

---

# Lebenszyklusanalyse in Bezug auf Radioaktivität bei der Nutzung erneuerbarer Energien

---

## Bachelorarbeit

Eingereicht von

Simon Bittner

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

Fakultät für Mathematik und Physik

**Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover**

Prüfer: Prof. Dr. Clemens Walther



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Windkraft</b>	<b>4</b>
2.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	4
2.2	Wahl der Windkraftanlage . . . . .	5
2.3	Radiologische Betrachtung der Materialien . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Rechnung</b>	<b>9</b>
3.1	Annahmen bezüglich anderer Produktionsschritte . . . . .	9
3.2	Methodik . . . . .	10
3.2.1	Berechnung der Unsicherheit . . . . .	12
3.3	Berechnung der Kollektivdosis . . . . .	14
3.3.1	Produktion von Eisenmetallen . . . . .	14
3.3.1.1	Tailing der Eisenerzförderung . . . . .	14
3.3.1.2	Nuklidfreisetzung Umgebung Stahlproduktion . . . . .	17
3.3.1.3	Staubinhalation im Stahlwerk . . . . .	19
3.3.2	Produktion von Seltenen Erden . . . . .	22
3.3.2.1	Inhalationsdosis durch Abbau und Verarbeitung . . . . .	22
3.3.2.2	Externe Gammaexposition durch das Tailing . . . . .	25
3.3.2.3	Exposition durch die Weiterverarbeitung . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>33</b>
4.1	Zentrale Ergebnisse . . . . .	33
4.2	Auseinandersetzung mit Methodik und Ergebnis . . . . .	39
4.3	Möglichkeiten zur Dosisreduktion . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Ausblick</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>Eigenständigkeitserklärung</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>52</b>
7.1	Weitere Datensätze . . . . .	52
7.2	Weitere Abbildungen . . . . .	54
7.3	Parameterwerte . . . . .	57
7.4	Unsicherheiten der Parameter . . . . .	61
7.5	Abschätzung der effektiven Dosis durch Ingestion . . . . .	63



## 1 Einleitung

Mit dem 2011 beschlossenen stufenweisen Ausstieg aus der kommerziellen Nutzung der Kernenergie zur Erzeugung von Elektrizität bis zum Jahr 2022 hat die damalige Regierung in Deutschland einen weiteren Baustein für die Energiewende beschlossen. Erneuerbare Energien sollen auf längere Sicht konventionelle Energieträger in der Stromproduktion ablösen (Bundesregierung 2020a). Als Begründung führt die Bundesregierung die Unabhängigkeit von fossilen Ressourcen, den Verzicht auf die Risiken von Kernkraft und die geringeren Treibhausgasemissionen an (Bundesregierung 2020b).

Ein Punkt, der nicht aufgelistet wird, ist die resultierende Exposition<sup>1</sup> durch ionisierende Strahlung durch die Nutzung der jeweiligen Technologie. Für eine Einschätzung dieser Exposition wird die Kollektivdosis betrachtet. Sie setzt sich zusammen aus dem Produkt der mittleren erhaltenen Dosen und der Anzahl der exponierten Personen. Für die konventionellen Energieträger Kohle- und Kernkraft ist dies bereits detailliert untersucht (UNSCEAR 2016). Die aus der Nutzung von erneuerbaren Energien resultierende Exposition wird im UNSCEAR Bericht von 2016 ebenfalls abgeschätzt.

Allerdings wurde Geothermie als einzige erneuerbare Technologie im Bericht (UNSCEAR 2016) detailliert beleuchtet. Diese stellt gewissermaßen einen Sonderfall dar, weil eine hohe Exposition der Mitarbeiter im laufenden Betrieb möglich ist. Daher sind viele radiologische Untersuchungen für die Stromerzeugung durch Geothermie bereits vorhanden. Im Folgenden wird dargelegt, wie die Exposition bei der Nutzung von Geothermie entsteht, obwohl sie nicht dem Kernbrennstoffkreislauf angehört. Für die Stromerzeugung wird heißes Gas oder eine heiße Flüssigkeit (im weiteren Verlauf als Fluid bezeichnet) aus tieferen Bodenschichten kontinuierlich hervorgepumpt. Über einen Wärmetauscher wird Wasser erhitzt und mithilfe des Wasserdampfes ein Generator betrieben. Das abgekühlte Fluid wird wieder in die Bodenschichten zurückgeführt (Eggeling et al. 2013).

