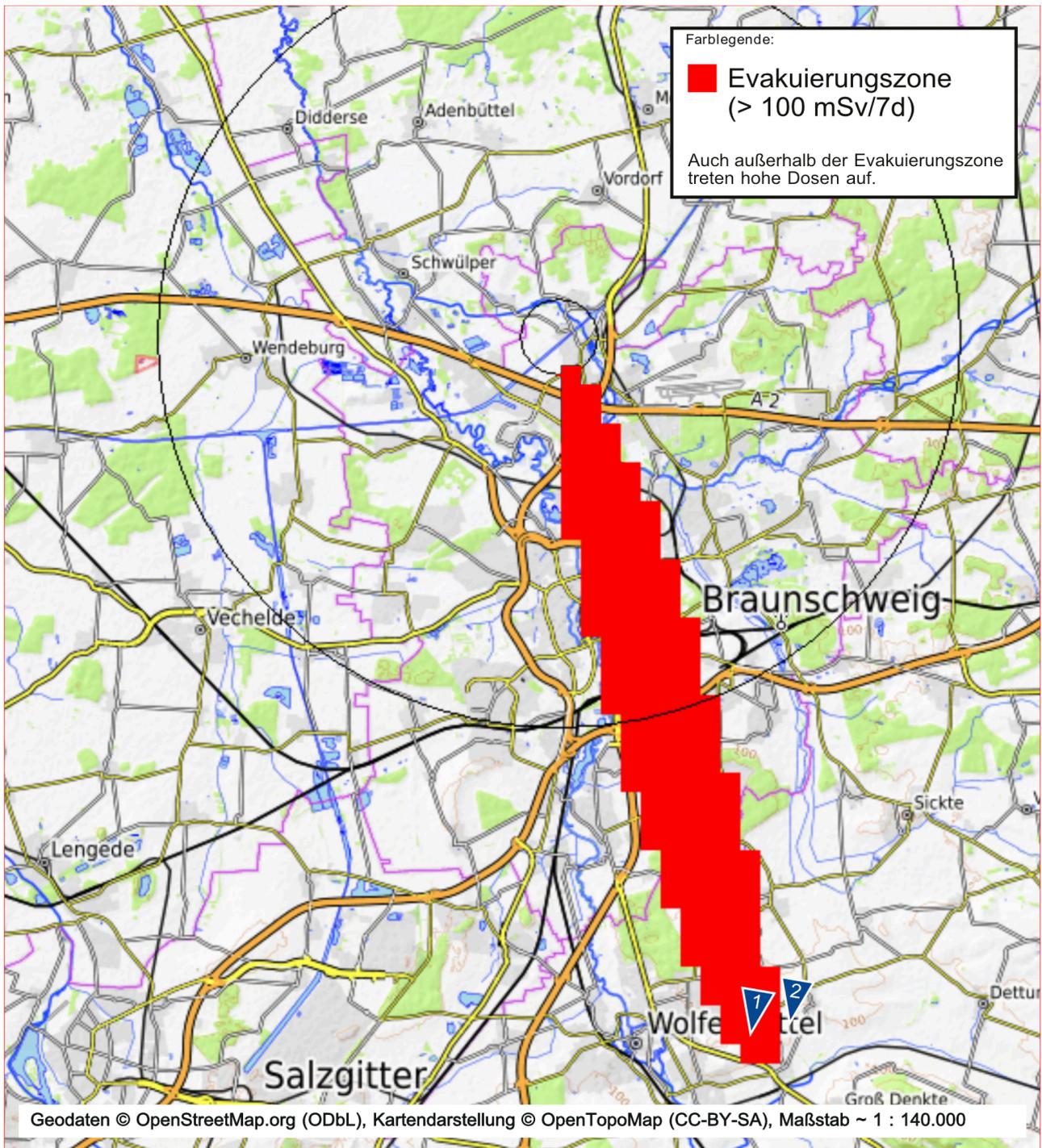
### 3. Ergebnis

Das hier verwendete Ausbreitungsmodell wurde unter Zugrundelegung eines mit dem ESK-Stresstest identischen Nuklidvektors, aber eines Freisetzunganteils von 0,1 % bzw. 1 % der Umgangsgenehmigung Eckert & Zieglers betrachtet. Da die Genehmigung weitaus höhere Gesamtaktivitäten zulässt als im ESK-Stresstest betrachtet wurden, liegt die freigesetzte Aktivität um den Faktor 100 (wenn lediglich 0,1 % der Umgangsgenehmigung freigesetzt werden) über den generischen ESK-Annahmen (bzw. um den Faktor 1000 bei Freisetzung von 1 % der Umgangsgenehmigung). Entsprechend sind auch die radioaktiven Belastungen weitaus gravierender (siehe Tabelle 2 und Abbildung 1).

**Tabelle 2:** Effektive Dosis [mSv/7d] in Hauptwindrichtung bei einer Aktivitätsfreisetzung von 0,1 % bzw. 1 % der Umgangsgenehmigung Eckert & Zieglers mit einem Nuklidvektor aus 90 % Co-60 und 10 % Ra-226.

Abstand	Effektive Dosis [mSv / 7d] bei 0,1 % Aktivitätsfreisetzung		Effektive Dosis [mSv / 7d] bei 1 % Aktivitätsfreisetzung	
	mit Niederschlag	ohne Niederschlag	mit Niederschlag	ohne Niederschlag
500 m	3687	58	36867	584
1000 m	2539*	707	25395	7071
2000 m	1020	1073	10196	10730
3000 m	522	891	5217	8911
4000 m	308	705	3075	7048
5000 m	197	565	1973	5649
6000 m	134	463	1339	4626
7000 m	94	387	945	3866
8000 m	69	329	686	3288
9000 m	51	284	509	2839
10000 m	38	248	385	2482
11000 m	29	219	295	2194
12000 m	23	196	229	1957
13000 m	18	176	179	1759
14000 m	14	159	141	1593
15000 m	11	145	113	1451
16000 m	9	133	90	1329
17000 m	7	122	72	1223
