

Stresstest für die Nuklearfirma Eckert & Ziegler

BISS Braunschweig e.V.
März 2018 (revidierte Fassung)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Einführung	1
2. Methodisches Vorgehen	2
2.1 Umgangsgenehmigung und Freisetzungsanteil	2
2.2 Nuklidvektor	4
2.3 Ausbreitungsmodell	6
2.4 Wetterszenarien	9
3. Ergebnis	10
4. Fazit	12
Literaturverzeichnis	13
Anhang	15
A.1 Beispielrechnung (für Punkt 1 aus Abbildung 1)	16
A.2 Beispielrechnung (für Punkt 2 aus Abbildung 1)	17

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 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.

Eine rechtzeitige Evakuierung der Bevölkerung ist aufgrund der räumlichen Nähe der Nuklearfirma zur Wohnbevölkerung und den öffentlichen Einrichtungen (Schulzentrum, KiTa, Jugendzentrum) schwer möglich. Auch die Evakuierung aus weiter entfernt liegenden Bereichen erscheint aufgrund 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 mittelradioaktive Abfälle weisen im Hinblick auf mögliche Freisetzungen radioaktiver Stoffe bei auslegungsüberschreitenden Einwirkungen gemeinsame Eigenschaften auf. Es ist daher sinnvoll, nicht jede einzelne Anlage oder Einrichtung des Anhangs 1 gesondert zu betrachten, sondern zunächst von typisierten Schadensbildern auszugehen und die radiologischen Konsequenzen dieser Schadensbilder generisch zu betrachten.“* (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 für das Szenario einer punktförmigen mechanischen Einwirkung). Dieser Mindestabstand wird bei Eckert & Ziegler in Braunschweig aufgrund

der engen räumlichen Nähe zur Wohnbebauung deutlich unterschritten (die Heiße Zelle ist circa 115 m von der nächsten Wohnbebauung entfernt).

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“* (ESK 2013, S.30). Eine entsprechende Stressfall-Betrachtung wurde vom Niedersächsischen Umweltministerium bislang jedoch nicht durchgeführt.

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 in der von der Stadt Braunschweig in Auftrag gegebenen Stellungnahme für den Nuklearstandort von 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.

Die hier durchgeführte Studie wurde durchgeführt, da von behördlicher Seite bislang kein spezifischer Stresstest durchgeführt wurde.

2. Methodisches Vorgehen

2.1 Umgangsgenehmigung und Freisetzunganteil

Annahmen im ESK-Stresstest

Die ESK geht in ihrem Stresstest für Anlagen der hier relevanten Gruppe II von einem Inventar bestehend aus 10.000 200-Liter-Fässern aus. Als mittleres Aktivitätsinventar wurde hierbei pro Fass eine Aktivität von 10^8 Bq angesetzt. (vgl. ESK 2013, S.15).

Für das Szenario „Thermische Einwirkung“ nimmt die ESK entsprechend einer konservativen Annahme an, dass 475 Fässer mit mittlerem Aktivitätsinventar (jeweils 10^8 Bq) und 25 Fässer mit hohem Aktivitätsinventar (jeweils $4 \cdot 10^{11}$ Bq) - und somit ein erheblicher Anteil des radioaktiven Gesamtinventars - betroffen sind (vgl. ESK 2013, S. 19).

Höhe des Gesamtinventars am Braunschweiger Nuklearstandort

In Braunschweig besitzt die Nuklearfirma Eckert & Ziegler eine Genehmigung für den Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen in der Höhe von 10^{11} Freigrenzen und den Umgang mit umschlossenen radioaktiven Stoffen in 10^{13} Freigrenzen (siehe GAA-BS 2011). 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.

In dem ESK-Stresstest ist angegeben, dass es für den Braunschweiger Nuklearstandort Eckert & Ziegler eine „*Inventarbegrenzung auf 1,86E10 FG für die Gesamtanlage inkl. Quellenfertigung*“ gibt. Diese Aussage deckt sich nicht mit der Genehmigung 11/04 vom 05.07.2004 (siehe auch GAA-BS 2011). Eine entsprechende Anfrage nach Umweltinformationsgesetz wurde am 06.12.2017 gestellt, ist jedoch bislang trotz mehrfacher schriftlicher Nachfragen nicht offiziell beantwortet. Bei einem Telefonat der BISS am 20.12.2017 mit dem Niedersächsischen Umweltministerium konnte der zuständige Mitarbeiter auch keine Antwort auf diese Diskrepanz geben. Eine Auskunft des Niedersächsischen Umweltministerium vom 2.2.2017 (siehe MU 2017) zeigt jedoch schon jetzt, dass es sich bei der ESK-Angabe um einen Übertragungsfehler handeln muss, da die Inventare am Standort in den vergangenen Jahren in der Regel deutlich über der in der ESK aufgeführten vermeintlichen Inventarbegrenzung lagen.