Beim Hochpumpen des heißen Fluids findet eine Wechselwirkung mit dem Gestein statt. Im Gestein sind die natürlich vorkommenden Radionuklide in ihrer Zerfallsreihe im Gleichgewicht. Durch den Kontakt des Fluids mit dem Gestein migrieren Radionuklide vom Gestein in das Fluid. Aufgrund der verschiedenen chemischen und physikalischen Eigenschaften der einzelnen Nuklide ist im Fluid kein Gleichgewicht mehr vorhanden. Abhängig von den Eigenschaften migrieren die Nuklide unterschiedlich stark. Daraufhin durchläuft das Fluid im Prozess verschiedene Temperaturen und Drücke. Dies führt zu der Bildung von verschiedenen Ablagerungen in den Rohren (Eggeling et al. 2013). Die Ablagerungen

---

<sup>1</sup>Dies ist ein Begriff aus der Epidemiologie und hier im speziellen Fall der Dosimetrie ionisierender Strahlung. Die Exposition einer Bevölkerungsgruppe beschreibt, dass die Gruppe einem bestimmten Einfluss oder Faktor ausgesetzt ist.

bilden sich nach dem Durchlaufen des Wärmetauschers. Die Radionuklide sind innerhalb der Ablagerungen gebunden. Daraus resultiert, dass ein Aufenthalt in der Nähe der Rohre zu einer Exposition führt.

Parmaksiz (2013) hat 26 Proben aus einem Geothermiekraftwerk auf die Aktivitätskonzentrationen von Kalium-40, Thorium-232 und Radium-226 untersucht. Die Aktivitätskonzentration in den flüssigen Proben war deutlich geringer als in den festen Rückständen. Die Aktivität vieler Rückstände lag für die Verwendung als Baumaterialien oberhalb der Grenzwerte. Die maximal gemessenen Aktivitäten in den festen Ablagerungen für K-40, Th-232 und Ra-226 betragen  $970 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $2388 \text{ Bq kg}^{-1}$  und  $2694 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Parmaksiz 2013). Diese Werte liegen deutlich oberhalb der natürlichen Konzentration in der Erdkruste (UNSCEAR 2000).

Cuenot et al. (2015) haben im Geothermiekraftwerk Soultz Kontaktmessungen an den Leitungen und Umgebungsmessungen vorgenommen. Es wurden Kontaktdosisleistungen von bis zu  $17,5 \mu\text{Sv h}^{-1}$  gemessen. Die durchschnittliche gefundene Ortsdosisleistung betrug  $0,44 \mu\text{Sv h}^{-1}$ .

Für einen Vergleich der Ortsdosisleistungen ist anzuführen, dass sich die natürliche Gamma-Ortsdosisleistung in Deutschland je nach lokalen Gegebenheiten zwischen  $0,05 \mu\text{Sv h}^{-1}$  und  $0,18 \mu\text{Sv h}^{-1}$  befindet (BfS 2020). Folglich kann die mögliche Dosisleistung für Personen innerhalb eines Geothermiekraftwerks die natürliche Dosisleistung um ein Vielfaches überschreiten.

Um eine mögliche erhöhte Belastung durch ionisierende Strahlung, wie sie auch bei anderen Energieträgern auftritt, zu erkennen und zu vermeiden, wird in dieser Arbeit eine Lebenszyklusanalyse in Bezug auf Radioaktivität bei der Nutzung von Windkraft erarbeitet.

Die bei der Nutzung von Windkraft durch ionisierende Strahlung auftretende Exposition wird berechnet und mit der Abschätzung von UNSCEAR verglichen (UNSCEAR 2016). Dies geschieht anhand des Materialbedarfs einer speziellen Windkraftanlage auf der Grundlage von veröffentlichten Rohdaten für verschiedene Produktionsschritte der jeweiligen Materialien. Die Berechnung orientiert sich bei der Wahl der Parameterwerte wie auch methodisch am UNSCEAR Bericht aus dem Jahr 2000.

Im nächsten Kapitel wird die Stromerzeugung mithilfe von Windkraft genauer beleuchtet. Neben den physikalischen Grundlagen für die Umwandlung von kinetischer Energie in elektrische Energie wird eine Windkraftanlage ausgewählt und eine radiologische Be-

trachtung der benötigten Materialien durchgeführt. Im darauffolgenden Kapitel werden die einzelnen Produktionsschritte betrachtet und die verwendete Methodik beschrieben. Anschließend wird die Kollektivdosis errechnet und die getroffenen Annahmen für die betrachteten Rohdaten erläutert. Im vierten Kapitel werden die Ergebnisse dargelegt, diskutiert und verglichen sowie Möglichkeiten zur Dosisreduktion vorgestellt. Das letzte Kapitel betrachtet die Exposition durch ionisierende Strahlung und radioaktive Stoffe für andere Technologien, die für eine komplett erneuerbare Stromproduktion ebenfalls relevant sind.

## 2 Windkraft

In diesem Kapitel werden die relevanten Grundlagen der Stromerzeugung am Beispiel eines bestimmten Typs von Windkraftanlagen behandelt. Im Folgenden wird zunächst der maximale Wirkungsgrad einer Windkraftanlage in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit betrachtet. Anschließend wird die Wahl der Windkraftanlage genauer diskutiert, die benötigten Materialien betrachtet und radiologisch eingeordnet.

### 2.1 Physikalische Grundlagen

Für die Erzeugung von Elektrizität mithilfe einer Windkraftanlage wird eine gerichtete Bewegung der Luft benötigt. Der benötigte Wind ist die Folge von unterschiedlichen Drücken sowie Temperaturen an verschiedenen Orten. Viele Faktoren beeinflussen den Temperatur- sowie Druckgradient, beispielsweise der Einstrahlwinkel der Sonne, Wasserflächen, die Bebauung oder atmosphärische Parameter (Osterhage 2015).