18000 m	6	113	59	1130
19000 m	5	105*	48	1049
20000 m	4	98	39	977

\* Siehe beispielhafte Berechnungen im Anhang.



**Abbildung 1:** Bei einer Freisetzung von 0,1 % der Umgangsgenehmigung und einem Nuklidvektor aus 90 % Co-60 und 10 % Ra-226 wird noch in 19 km Entfernung der Eingreifrichtwert für die Evakuierung überschritten. Beispielhaft wird im Anhang die Berechnung für die Markierungen 1 und 2 dargestellt (siehe A.1 und A.2). Das Ergebnis der Darstellung basiert auf einer Freisetzungshöhe von 50 m (analog zum ESK-Stresstest, vgl. dort S. 24), der Diffusionskategorie F (vgl. SSK 2003) und einer Windrichtung in Richtung Braunschweiger Innenstadt. Die Belastung basiert in erster Linie auf der Inhalation von Ra-226 (siehe Beispielrechnungen im Anhang A.1 bis A.3).

## 4. Fazit

Das Ergebnis des spezifischen Stresstests zeigt, dass bei einem Nuklidvektor aus 90 % Co-60 und 10 % Ra-226 bereits eine Freisetzung von 0,1 % der Umgangsgenehmigung zu erheblichen Strahlendosen führen würde.

*„Für das strahlenbedingte Leukämie- und Krebsrisiko gibt es keine Schwellendosis. [...] Mit zunehmender Dosis erhöht sich das Erkrankungsrisiko“ (BfS 2017).*

Bei einer Strahlendosis von 100 mSv, dem Eingreifrichtwert für die Evakuierung, entwickelt sich im Schnitt bei einer von 100 betroffenen Personen Krebs von der jede zweite Erkrankung tödlich endet (vgl. BfS 2017). Dieses Krebsrisiko besteht bei einer Freisetzung von 0,1 % des genehmigten Inventars bei trockener Witterung (Diffusionskategorie F, vgl. SSK 2013) noch in 19 km Entfernung.