Aus diesem Grund muss aufgrund der Genehmigungslage für den Braunschweiger Nuklearstandort von einem radioaktiven Inventar in der Höhe von 10^{11} Freigrenzen für offene radioaktive Stoffe und 10^{13} Freigrenzen für umschlossene radioaktive Stoffe ausgegangen werden.

Am Standort geht darüber hinaus noch die Firma GE Healthcare Buchler mit radioaktiven Stoffen um, deren Umgangsgenehmigung hier jedoch nicht berücksichtigt wird.

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 Brandlasten aus Methanol und Toluol; genehmigt sind ca. 78 t) sowie eine unterirdisch unmittelbar neben den Gebäuden im Strahlenschutzbereich 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.

Durch die 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 relevanter Anteil der auf dem Gelände gelagerten Gebinde mechanisch zerstört werden kann. Da ein Großteil der Radioaktivität nach Aussagen des MU räumlich stark konzentriert in B(U)-Behältern gelagert wird, kann hier eine punktuelle mechanische Belastung erhebliche Auswirkungen haben. Eine Beschädigung des Gebäudes und der B(U)-Behälter, die zu einer Freisetzung radioaktiver Stoffe führt, ist durch einen Flugzeugabsturz nicht auszuschließen. Insbesondere beim Absturz eines vollgetankten A-320 kann davon ausgegangen werden, dass die im Normalfall gegebenen Rückhaltemechanismen aufgehoben werden. Hinzu kommt, dass die Effekte der mechanischen Einwirkung aus dem Flugzeugabsturz und die thermische Einwirkung aufgrund des nachfolgenden Brandes (durch das mitgeführte Kerosin und ggf. der weiteren Brandlasten) kombiniert auftraten. Der Brand würde hierbei auf bereits zerstörte oder zumindest vorgeschädigte Behälter einwirken. Die am Standort benutzten B(U)-Behälter gewährleisten die Rückhaltung radioaktiver Stoffe nur für eine Branddauer von maximal 30 min bei einer Temperatur von maximal 800 °C (BMVBS 2013). Da auf dem Gelände keine Werksfeuerwehr einen Brand sofort löschen könnte und nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Sprinkleranlage und/oder der auf dem Gelände befindliche Löschwassertank im Brandfall aufgrund der mechanischen Belastung des Flugzeugabsturzes zerstört wird, sind Brandtemperaturen über 800 °C und Branddauern von über 30 min zu befürchten. Aus diesem Grund muss davon ausgegangen werden, dass es im Worst-Case-Fall auch aus den B(U)-Behältern zu einer relevanten Freisetzung radioaktiver Stoffe kommt.

Aus den vorgenannten Gründen erscheint im hier relevanten Szenario eines Flugzeugabsturzes eines Großflugzeugs vom Typ A-320 die Annahme eines Freisetzunganteils von wenigstens 0,1 % der für das Gelände genehmigten Gesamtaktivität plausibel. Dies wird auch durch die Experten-Einschätzung unterstrichen, dass „*ein signifikantes Risiko durch einen Terroranschlag*“ besteht (Becker 2015; siehe auch entsprechende Zitate des Braunschweiger GAA oder der Rechtsanwälte Eckert & Zieglers im Literaturverzeichnis), da befürchtet werden muss, dass Terroristen gezielt eine möglichst umfangreiche Freisetzung radioaktiver Stoffe erzwingen wollen und durch einen gezielten Flugzeugabsturz oder z.B. den Einsatz moderner Panzerfäuste auch könnten.