Eine Windkraftanlage wandelt diese kinetische Energie der Luft in elektrische Energie um. Die kinetische Energie ist gegeben über

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Vv^2. \quad (1)$$

Die maximale Leistung, die aus dem Wind gewonnen werden kann, wird beschrieben über

$$P_{\text{max}} = \frac{\partial E_{\text{kin}}}{\partial t} = \frac{E_{\text{kin}}}{t} = \frac{1}{2}\rho v^2 \frac{V}{t}. \quad (2)$$

Das Volumen der bewegten Luftmasse ist als beliebiger Zylinder über  $V = A \cdot s$  darstellbar. Durch die Division mit der Zeit wird die Geschwindigkeit zur dritten Potenz erhalten (Hau 2016).

$$P_{\text{max}} = \frac{1}{2}\rho v^2 Av = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3)$$

Die elektrischen und mechanischen Bauteile, die an der Umwandlung beteiligt sind, besitzen einen Wirkungsgrad. Die Bauteile wandeln die Energie nicht verlustfrei um, somit setzen sie die maximal entnehmbare Leistung herab. Dies wird berücksichtigt durch die Einführung eines Wirkungsgrades  $\eta$ . Daher ist diese, auch installierte Leistung genannt, gegeben durch

$$P_{\text{max}} = \eta \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (4)$$

Die kinetische Energie, die über die Rotoren aufgenommen wird, wird über einen Generator in elektrische Energie umgewandelt. Die elektrische Energie wird nach einer Stabi-



lisation mithilfe von Wechselrichtern in das Stromnetz eingespeist (Osterhage 2015).

Die installierte Leistung ist von der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit abhängig. Die Windgeschwindigkeit muss sich allerdings im richtigen Intervall befinden, sonst kommt die Stromproduktion zum Erliegen. Unterhalb von Windgeschwindigkeiten von  $4 \text{ m s}^{-1}$  reicht die kinetische Energie nicht aus, um eine Rotation der Rotorblätter zu erzeugen (BWE 2020a). Zwischen  $12 \text{ m s}^{-1}$  und  $25 \text{ m s}^{-1}$  werden leistungsbegrenzende Maßnahmen aktiv. Somit wird eine höhere Leistungsabgabe als die installierte Leistung verhindert und eine konstante Leistungsabgabe sichergestellt. Bei höheren Windgeschwindigkeiten als  $25 \text{ m s}^{-1}$  wird die Anlage, um Materialschäden zu vermeiden, abgeschaltet (BWE 2020a).

Der maximale theoretische Wirkungsgrad für Windkraftanlagen beträgt 59%. Das resultiert aus Überlegungen des Physikers Albert Betz von 1920 zur Leistungsentnahme. Er stellte die Überlegung auf, dass die Umwandlung der Energie über die Reduktion der Windgeschwindigkeit stattfindet. Folglich existiert ein Maximum der entnehmbaren Leistung. Findet keine Verzögerung des Windes statt, so wird keine Leistung entnommen. Ist die resultierende Windgeschwindigkeit allerdings zu gering, dann limitiert der verringerte Volumenstrom die entnehmbare Leistung. Laut Betz ist für eine relative Reduktion der Windgeschwindigkeit um  $2/3$  der Wirkungsgrad mit 59% maximal. Die Bezugspunkte der Geschwindigkeitsmessung sind hierbei vor und hinter der Rotorebene (BWE 2020b; Betz 1920; Hau 2016).

## 2.2 Wahl der Windkraftanlage

Es existieren verschiedene Konstruktionsarten und Größen von Windkraftanlagen. In dieser Arbeit wird eine getriebelose 3 MW Anlage betrachtet und die Kollektivdosis, die durch die Förderung und Verarbeitung der benötigten Materialien entsteht, berechnet.

Bei Neuinstallationen von Windkraftanlagen dominieren zwei Generator-Designs: die doppelt gespeiste Asynchronmaschine und der Direktantrieb. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass beim Direktantrieb das Getriebe entfällt, in Folge dessen entstehen geringere Wartungskosten und geringere Leistungsverluste (ARADEx 2020).

28% der weltweiten Neuinstallationen besitzen einen Direktantrieb. Dieses Generator-Design kann weiter in elektrisch erregte Synchronmotoren unterteilt werden, die Kupfer verwenden, und solche, die mithilfe von Permanentmagneten aus Seltenen Erden funktionieren. Für die Generatoren mit Seltenen Erden nehmen Ault et al. einen Anteil von 80% der Direktantriebe an (Ault et al. 2015).

In der vorliegenden Arbeit wird eine direktangetriebene 3 MW Windkraftanlage betrachtet. Dafür sind Daten für den Materialbedarf inklusive der Seltenen Erden publiziert (Jensen 2019). Die Anlagengröße ist realitätsnah, da die durchschnittliche Anlagengröße in Deutschland ungefähr 2 MW beträgt (BWE 2020c). Moderne Windkraftanlagen haben bereits eine installierte Leistung von bis zu 5 MW (Enercon 2020).