Durch Niederschläge verringert sich der Abstand, in dem der Eingreifrichtwert für die Evakuierung überschritten wird, auf eine Entfernung von 6 km (bei Freisetzung von 0,1 % der Umgangsgenehmigung) bzw. 15 km (bei Freisetzung von 1 % der Umgangsgenehmigung) (siehe Tabelle 2). Dies führt jedoch auch dazu, dass die radioaktiven Belastungen in geringerer Entfernung drastisch ansteigen: Selbst bei einer Freisetzung von lediglich 0,1 % der Umgangsgenehmigung würde bei stabiler Temperaturschichtung mit Niederschlag im Abstand von bis zu 1000 m in der Hauptwindrichtung bei über 25 % der exponierten Personen Krebs induziert.

In zwei Kilometern Entfernung ist die Bevölkerung in beiden Wetterszenarien - bei einer Freisetzung von lediglich 0,1 % der Umgangsgenehmigung - einer so hohen Belastung ausgesetzt, dass in der Hauptwindrichtung im Schnitt bei einer von zehn Personen Krebs induziert wird.

Bei einer Freisetzung von einem Prozent der Umgangsgenehmigung ist die Strahlendosis in beiden Szenarien in der Hauptwindrichtung in 2 km Entfernung so hoch, dass es statistisch bei jeder(!) Person, die die freigesetzten radioaktiven Stoffe inhaliert, zur Ausbildung einer Krebs-Erkrankung kommt (siehe Tabelle 2). Bei einer Freisetzung von 1 % der Umgangsgenehmigung wird bei trockener Witterung in der Hauptwindrichtung selbst in 19 km Entfernung bei einer von zehn betroffenen Personen Krebs induziert.

Die radioaktive Belastung resultiert in allen Szenarien in erster Linie aus der Inhalationsdosis (siehe Anhang: Beispielrechnungen). Eine rechtzeitige Evakuierung ist somit in der Nähe der Nuklearfirma nicht möglich. Auch die Evakuierung aus weiter entfernt liegenden Bereichen erscheint aufgrund des starken Wittereinflusses (u.a. Windrichtung und Windstärke) und der logistischen Anforderungen - wenn die Großstadt Braunschweig mit mehreren 10.000 Menschen betroffen ist - fraglich.

# Literaturverzeichnis

Becker, O. (2015): Risiko des Betriebs von Eckert & Ziegler Nuclitec (EZN), neben Wohnhäusern und Schulen. - Kurzstellungnahme im Auftrag der BISS.

BfS (2017): Ionisierende Strahlung: Krebs und Leukämie. <http://www.bfs.de/DE/themen/ion/wirkung/krebs/einfuehrung/einfuehrung.html>. Stand 21.03.2017 [retrieved: 02.09.2017 20:45]

Bundesanzeiger (2001): Zusammenstellung der Dosiskoeffizienten bei äußerer und innerer Strahlenexposition. - Die Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten erfolgte in der Beilage 160 a und b zum Bundesanzeiger vom 28. August 2001 [vgl. <http://www.bfe.bund.de/DE/bfe/gesetze-regelungen/dosiskoeffizienten/dosiskoeffizienten.html>]

ESK (2013): ESK-Stresstest für Anlagen und Einrichtungen der Ver- und Entsorgung in Deutschland Teil 2. Stellungnahme der Entsorgungskommission, revidierte Fassung vom 18.10.2013, <http://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/snstresstestteil2rev18102013.pdf> [retrieved: 03.08.2017 20:06]

GAA-BS (2012a): Abschließende Anhörung zu Ihrem Antrag auf Umweltinformationen zur Fa. Eckert & Ziegler Nuclitec. - Schreiben vom 10.02.2012, Aktenzeichen: BS001129836, Anhörung BISS und EZN. - Hier finden sich die folgenden beiden Zitate:

*„Eine Veröffentlichung der Inventarliste, besonders im Internet, würde die Gefahr von Anschlägen und von Diebstahls- und Erpressungsversuchen hinsichtlich der auf dem Firmengelände lagernden radioaktiven Stoffe erhöhen.(...)“*

*„Das Bundesamt für Strahlenschutz fordert eine Verstärkung der Prävention und polizeilichen Arbeit gegen den missbräuchlichen Einsatz radioaktiver Quellen, die beispielsweise für die Herstellung von „Schmutzigen Bomben“ verwendet werden könnten. Dieses schwerwiegende Anliegen der öffentlichen Sicherheit würde unterlaufen, wenn Behörden es aus dem Gesichtspunkt der Einsichtnahme in Umweltinformationen zuließen, dass Betriebsstandorte und Inventarlisten zu radioaktivem Material veröffentlicht werden.“*

GAA-BS (2012b): Ergänzender Widerspruchsbescheid vom 14.09.2012, Anlage 1. - Aktenzeichen: BS001129836-no. (Aktivitätsbilanz der Fa. Eckert & Ziegler Nuclitec zum 31.12.2011).

Küppers, A. (2014): Restrisiko beim Umgang mit radioaktiven Stoffen durch die Gewerbebetriebe im Bereich des geplanten Bebauungsplans „Gieselweg/Harxbüttler Straße“. - Stellungnahme im Auftrag der Stadt Braunschweig

SSK (2003) Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV — Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition. [http://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse\\_PDF/2003/Kap4\\_Stoerfallberechnungsgrundlage.html?nn=2041716](http://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2003/Kap4_Stoerfallberechnungsgrundlage.html?nn=2041716). [retrieved: 03.08.2017 20:11]

SSK (2004) Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen. Strahlenschutzkommission, 2004 ( Heft 37). – ISBN 3–437–22178–7

Wollenteit, U. (2015): Antrag auf Widerruf der Strahlenschutzgenehmigung für die Firma Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH. - Hier werden die Bevollmächtigten der Fa. Eckert & Ziegler zitiert, u.a.:

*„Immer wieder wird in den Medien darüber berichtet, dass terroristische Anschläge insbesondere im Zusammenhang mit Einrichtungen drohen können, die mit radioaktivem Material zu tun haben.*

*(...) Neben die ohne weiteres bestehende allgemeine terroristische Gefährdungssituation tritt damit eine besondere, die aus der spezifischen Tätigkeit unserer Mandantin erwächst. Damit wird die ohnehin bestehende Gefährdungslage weiter verschärft. Nicht zuletzt infolge der terroristischen Anschläge in Paris und Tunis dürfte letztlich nicht ernsthaft von der Hand zu weisen sein, dass terroristische Aktivitäten auch auf Deutschland gerichtet sind. (...)“*

# Anhang

Aus Transparenzgründen ist nachfolgend für drei Beispielpunkte die Berechnung der effektiven Dosen dargestellt.

Hierbei werden Dezimalzahlen mit mehr als drei Nachkommastellen aus Darstellungsgründen gerundet dargestellt. Sobald gerundete Werte dargestellt werden, wird statt dem Gleichheitszeichen das  $\simeq$  Zeichen eingesetzt.

Im Folgenden werden die gerundeten und nicht gerundeten Werte der Beispielrechnungen aufgelistet.