Detailinformationen zu den auf dem Gelände vorhandenen Rückhaltemechanismen wurden der BISS u.a. mit Hinweis auf die Gefahr terroristischer Anschläge vorenthalten. Daher wird im Folgenden angenommen, dass von den betrachteten Nukliden 0,1 % des genehmigten Aktivitätsinventars freigesetzt werden. Dieser Anteil erscheint aufgrund der oben genannten Gründe realistisch. Ob es sich hierbei um eine hinreichend konservative Betrachtung handelt, kann jedoch aufgrund der vorliegenden Datenlage nicht entschieden werden. Hierfür ist eine detaillierte Betrachtung durch die Behörden notwendig, in der die Auswirkungen eines gravierenden terroristischen Anschlages sowie des Absturzes eines A-320 bzw. sogar eines A-380 (siehe BfE 2016) betrachtet werden.

2.2 Nuklidvektor

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. Die Nuklide Co-60 und Ra-226 befinden sich hierbei unter den Nukliden mit der größten Aktivität. Sieben der 170 Nuklide wurden nicht veröffentlicht. Aus den Genehmigungen ist ersichtlich, dass es sich hierbei u.a. um Am-241 handelt, da Am-241 neben sieben weiteren Nukliden explizit in der vom Braunschweiger Gewerbeaufsichtsamt ausgestellten Genehmigung für die Aktivitätsabgabe über die Abluft aufgeführt wird.

Aktuell wird die Genehmigung nur zu einem geringen Anteil ausgeschöpft (siehe z.B. MU 2017). Da sich die Geschäftsmodelle/Produkte zukünftig ändern können ist nicht vorhersehbar, wie sich der Nuklidvektor bei einer Ausschöpfung der Genehmigung zukünftig entwickelt. Auch die ESK (2013, S.9) geht davon aus, dass die radioaktiven Abfälle „*erhebliche Unterschiede hinsichtlich des Nuklidvektors und des radioaktiven Inventars der Abfallgebinde auf(weisen)*“. Die ESK (2013, S. 13) schreibt hierzu: „*Die Nuklidvektoren sollen in Verbindung mit den angenommenen Inventaren abdeckend sein. Dies bedeutet, dass diese Anforderung im Mittel über die jeweils einbezogene Zahl an betroffenen Behältern erfüllt sein muss. Außerdem sollen die Nuklidvektoren geeignet und hinreichend konservativ im Hinblick auf die hier durchgeführten Dosisbetrachtungen sein. Besonderes Gewicht haben daher Radionuklide, die für die Inhalation und die externe Gamma-Strahlung über einen kurzen Zeitraum bedeutend sind.*“ Die ESK hat daher 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).

Da sowohl Co-60 als auch Ra-226 am Braunschweiger Standort Eckert & Ziegler in hohen Aktivitäten vorkommen, wurde daher in der hier vorliegenden Studie in einem Szenario derselbe Nuklidfreisetzungsvektor wie im ESK-Stresstest angenommen. Entsprechend der Freigrenzen ergibt sich bei der Freisetzung von einem Tausendstel der genehmigten Aktivität für diesen Nuklidfreisetzungsvektor:

- $4,5 \cdot 10^{14}$ Bq Co-60
- $5 \cdot 10^{13}$ Bq Ra-226.

Darüber hinaus wurden zwei weitere Nuklidfreisetzungsvektoren betrachtet, die sich aus den spezifischen Bedingungen am Braunschweiger Nuklearstandort ergeben.

Da zusätzlich zu Co-60 und Ra-226 auch Am-241 am Braunschweiger Nuklearstandort derzeit eine besondere Relevanz haben (siehe oben), wurde auch ein Nuklidfreisetzungsvektor betrachtet, der neben Co-60 und Ra-226 - auch Am-241 betrachtet. Dieser Nuklidvektor wird aufgrund der darin enthaltenen Radionuklide, die für die Inhalation und die externe Gamma-Strahlung über einen kurzen Zeitraum bedeutend sind, als konservativ eingestuft. In Anlehnung an den ESK-Vektor nimmt hierbei Co-60 90 % der Aktivität ein. Der Anteil von Ra-226 reduziert sich auf 8 % und das hier hinzukommende Am-241 nimmt lediglich 2 % dieses betrachteten Nuklidfreisetzungsvektors ein. Der Nuklidfreisetzungsvektor in Szenario 2 beträgt daher:

- $4,5 \cdot 10^{14}$ Bq für Co-60
- $1,0 \cdot 10^{13}$ Bq für Am-241
- $4,0 \cdot 10^{13}$ Bq für Ra-226