Von allen Windkraftanlagen sind die getriebelosen Anlagen mit Permanentmagneten radiologisch am relevantesten, da für die Permanentmagneten im Generator Metalle der Seltenen Erden benötigt werden. Sie ermöglichen hohe Magnetfelder trotz geringer Masse. Häufig sind die Seltenen Erden allerdings mit natürlich vorkommenden Radionukliden vergesellschaftet, z. B. mit Thorium-232 (Ault et al. 2015). Diese führen dann in Prozessen, in denen mit Seltenen Erden gearbeitet wird, zu der Exposition von Personen.

Jensen (2019) hat das Recyclingpotential eines 60 MW Windparks untersucht und dafür die benötigten Materialien zusammengestellt. Er betrachtete in der Veröffentlichung die verwendeten Komponenten einer 3 MW direktangetriebenen Windkraftanlage. Da in den benötigten Materialien für den Windpark von Jensen ebenfalls die Neodymmagneten aufgeführt sind, wird davon ausgegangen, dass der Windpark aus 20 getriebelosen Anlagen mit jeweils einer Leistung von 3 MW besteht. Die Massenanteile des Windparks sind in der Abb. 1 dargestellt. Die absoluten Zahlen des Datensatzes von Jensen (2019) befindet sich im Anhang in Tabelle 11.

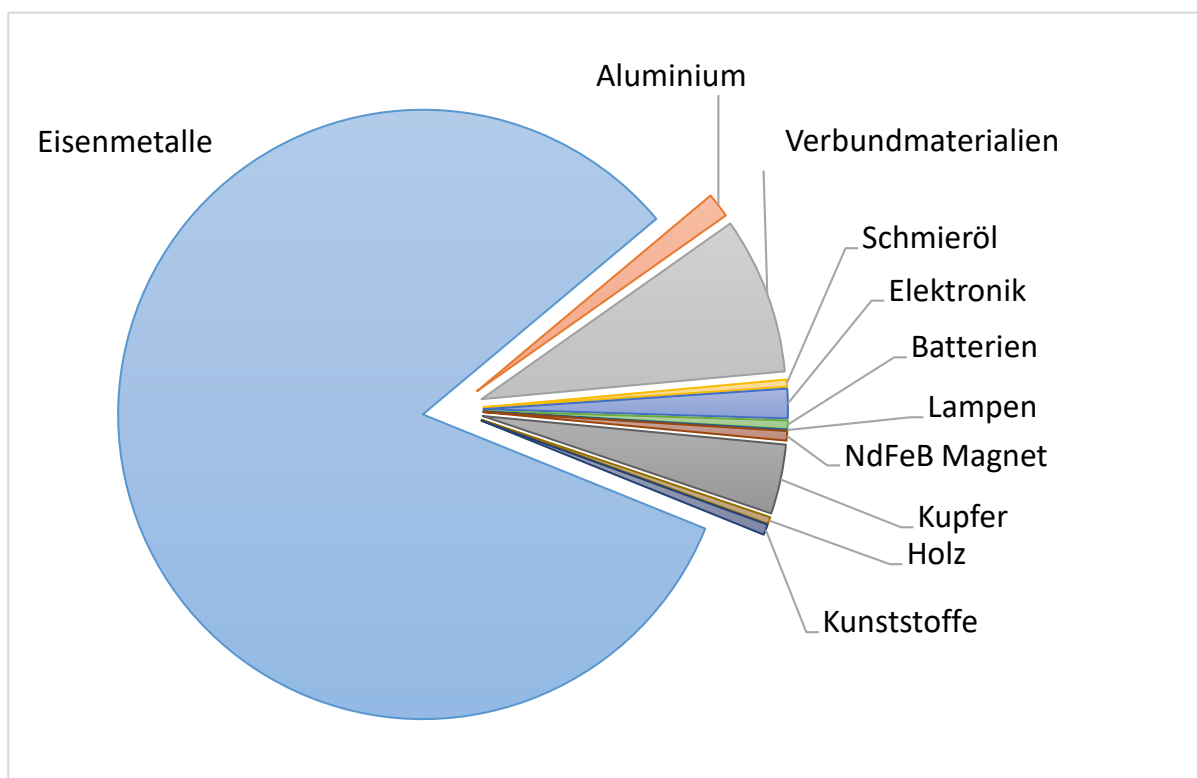


Abbildung 1: Massenanteile des untersuchten Windparks von Jensen et al.

### 2.3 Radiologische Betrachtung der Materialien

In dieser Arbeit werden die Eisenmetalle und die benötigten Seltenen Erden genauer betrachtet: die Eisenmetalle aufgrund des größten Massenanteils, die Seltenen Erden als Konsequenz der Vergesellschaftung mit natürlich vorkommenden Radionukliden. Insbesondere Neodym wird für den Magneten im Generator benötigt. Die genauen Quellen der Exposition befinden sich in der Rechnung. Für beide Materialien sind genügend Rohdaten vorhanden, um eine Produktionskette zu betrachten, siehe Kapitel 3. Dies ist nicht der Fall für Aluminium und Kupfer. Der anschließende Abschnitt soll darauf hinweisen, dass die nicht berücksichtigten Materialien radiologisch relevant sein könnten, allerdings aufgrund der unzureichenden Datenlage nicht berücksichtigt werden konnten.