$$\bar{u}_{\text{Diffusionskategorie E}} = u_1 \cdot \left( \frac{h_{\text{eff}}}{z_1} \right)^m = 1 \cdot \left( \frac{50}{10} \right)^{0,37} = 1,81392322572123 \simeq 1,81 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$\bar{u}_{\text{Diffusionskategorie F}} = u_1 \cdot \left( \frac{h_{\text{eff}}}{z_1} \right)^m = 1 \cdot \left( \frac{50}{10} \right)^{0,42} = 1,96592706569667 \simeq 1,97 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

$$\sigma_{y,F}(19000) = p_{y,F} \cdot x^{q_{y,F}} = 1,294 \cdot 19000^{0,718} = 1527,84522709716 \simeq 1528 \text{ [m]}$$

$$\sigma_{z,F}(19000) = p_{z,F} \cdot x^{q_{z,F}} = 0,241 \cdot 19000^{0,662} = 163,889800435717 \simeq 164 \text{ [m]}$$

$$\sigma_{y,E}(1000) = p_{y,E} \cdot x^{q_{y,E}} = 0,801 \cdot 1000^{0,754} = 146,430827313034 \simeq 146 \text{ [m]}$$

$$\sigma_{z,E}(1000) = p_{z,E} \cdot x^{q_{z,E}} = 0,264 \cdot 1000^{0,774} = 55,412012927661 \simeq 55 \text{ [m]}$$

$$\chi_{\text{Beispiel-Rechnung A.1}} = 6,17220458785585 \cdot 10^{-7} \simeq 6,17 \cdot 10^{-7} \text{ [s} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$$F_{\text{Beispiel-Rechnung A.1}} = 9,25830688178378 \cdot 10^{-10} \simeq 9,26 \cdot 10^{-10} \text{ [m}^{-2}\text{]}$$

$$\chi_{\text{Beispiel-Rechnung A.2}} = 4,98214299621294 \cdot 10^{-7} \simeq 4,98 \cdot 10^{-7} \text{ [s} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$$F_{\text{Beispiel-Rechnung A.2}} = 7,47321449431941 \cdot 10^{-10} \simeq 7,47 \cdot 10^{-10} \text{ [m}^{-2}\text{]}$$

$$\chi_{\text{Beispiel-Rechnung A.3}} = 1,43943834926935 \cdot 10^{-5} \simeq 1,44 \cdot 10^{-5} \text{ [s} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$$F_{\text{Beispiel-Rechnung A.3}} = 2,15915752390402 \cdot 10^{-8} \simeq 2,16 \cdot 10^{-8} \text{ [m}^{-2}\text{]}$$

$$W_{\text{Beispielrechnung A.3}} = 3,81006769137792 \cdot 10^{-7} \simeq 3,81 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^{-2}\text{]}$$

Die in Kapitel 3 dargestellten Ergebnisse (siehe Tabelle 2 und Abbildung 1) basieren auf den Berechnungen nicht gerundeter Werte.

## A.1 Beispielrechnung (für Punkt 1 aus Abbildung 1)

Freisetzung 0,1 %; kein Niederschlag (Diffusionskategorie F); 19 km Entfernung;  $y = 0$  km

$$\sigma_{y,F}(19000) : \text{Horizontaler Ausbreitungsparameter für jeweiligen Aufpunkt} \quad (\text{SSK 2003, S.33})$$

$$\sigma_{y,F}(19000) = p_{y,F} \cdot x^{q_{y,F}} = 1,294 \cdot 19000^{0,718} \simeq 1528 \text{ [m]}$$

$$\sigma_{z,F}(19000) : \text{Vertikaler Ausbreitungsparameter für jeweiligen Aufpunkt} \quad (\text{SSK 2003, S.33})$$

$$\sigma_{z,F}(19000) = p_{z,F} \cdot x^{q_{z,F}} = 0,241 \cdot 19000^{0,662} \simeq 164 \text{ [m]}$$

$$\chi = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot \bar{u}} \cdot \exp\left(-\frac{h_{\text{eff}}^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right) \quad (\text{SSK 2003, S. 18, 4.17})$$

$$\chi \simeq \frac{1}{\pi \cdot 1528 \cdot 164 \cdot 1,97} \cdot \exp\left(-\frac{50^2}{2 \cdot 164^2}\right) \cdot \exp(0) \simeq 6,17 \cdot 10^{-7} \text{ [s} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$$F = \nu_g \cdot \chi \simeq 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 6,17 \cdot 10^{-7} \simeq 9,26 \cdot 10^{-10} \text{ [m}^{-2}\text{]}$$

$$W = 0 \text{ und } f_R = 1 \quad (\text{da kein Niederschlag vorhanden ist})$$

$$f_A = \exp\left(-\frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{1,97} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^{19000} \frac{\exp\left(-\frac{50^2}{2 \cdot (0,241x^{0,662})^2}\right)}{0,241x^{0,662}} dx\right) \simeq 0,910009$$