In dem dritten Szenario wurde die ausschließliche Freisetzung von I-131 betrachtet, da bei einem Störfall am 22.11.2017 ausschließlich dieses Nuklid freigesetzt wurde (Drucksache 18/300; Antwort des Ministeriums für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz vom 13.02.2018 auf eine Anfrage der Grünen). I-131 hat eine höhere Freigrenze (10^6) als die oben genannten Nuklide. Aufgrund der höheren Freigrenze als auch der hohen Flüchtigkeit ergibt sich gegenüber den ersten beiden Szenarien eine höhere Becquerel-Freisetzung:

- 10^{16} Bq für I-131 (Gase/Dämpfe)

Das dritte Szenario kann aufgrund der im Vergleich zu den oben aufgeführten Nukliden geringeren Bedeutung von I-131 für die Inhalationsdosis als auch die externe Gammastrahlung nicht als abdeckend angesehen werden.

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. 24) 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 (χ), Falloutfaktor (F) und Washoutfaktor (W) - hängen von den unten aufgeführten Ausbreitungsbedingungen ab.

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

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

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

mit

x : Quelledistanz in [m]

y : Aufpunktastand quer zur Hauptwindzugrichtung in [m]

h_{eff} : Freisetzungshöhe, hier: $h_{\text{eff}} = 50$ [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:

Diffusionskategorie	Ausbreitungskoeffizient bzw. Ausbreitungsexponent			
	p_y	q_y	p_z	q_z
D	$p_{y,D} = 0,640$	$q_{y,D} = 0,784$	$p_{z,D} = 0,215$	$q_{z,D} = 0,885$
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]

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

$m = 0,28$ (für Diffusionskategorie D) und $m = 0,42$ (für Diffusionskategorie F)

v_g :	Ablagerungsgeschwindigkeit für Schwebstoffe	
	$v_g = 1,5 \cdot 10^{-3} [m \cdot s^{-1}]$	(SSK 2003, S. 35, Tab. 1)
	Ablagerungsgeschwindigkeit für elementares Iod ¹	
	$v_g = 10^{-2} [m \cdot s^{-1}]$	(SSK 2003, S. 35, Tab. 1)
Λ :	Washoutkoeffizient in $[s^{-1}]$	(SSK 2003, S. 20, 4.23)
	$\Lambda = \Lambda_0 \cdot \left(\frac{I}{I_0}\right)^\kappa = 7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{5}{1}\right)^{0,8} \simeq 2,54 \cdot 10^{-4} [s^{-1}]$	
	$\Lambda_0 = 7 \cdot 10^{-5} [s^{-1}]$	(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 $H_{b,r}^{eff.} [mSv]$ ergibt sich für Erwachsene nach der SSK (2004) für jedes Nuklid r mit der Formel:

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

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

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

$g_{b,r}^{>17a}$: Dosiskoeffizient für Gamma-Bodenstrahlung für Erwachsene
 $[mSv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}]$ (Bundesanzeiger 2001)

$$g_{h,Co-60}^{>17a} = 2,2 \cdot 10^{-12}$$

$$g_{h,Ra-226}^{>17a} = 1,6 \cdot 10^{-12}$$

$$g_{h,Am-241}^{>17a} = 2,3 \cdot 10^{-14}$$

$$g_{h,I-131}^{>17a} = 3,6 \cdot 10^{-13}$$

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

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

¹ Bei einem Brand muss davon ausgegangen werden, dass I-131 aufgrund der Temperaturen in elementarer Form vorliegt.

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

χ : 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 Erwachsene² (Bundesanzeiger 2001)
 [mSv · Bq⁻¹]

$$g_{h,\text{Co-60}}^{>17a} = 3,1 \cdot 10^{-5}$$

$$g_{h,\text{Ra-226}}^{>17a} = 9,5 \cdot 10^{-3}$$

$$g_{h,\text{Am-241}}^{>17a} = 9,6 \cdot 10^{-2}$$

$$g_{h,\text{I-131 Gase/Dämpfe}}^{>17a} = 2,0 \cdot 10^{-5}$$

Q_r : Freigesetzte Aktivität des Nuklids r [Bq]

Die betrachtete **effektive Gesamtstrahlendosis** $H^{\text{eff.}}$ ergibt sich durch die Gamma-Bodenstrahlung der einzelnen Nuklide ($H_{b,r}^{\text{eff.}}$) sowie durch die Strahlen(folge)dosis, die sich durch die Inhalation der freigesetzten Nuklide ergibt ($H_{h,r}^{\text{eff.}}$). „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.