Die für die Produktion von Aluminium relevante Bauxitverarbeitung ist eine Industrie, in der das natürlich auftretende radioaktive Material, kurz NORM, eine Rolle spielt. In der Veröffentlichung von Abbadly und El-Arabi wurde das NORM für einen ägyptischen Gewinnungsort untersucht. Abhängig von dem untersuchten Material wurde eine zusätzliche effektive Dosis aufgrund von externer Gammaexposition von  $8,5 \mu\text{Sv a}^{-1}$  bis  $409 \mu\text{Sv a}^{-1}$  für Arbeiter gemessen (Abbadly und El-Arabi 2006).

Für die Kupferproduktion spielt NORM ebenfalls eine Rolle. Eine typische Aktivitätskon-

zentration von Hilfstoffen (hier Kupferkonzentrat), die beim Abbau von Kupfer in einer Kupferlagerstätte anfallen, beträgt  $1430 \text{ Bq kg}^{-1}$  von U-238 und  $560 \text{ Bq kg}^{-1}$  von Th-232 (IAEA 2013). Weiterhin wurde ein Erzabbaugebiet für Kupfer und Gold in Armenien untersucht. Dort beträgt die zusätzliche effektive Dosis durch externe Gammaexposition pro Jahr, verglichen mit dem Kontrollgebiet, bis zu  $100 \mu\text{Sv a}^{-1}$  für die Bewohner der Region (Belyaeva et al. 2019).

Anzumerken ist, dass die Kunststoffe und das Schmieröl, die in der Windkraftanlage verwendet werden, auf Erdöl basieren und somit auf einer Industrie, in der NORM in verschiedenen Formen anfällt (IAEA 2006). Bei der Untersuchung einer Öl-Raffinerie wurden Proben von verschiedenen Materialien in unterschiedlichen Prozessschritten entnommen und die zusätzliche effektive Dosis pro Jahr über den Pfad der Inhalation für die Arbeiter berechnet. Sie betrug  $3,2 \text{ mSv}$  (W. F. Bakr 2010). In der Branche wurden daher Strategien erarbeitet, wie mit dem radioaktiven Material umzugehen ist. Das beinhaltet unter anderem die dosimetrische Überwachung, Fortbildung sowie den Schutz von Mitarbeitern (Cowie et al. 2008).

Um eine Einschätzung der effektiven Dosen vorzunehmen, werden diese mit den empfohlenen Dosisgrenzwerten bei einer geplanten Expositionssituation von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) verglichen. Für beruflich exponierte Personen beträgt der Grenzwert der jährlichen effektiven Dosis aus Tätigkeiten  $20 \text{ mSv}$ , für die Bevölkerung  $1 \text{ mSv}$  (ICRP 2007). Die ermittelten Dosen, für die in dieser Arbeit nicht betrachteten Materialien, liegen für beide Gruppen unterhalb der empfohlenen Grenzwerte der ICRP von 2007.

## 3 Rechnung

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit der zusätzlich auftretenden Kollektivdosis durch die Produktion und Verwendung einer Windkraftanlage. Es gliedert sich in die Beleuchtung von nicht im Hauptteil betrachteten Produktionsschritten, in die verwendete Methodik für die Erarbeitung der zusätzlichen Kollektivdosis und in die Berechnung der Unsicherheiten. Anschließend folgt die Berechnung der Kollektivdosis. In dieser werden die behandelten Datensätze sowie die daraus folgenden Ableitungen und Annahmen beschrieben. Schlussendlich wird eine nach Produktion gewichtete Kollektivdosis für die benötigten Materialien errechnet.

### 3.1 Annahmen bezüglich anderer Produktionsschritte

Eine Annahme, die in die Berechnung einfließt, ist, dass nur der Schritt der Produktion der Materialien im Lebenszyklus einer Windkraftanlage zu einer nennenswerten Exposition führt.

Ein Grund dafür ist unter anderem, dass sich im Betrieb keine Person der Bevölkerung sowie Personal in der Nähe aufhält. Zusätzlich findet keine Freisetzung von Radionukliden im Betrieb der Anlage statt.

In der Konstruktions- bzw. Stilllegungsphase einer Anlage sind Personen vor Ort und arbeiten mit den Materialien. Da allerdings die Aktivität des Großteils der verwendeten Materialien im Normalfall nicht relevant ist, wird angenommen, dass keine nennenswerte Exposition während der Konstruktion bzw. Stilllegung auftritt.