**Effektive Strahlendosis durch Gamma-Bodenstrahlung:**

$$H_{b,\text{Co60}}^{\text{eff.}} = \frac{1 - \exp(-\lambda_{\text{Co60}} \cdot 604800)}{\lambda_{\text{Co60}}} \cdot g_{b,\text{Co60}}^{>17a} \cdot (F + W) \cdot Q_{\text{Co60}}$$

$$H_{b,\text{Co60}}^{\text{eff.}} \simeq \frac{1 - \exp(-4,17 \cdot 10^{-9} \cdot 604800)}{4,17 \cdot 10^{-9}} \cdot 2,2 \cdot 10^{-12} \cdot (9,24 \cdot 10^{-10} + 0) \cdot 4,5 \cdot 10^{14} \simeq \mathbf{0,6 \text{ [mSv]}}$$

$$H_{b,\text{Ra226}}^{\text{eff.}} = \frac{1 - \exp(-\lambda_{\text{Ra226}} \cdot 604800)}{\lambda_{\text{Ra226}}} \cdot g_{b,\text{Ra226}}^{>17a} \cdot (F + W) \cdot Q_{\text{Ra226}}$$

$$H_{b,\text{Ra226}}^{\text{eff.}} \simeq \frac{1 - \exp(-1,4 \cdot 10^{-11} \cdot 604800)}{1,4 \cdot 10^{-11}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \cdot (9,24 \cdot 10^{-10} + 0) \cdot 5 \cdot 10^{13} \simeq \mathbf{0,04 \text{ [mSv]}}$$

**Effektive Strahlen(folge)dosis durch Inhalation:**

$$H_{h,\text{Co60}}^{\text{eff.}} = \chi \cdot \dot{V} \cdot g_{h,\text{Co60}}^{>17a} \cdot Q_{\text{Co60}} \simeq 6,16 \cdot 10^{-7} \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 3,1 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{14} \simeq \mathbf{3,3 \text{ [mSv]}}$$

$$H_{h,\text{Ra226}}^{\text{eff.}} = \chi \cdot \dot{V} \cdot g_{h,\text{Ra226}}^{>17a} \cdot Q_{\text{Ra226}} \simeq 6,16 \cdot 10^{-7} \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{13} \simeq \mathbf{111,4 \text{ [mSv]}}$$

**Effektive Gesamtstrahlendosis aus Gamma-Bodenstrahlung und Inhalation:**

$$H^{\text{eff.}} \simeq (0,6 + 0,04 + 3,3 + 111,2) \cdot 0,910009 \simeq \mathbf{105 \text{ [mSv]}}$$

## A.2 Beispielrechnung (für Punkt 2 aus Abbildung 1)

Freisetzung 0,1 %; kein Niederschlag (Diffusionskategorie F); 19 km Entfernung;  $y = 1$  km

$$\sigma_{y,F}(19000) : \text{Horizontaler Ausbreitungsparameter für jeweiligen Aufpunkt} \quad (\text{SSK 2003, S.33})$$

$$\sigma_{y,F}(19000) = p_{y,F} \cdot x^{q_{y,F}} = 1,294 \cdot 19000^{0,718} \simeq 1528 \text{ [m]}$$

$$\sigma_{z,F}(19000) : \text{Vertikaler Ausbreitungsparameter für jeweiligen Aufpunkt} \quad (\text{SSK 2003, S.33})$$

$$\sigma_{z,F}(19000) = p_{z,F} \cdot x^{q_{z,F}} = 0,241 \cdot 19000^{0,662} \simeq 164 \text{ [m]}$$