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

mit

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

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

² Entsprechend der üblichen Verfahren wurde jeweils die ungünstigste Lungen-Retentionsklasse F, M bzw. S gewählt.

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 bis auf I-131 (1600 Jahre für Ra-226, 432 Jahre für Am-241,
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 für Am-241, Co-60 und Ra-226 in den Freisetzungsvektoren bei einer Rundung auf vier Nachkommastellen: $f_Z = 1,0000$. Für I-131 wurde hingegen der f_Z -Korrekturfaktor bei der Berechnung der effektiven Gesamtstrahlendosis H^{eff} berücksichtigt.

2.4 Wetterszenarien

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

I. **Diffusionskategorie D** betrachtet ein **Niederschlags-Szenario** (vgl. SSK 2003)

II. **Diffusionskategorie F** betrachtet ein Szenario **ohne Niederschlag** (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 Ergebnis der Strahlenbelastung ist in Tabelle 2 für drei Nuklidvektoren dargestellt (zu den Nuklidvektoren: siehe Kapitel 2.2). Abbildung 1 (siehe nachfolgende Seite) stellt die räumliche Ausdehnung der notwendigen Evakuierungszone für den Nuklidvektor aus Co-60 und Ra-226 dar.

Tabelle 2: Effektive Dosis [mSv/7d] in Hauptwindrichtung bei einer Aktivitätsfreisetzung von 0,1 % der Umgangsgenehmigung Eckert & Ziegler für drei verschiedene Nuklidfreisetzungsvektoren in den Diffusionskategorien D und F.

Abstand	Co-60 & Ra-226		Am-241 & Co-60 & Ra-226		I-131	
	D	F	D	F	D	F
350 m	6932	3	18026	8	4692	1
500 m	5506	58	14382	161	3654	29
1000 m	2252	707	5782	1951	1611	349
2000 m	708	1073	1739	2961	594	530
3000 m	333	891	786	2459	315	440
4000 m	187	705	427	1945	194	348
5000 m	116	565	257	1559	130	279
6000 m	77	463	165	1277	91	228
7000 m	53	387	111	1067	66	190
8000 m	38	329	77	908	49	162
9000 m	28	284	55	784	37	140
10000 m	20	248	40	685	29	122
11000 m	15	219	30	605	22	108
12000 m	12	196	22	540	17	96
13000 m	9	176	17	485	14	86
14000 m	7	159	13	440	11	78
15000 m	6	145	10	400	9	71
16000 m	4	133	8	367	7	65
17000 m	3	122	6	338	6	60
18000 m	3	113	5	312	5	55
19000 m	2	105	4	290	4	51
20000 m	2	98	3	270	3	48

Dosen, die den Eingreifrichtwert für die Evakuierung überschreiten (100 mSv in 7 Tagen; siehe ESK 2013, S. 8) sind mit roter Schrift hervorgehoben.