Die Lagerung der Materialien nach der Stilllegung wird in dieser Arbeit ebenfalls nicht betrachtet, denn das Lagern auf Halden sollte, aufgrund der geringen Aufenthaltsdauer der Beschäftigten, ebenfalls zu keiner relevanten Exposition führen. Angaben über die spezifische Aktivität der Neodymmagneten wurden nicht gefunden. Ist ein Vorgehen gemäß der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) nötig, sollte eine erneute Evaluation der hier getätigten Annahmen stattfinden. Ein weiterer Punkt ist, dass die genauen Bedingungen der Lagerung auf Deponien nicht klar sind. Unter der Annahme, dass sich die Materialien für eine Windkraftanlage, insbesondere die Neodymmagneten, unterhalb der Freigrenze befinden, handelt es sich nicht um die Freigabe radioaktiven Materials im juristischen Sinne, da die Materialien keiner Überwachung gemäß StrlSchV unterliegen.

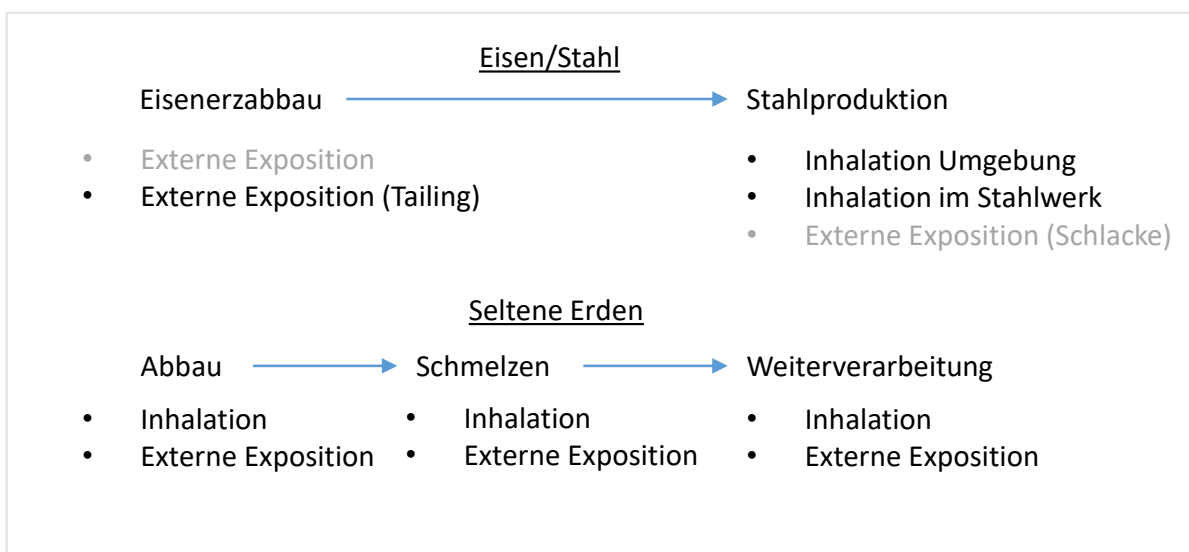
Weiterhin wird das Recycling von Materialien nicht berücksichtigt. Seltene Erden werden zu einem sehr niedrigen Anteil recycelt, bis 2011 weniger als 1% (Binnemans et al. 2013). Allerdings wird Stahlschrott für die Produktion von Stahl verwendet, jedoch ist

der Anteil der Eisenmetalle an der errechneten Kollektivdosis sehr gering. Daher ist der absolute Fehler aufgrund der Nichtberücksichtigung des Recyclings für die Eisenmetalle klein.

## 3.2 Methodik

Für die Berechnung der Kollektivdosis werden die behandelten Veröffentlichungen ausgewählten Produktionsschritten zugeordnet.

Betrachtet werden für die Eisenmetalle die Produktionsschritte des Eisenerzabbaus und die Stahlproduktion. Die Roheisenverhüttung wird aufgrund einer unzureichenden Datenlage nicht betrachtet. Für die Seltenen Erden wird der Abbau, das Schmelzen und die Weiterverarbeitung genauer untersucht. In Abbildung 2 werden die jeweiligen Produktionsketten inklusive der betrachteten Expositionspfade dargestellt.



**Abbildung 2:** Darstellung der betrachteten Produktionsschritte für Eisenmetalle und Seltene Erden. Für den jeweiligen Produktionsschritt sind Rohdaten für die aufgeführten Expositionspfade vorhanden. Für die ausgegrauten Expositionspfade sind ebenfalls Rohdaten vorhanden, allerdings entsteht keine zusätzliche Exposition nach Abzug des Hintergrunds für das betrachtete Expositionsszenario. Die ausgegrauten Rohdaten wurden aufgenommen von Isinkaye et al. (2018) und Sofilic et al. (2011).

Für jedes Rohdatenset, jeweils aufgeführt in dem Kapitel 3.3, wird die zusätzliche effektive Dosis pro Jahr für einen Erwachsenen berechnet. Die Rohdaten entsprechen den gemessenen oder ermittelten Aktivitätskonzentrationen der jeweiligen Autoren. Die Einzeldosisberechnungen der einzelnen Veröffentlichungen werden teilweise modifiziert, um eine vergleichbare Berechnung zu erhalten. Die Berechnung lehnt sich methodisch an den Bericht von UNSCEAR aus dem Jahr 2000 an (UNSCEAR 2000). Anschließend wird eine Gewichtung durchgeführt, um die unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Rohdaten zu berücksichtigen. Die jährliche Produktion der betrachteten Rohstoffgewinnungsanlage sowie die benötigten Materialien für eine 3 MW Windkraftanlage fließen in die Gewichtung ein. Zuletzt wird die gewichtete effektive Dosis mithilfe der Anzahl der exponierten Personen in eine Kollektivdosis umgerechnet. Neben dem angegeben allgemeinen Rechenweg für jedes Rohdatenset wird eine repräsentative Rechnung mit den Zahlenwerten ausgeführt.