$$\chi = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_{y,j}(x) \cdot \sigma_{z,j}(x) \cdot \bar{u}} \cdot \exp\left(-\frac{h_{\text{eff}}^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}\right) \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_{y,j}^2(x)}\right)$$

$$\chi \simeq \frac{1}{\pi \cdot 1528 \cdot 164 \cdot 1,97} \cdot \exp\left(-\frac{50^2}{2 \cdot 164^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{1000^2}{2 \cdot 1528^2}\right) \simeq 4,98 \cdot 10^{-7} \text{ [s} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

$$F = \nu_g \cdot \chi \simeq 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 4,98 \cdot 10^{-7} \simeq 7,47 \cdot 10^{-10} \text{ [m}^{-2}\text{]}$$

$$W = 0 \text{ und } f_R = 0 \quad (\text{da kein Niederschlag vorhanden ist})$$

$$f_A \simeq \exp\left(-\frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{1,81} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^{19000} \frac{\exp\left(-\frac{50^2}{2 \cdot (0,241x^{0,662})^2}\right)}{0,241x^{0,662}} dx\right) \simeq 0,910009$$

### Effektive Strahlendosis durch Gamma-Bodenstrahlung:

$$H_{b,\text{Co60}}^{\text{eff.}} = \frac{1 - \exp(-\lambda_{\text{Co60}} \cdot 604800)}{\lambda_{\text{Co60}}} \cdot g_{b,\text{Co60}}^{>17a} \cdot (F + W) \cdot Q_{\text{Co60}}$$

$$H_{b,\text{Co60}}^{\text{eff.}} \simeq \frac{1 - \exp(-4,17 \cdot 10^{-9} \cdot 604800)}{4,17 \cdot 10^{-9}} \cdot 2,2 \cdot 10^{-12} \cdot (7,47 \cdot 10^{-10} + 0) \cdot 4,5 \cdot 10^{14} \simeq \mathbf{0,4 \text{ [mSv]}}$$

$$H_{b,\text{Ra226}}^{\text{eff.}} = \frac{1 - \exp(-\lambda_{\text{Ra226}} \cdot 604800)}{\lambda_{\text{Ra226}}} \cdot g_{b,\text{Ra226}}^{>17a} \cdot (F + W) \cdot Q_{\text{Ra226}}$$

$$H_{b,\text{Ra226}}^{\text{eff.}} \simeq \frac{1 - \exp(-1,4 \cdot 10^{-11} \cdot 604800)}{1,4 \cdot 10^{-11}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \cdot (7,47 \cdot 10^{-10} + 0) \cdot 5 \cdot 10^{13} \simeq \mathbf{0,04 \text{ [mSv]}}$$

### Effektive Strahlen(folge)dosis durch Inhalation:

$$H_{h,\text{Co60}}^{\text{eff.}} = \chi \cdot \dot{V} \cdot g_{h,\text{Co60}}^{>17a} \cdot Q_{\text{Co60}} \simeq 4,98 \cdot 10^{-7} \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 3,1 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{14} \simeq \mathbf{2,6 \text{ [mSv]}}$$

$$H_{h,\text{Ra226}}^{\text{eff.}} = \chi \cdot \dot{V} \cdot g_{h,\text{Ra226}}^{>17a} \cdot Q_{\text{Ra226}} \simeq 4,98 \cdot 10^{-7} \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{13} \simeq \mathbf{89,9 \text{ [mSv]}}$$

### Effektive Gesamtstrahlendosis aus Gamma-Bodenstrahlung und Inhalation:

$$H^{\text{eff.}} \simeq (0,4 + 0,04 + 2,6 + 89,9) \cdot 0,910009 \simeq \mathbf{85 \text{ [mSv]}}$$