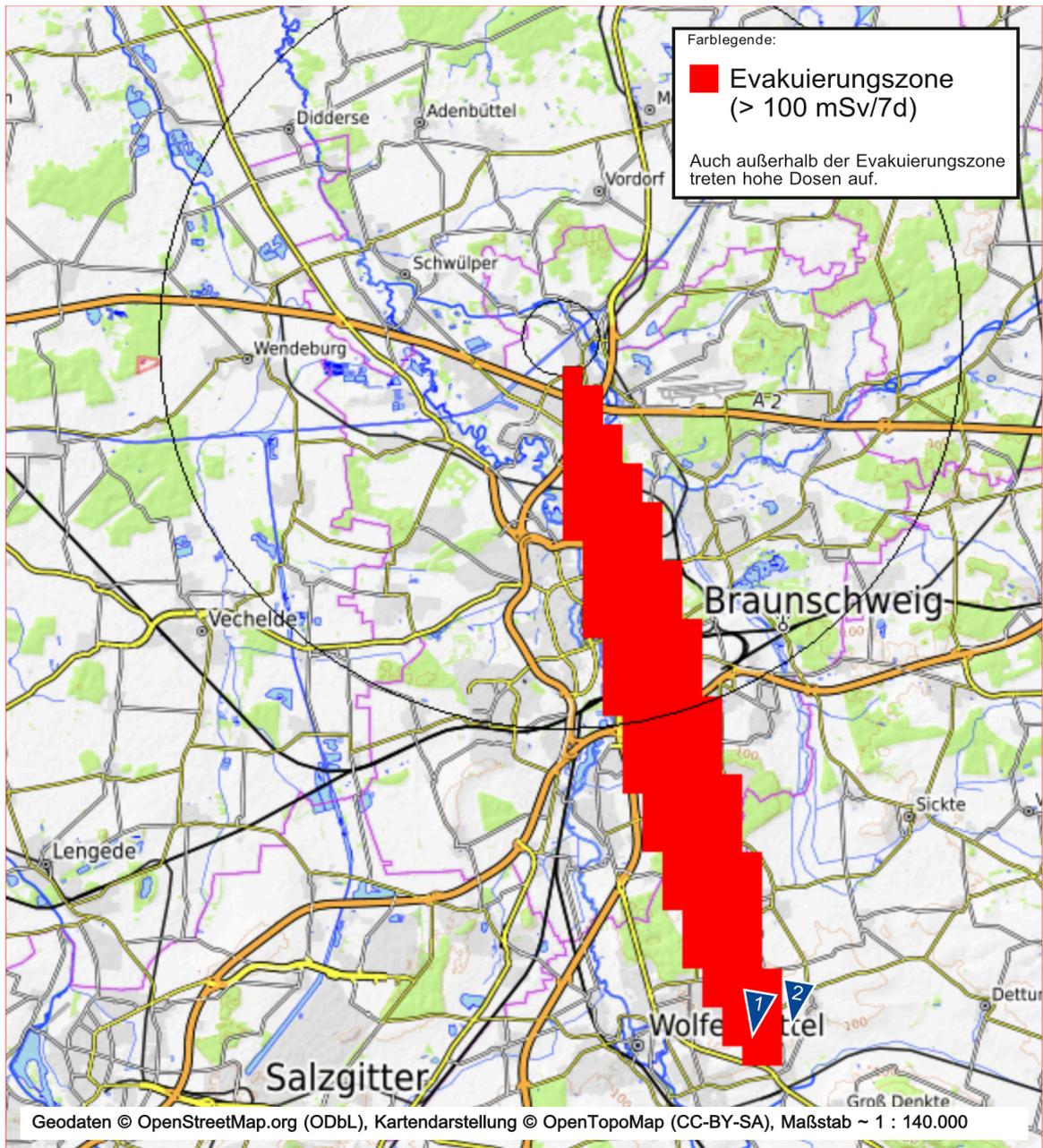


Abbildung 1: Exemplarische Darstellung der räumlichen Ausdehnung (rote Fläche) in welcher der Eingreifrichtwert der Evakuierung überschritten wird. Das Ergebnis der Darstellung basiert auf Szenario 1 (Nuklidfreisetzungsvektor aus 90 % Co-60 und 10 % Ra-226) bei der Diffusionskategorie F und einer Windrichtung in Richtung Braunschweiger Innenstadt. Die Spitzen der blauen Dreiecke markieren diejenigen Aufpunkte, für die im Anhang beispielhaft die Dosis-Berechnungen dargestellt sind.

4. Fazit

Der hier dargestellte Stresstest betrachtet die Auswirkung der Freisetzung von drei verschiedenen Nuklidvektoren. Der Freisetzunganteil wurde hierbei jeweils auf ein Tausendstel der Genehmigungen der entsprechenden Nuklide angesetzt. Die ESK (2013) weist bei ihrem Stresstest darauf hin, dass Zwischenlager und Konditionierungseinrichtungen sehr unterschiedliche Nuklidvektoren aufweisen können und hat für eine abdeckende Betrachtung einen Nuklidvektor aus 90 % Co-60 und 10 % Ra-226 angesetzt. Da die Genehmigung am Braunschweiger Nuklearstandort bislang nur zu einem Bruchteil ausgeschöpft wird, kann hier ein Nuklidvektor nicht valide prognostiziert werden. Aus diesem Grund wurde ebenfalls der Nuklidvektor der ESK angesetzt. Die vorliegenden Daten zur Aktivitätsbilanz (GAA-BS 2012b) machen darüber hinaus deutlich, dass zusätzlich zu Co-60 und Ra-226 auch Am-241 am Braunschweiger Nuklearstandort aktuell eine besondere Relevanz hat. Aus diesem Grund wurde in ein zweiter Nuklidfreisetzungsvektor aus Co-60, Ra-226 und Am-241 betrachtet. In einem dritten Szenario wurde ausschließlich die Freisetzung von I-131 betrachtet, da dieses Nuklid bei einem Störfall am 22.11.2017 freigesetzt wurde (Drucksache 18/300; Antwort des Ministeriums für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz vom 13.02.2018 auf eine Anfrage der Grünen).