$S$	gewichtete Kollektivdosis [manSv]
$S_a$	normierte Kollektivdosis [manSv GW <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]
$E$	zusätzliche jährliche effektive Dosis [mSv]
$E^*$	gewichtete zusätzliche jährliche effektive Dosis [mSv]
$N$	Anzahl der betroffenen Personen
$m$	für eine 3 MW Anlage benötigte Materialien [kg]
$M$	jährlich produzierte Menge des Materials [kg]
$P$	installierte Leistung der Anlage [GW]
$\eta$	Wirkungsgrad
$\tau$	Lebensdauer der Windkraftanlage [a]

Die gewichtete Kollektivdosis ergibt sich über:

$$E^* = \frac{E}{M} \cdot m \quad (5)$$

$$S = E^* \cdot N. \quad (6)$$

Die benötigten Materialien für eine 3 MW Anlage finden sich in Tabelle 17. Zu berücksichtigen ist, dass Neodymmagneten einen Massenanteil von 72 % Eisen haben (Binnemans et al. 2013). Daher wird für die benötigte Masse an Neodym für die Rechnung eine Korrektur mit dem Faktor 0,28 durchgeführt.

Im UNSCEAR Bericht (UNSCEAR 2016) wurde die erwartete zusätzliche Kollektivdosis abgeschätzt. Sie wurde auf die produzierte Leistung pro Jahr normiert. Um die Vergleich-

barkeit herzustellen, wird der hier erhaltene Wert ebenfalls darauf normiert.

$$S_a = \frac{S}{P \cdot \eta \cdot \tau} \quad (7)$$

Alle verwendeten Parameterwerte, inklusive genaueren Ausführungen, finden sich im Anhang in den Tabellen 16 bis 23.

Es ist anzumerken, dass aufgrund der Datenlage nicht für alle Expositionspfade Daten vorhanden sind. Der Expositionspfad der Ingestion wird in der Rechnung nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Tatsache, dass in den betrachteten geografischen Gebieten auch Personen wohnen, betrifft die effektive Dosis pro Jahr nicht nur Arbeitnehmer, sondern auch die dort wohnende Bevölkerung. Die unterschiedlichen Expositionsbedingungen der Personengruppen werden über eine unterschiedliche Expositionszeit, verschiedene Atemraten und verschiedene Dosiskoeffizienten in der Rechnung abgebildet. Für die Dosiskoeffizienten einer Inhalationsdosis wird die von den Autoren gewählte Partikelgröße sowie das Absorptionsverhalten übernommen. Eine Folgedosis für Erwachsene über 50 Jahre ist durch die Dosiskoeffizienten der ICRP (ICRP 2012) für den Inhalationspfad mit einkalkuliert.

Die Berücksichtigung einer Dosis durch eine Hintergrundaktivität wird für die Einzelquellen genauer erläutert. Im Falle, dass die Hintergrundaktivität höher ist als die gemessene Aktivität, wird der Dosisterm für das entsprechende Nuklid auf 0 gesetzt. Eine Konsequenz ist, dass nur positive Dosisbeiträge entstehen.

### 3.2.1 Berechnung der Unsicherheit

Die Berechnung des Minimal- und Maximalwerts für die zusätzliche effektive Dosis des jeweiligen Rohdatensets erfolgt über dieselbe Berechnung wie der Mittelwert, allerdings werden stattdessen die minimalen und maximalen Rohdatenwerte verwendet. Diese ergeben sich über die angegebene Standardabweichung vom Mittelwert in den Veröffentlichungen der Rohdaten.

Es wird keine Betrachtung einer Fehlerfortpflanzung nach Gauß getätigt. Stattdessen werden für die in der Gewichtung verwendeten Parameter Ober- und Untergrenzen angegeben. Das hat den Vorteil, dass keine symmetrischen Intervallgrenzen um den Parameterwert verwendet werden müssen. Die Zahlenwerte befinden sich inklusive einer kurzen Bemerkung im Anhang in den Tabellen 24 bis 26. Mit den Ober- und Untergrenzen der Parameter wird die Ober- und Untergrenze der Kollektivdosis berechnet. Die Berechnung erfolgt nach den Gleichungen 5 bis 7. Die Ober- und Untergrenzen werden so eingesetzt,



dass die größte Abweichung vom Mittelwert für die Kollektivdosis erhalten wird. Ist ein Wert aus einer Veröffentlichung entnommen, wird diesem keine Unsicherheit zugewiesen, da häufig keine Informationen dazu vorhanden sind.