### A.3 Beispielrechnung (für Diffusionskategorie E)

Freisetzung 0,1 %; Niederschlag (Diffusionskategorie E); 1 km Entfernung;  $y = 0$

$$\sigma_{y,E}(1.000) : \text{Horizontaler Ausbreitungsparameter für jeweiligen Aufpunkt} \quad (\text{SSK 2003, S.33})$$

$$\sigma_{y,E} = p_{y,E} \cdot x^{q_{y,E}} = 0,801 \cdot 1000^{0,754} \simeq 146 [m]$$

$$\sigma_{z,E}(1.000) : \text{Vertikaler Ausbreitungsparameter für jeweiligen Aufpunkt} \quad (\text{SSK 2003, S.33})$$

$$\sigma_{z,E} = p_{z,E} \cdot x^{q_{z,E}} = 0,264 \cdot 1000^{0,774} \simeq 55 [m]$$

$$\chi \simeq \frac{1}{\pi \cdot 146 \cdot 55 \cdot 1,81} \cdot \exp\left(-\frac{50^2}{2 \cdot 55^2}\right) \cdot \exp(0) \simeq 1,44 \cdot 10^{-5} [s \cdot m^{-3}]$$

$$F = \nu_g \cdot \chi \simeq 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,44 \cdot 10^{-5} \simeq 2,16 \cdot 10^{-8} [m^{-2}]$$

$$W = \frac{\Lambda}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{y,E} \cdot \bar{u}}} \simeq \frac{2,54 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot 146 \cdot 1,81}} \simeq 3,81 \cdot 10^{-7} [m^{-2}]$$

$$f_A \simeq \exp\left(-\frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{1,81} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^{1000} \frac{\exp\left(\frac{50^2}{2 \cdot (0,264x^{0,774})^2}\right)}{0,264x^{0,774}} dx\right) \simeq 0,995194$$

$$f_R = \exp\left(-\frac{\Lambda \cdot x}{\bar{u}}\right) = \exp\left(-\frac{2,54 \cdot 10^{-4} \cdot 1000}{1,81}\right) = 0,8694907$$

**Effektive Strahlendosis durch Gamma-Bodenstrahlung:**

$$H_{b,Co60}^{\text{eff.}} \simeq \frac{1 - \exp(-4,17 \cdot 10^{-9} \cdot 604800)}{4,17 \cdot 10^{-9}} \cdot 2,2 \cdot 10^{-12} \cdot (2,16 \cdot 10^{-8} + 3,81 \cdot 10^{-7}) \cdot 4,5 \cdot 10^{14}$$

$$H_{b,Co60}^{\text{eff.}} \simeq \mathbf{240,8 [mSv]}$$

$$H_{b,Ra226}^{\text{eff.}} \simeq \frac{1 - \exp(-1,4 \cdot 10^{-11} \cdot 604800)}{1,4 \cdot 10^{-11}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \cdot (2,16 \cdot 10^{-8} + 3,81 \cdot 10^{-7}) \cdot 5 \cdot 10^{13}$$

$$H_{b,Ra226}^{\text{eff.}} \simeq \mathbf{19,5 [mSv]}$$

**Effektive Strahlen(folge)dosis durch Inhalation:**

$$H_{h,Co60}^{\text{eff.}} = \chi \cdot \dot{V} \cdot g_{h,Co60}^{>17a} \cdot Q_{Co60} \simeq 1,44 \cdot 10^{-5} \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 3,1 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{14} \simeq \mathbf{76,3 [mSv]}$$

$$H_{h,Ra226}^{\text{eff.}} = \chi \cdot \dot{V} \cdot g_{h,Ra226}^{>17a} \cdot Q_{Ra226} \simeq 1,44 \cdot 10^{-5} \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{13} \simeq \mathbf{2598,2 [mSv]}$$

**Effektive Gesamtstrahlendosis aus Gamma-Bodenstrahlung und Inhalation:**

$$H^{\text{eff.}} \simeq (240,8 + 19,5 + 76,3 + 2598,2) \cdot 0,995194 \cdot 0,8694907 \simeq \mathbf{2539 [mSv]}$$