„Für das strahlenbedingte Leukämie- und Krebsrisiko gibt es keine Schwellendosis. [...] Mit zunehmender Dosis erhöht sich das Erkrankungsrisiko“ (BfS 2017). Bei einer Dosis von 100 mSv (in sieben Tagen) ist die radioaktive Belastung so hoch, dass die Bevölkerung evakuiert werden muss (vgl. ESK 2013, S.8). Diesen Wert hat auch die ESK in ihrem bundesweiten Stresstest herangezogen.

Das Ergebnis der hier vorliegenden Stresstest-Studie zeigt, dass bei jedem der drei betrachteten Nuklidvektoren bereits eine Freisetzung von 0,1 % der Umgangsgenehmigung zu so erheblichen Strahlendosen führen würde, dass noch in mehreren Kilometern Entfernung eine Evakuierung der Bevölkerung notwendig wäre.

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) in über 20 km Entfernung (bei einer Freisetzung von Am-241, Ra-226 und Co-60) bzw. 19 km (bei einer Freisetzung von Co-60 und Ra-226). Selbst der nicht abdeckende Fall einer ausschließlichen Freisetzung von I-131 würde eine Evakuierung in bis zu 11 km erforderlich machen.

Durch Niederschläge (Diffusionskategorie D) verringert sich der Abstand, in dem der Eingreifrichtwert für die Evakuierung überschritten wird auf 5 km (für Co-60 und Ra-226 und auch für I-131) bzw. 7 km (für Am-241, Ra-226 und Co-60) (siehe Tabelle 2). Dies führt jedoch auch dazu, dass die radioaktiven Belastungen in geringerer Entfernung drastisch ansteigen und stellenweise mehrere tausend Milli-Sievert (= mehrere Sievert) betragen. Das BfS (2017) gibt an, dass bei einer Strahlendosis von 3000-4000 mSv ohne medizinisches Eingreifen 50 % der exponierten Personen nach 3-6 Wochen sterben, wenn es sich um eine in kurzer Zeit erfahrene Strahlenbelastung handelt.

Eine rechtzeitige Evakuierung der Bevölkerung erscheint aufgrund der räumlichen Nähe und der damit verbundenen logistischen Anforderungen - wenn die Großstadt Braunschweig mit mehreren 10.000 Menschen betroffen ist - fraglich.

Dieses Risiko muss bei der Entwicklung des Bebauungsplanes des Standortes durch die Stadt Braunschweig berücksichtigt werden.

Ob es sich bei dem hier angenommenen Freisetzunganteil von 0,1 % um eine hinreichend konservative Betrachtung handelt, kann aufgrund der vorliegenden Datenlage nicht entschieden werden. Daher ist eine detaillierte Betrachtung durch die Behörden notwendig, in der die Auswirkungen eines gravierenden terroristischen Anschlages sowie des Absturzes eines A-320 betrachtet werden.

Aufgrund der aktuellen Sachlage erscheint die Verlagerung der Anlagen an einen geeigneteren Standort die einzig sinnvolle Möglichkeit.

Literaturverzeichnis

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

BfE (2016): Zwischenlager für Kernbrennstoffe: Prüfpunkt Flugzeugabsturz. - https://www.bfe.bund.de/DE/ne/zwischenlager/genehmigung/flugzeugabsturz/flugzeugabsturz_node.html. Stand 20.09.2016 [retrieved: 20.03.2018 19:57]

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]

BMVBS (2013): Die Beförderung radioaktiver Stoffe. 18. Auflage: 10/2013; BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung)

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 (2011): Umgang mit radioaktiven Stoffen bei der Firma Eckert & Ziegler Nuclitex GmbH in Braunschweig. - Schreiben vom 14.10.2011. Zeichen: BS001129836-1190 han; GAA-BS (Staatliches Gewerbeamt Braunschweig)

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

MU (2017): Zugang zu Umweltinformationen nach dem Niedersächsischen Umweltinformationsgesetz (NUIG). - Schreiben vom 02.02.2017. Zeichen: 45-05026; MU (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz)

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. [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 zwei 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:

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