### 3.3 Berechnung der Kollektivdosis

Die der Rechnung zugrunde liegenden Rohdaten wurden in verschiedenen Produktionsstätten erhoben. Genaue Angaben für die Werte der Parameter der Gewichtung des jeweiligen Standorts sind nicht vorhanden. Somit wird in der vorliegenden Arbeit ein generischer und zugleich konservativer Fall geschaffen.

Es spielen verschiedene Expositionspfade sowie unterschiedliche Nuklide für die Rohdaten eine Rolle. Zusätzlich betreffen die resultierenden Dosen Arbeiter sowie Personen aus der Bevölkerung, weshalb die jeweilige Expositionssituation an die Personengruppe angepasst wird.

Im folgenden Kapitel wird die berechnete zusätzliche jährliche effektive Dosis durch effektive Dosis und die gewichtete Kollektivdosis durch Kollektivdosis abgekürzt.

#### 3.3.1 Produktion von Eisenmetallen

##### 3.3.1.1 Tailing der Eisenerzförderung

Die Rohdaten (Tabelle 1) wurden aufgenommen von Zhuang et al. (2016). Die Autoren untersuchten für verschiedene geförderte Metalle das Tailing einer Erzförderanlage in der chinesischen Region Shangluo. Die in dieser Arbeit verwendeten Rohdaten entsprechen dem Datensatz für die Eisenerzförderung. Informationen über die Aktivität des Nebengesteins sind in der Veröffentlichung nicht vorhanden. Die Berücksichtigung des Nebengesteins ist eine mögliche Modifikation für eine zukünftige detailliertere Betrachtung.

Es wurden vier bis sechs Proben pro Metalltailing gesammelt. Diese wurden verkleinert, gewogen und getrocknet. Im Anschluss wurden die Proben luftdicht verschlossen und vier Wochen gelagert, um eine Gleichgewichtssituation zwischen den Nukliden zu erhalten. Mittels Gammaskopie wurde die Aktivitätskonzentration der natürlich vorkommenden Nuklide bestimmt.

In der Veröffentlichung (Zhuang et al. 2016) wurden verschiedene Parameter bestimmt, wie unter anderem die Energiedosis in Luft pro Stunde innerhalb eines geschlossenen Raums und die daraus folgende jährliche effektive Dosis. Allerdings ist die Grundlage der Berechnung, dass das vermessene Tailing als Baustoff für Häuser verwendet wird. Es ist schwierig abzuschätzen, wie viele Personen davon betroffen sind. Viele zusätzliche Annahmen für das Szenario sind nicht klar, wie beispielsweise Tailingmenge, Baustoffmenge, Personen pro Haushalt.

An dieser Stelle weicht die Berechnung der effektiven Dosis in der vorliegenden Arbeit

von der der Veröffentlichung ab. Es wird ein anderes Expositionsszenario betrachtet. Berechnet wird die effektive Dosis durch externe Gammaexposition für einen Angestellten, der sich auf dem Tailing aufhält. Die Ortsdosisleistung aufgrund natürlicher Bodenstrahlung wird berücksichtigt, indem von der gemessenen Aktivitätskonzentration die Hintergrundbodenkonzentration subtrahiert wird. Somit wird nur die zusätzliche effektive Dosis erhalten.

Es wird eine Aufenthaltsdauer auf dem Tailing von  $2 \text{ h d}^{-1}$  angenommen, wie sie bereits von Liu und Pan (2012) angenommen wurde. Weiterhin werden fünf Arbeitstage in 52 Kalenderwochen zur Berechnung verwendet. Die Dosiskoeffizienten für die externe Exposition sind im UNSCEAR Bericht (UNSCEAR 2000) zu finden.

Für Th-232 und U-238 sind die Dosiskoeffizienten für die jeweilige Zerfallsreihe unter der Voraussetzung gültig, dass sich die Nuklide in einer Gleichgewichtssituation befinden. Es wird angenommen, dass sich die Tochternuklide (z.B. Ra-226), aufgrund der geringen Halbwertszeiten der Tochternuklide bis Radium-226 im Vergleich zu Uran-238, im säkularen Gleichgewicht zu U-238 befinden. Folglich entspricht die Aktivität der Tochternuklide (z.B. Ra-226) der Aktivität des Mutternuklids (U-238). Daher ist es möglich, über die Aktivitätskonzentration von Ra-226 auf die Aktivitätskonzentration von U-238 zu schließen. Somit wird der Konversionsfaktor für die Uran-238 Zerfallsreihe hier für Radium-226, anstelle von Uran-238, verwendet. Allerdings ist anzumerken, dass zum Erreichen des Gleichgewichts eine Zeitspanne benötigt wird, die deutlich oberhalb der typischen technischen Prozessdauern liegt. Daher ist die Annahme des Gleichgewichts fehlerbehaftet. Für diese Berechnung spielt allerdings nur K-40 eine Rolle, da die Ra-226 sowie die Th-232 Aktivitätskonzentration niedriger als der Hintergrund ist.

$E$	effektive Dosis [mSv]
$C_i$	Aktivitätskonzentrationen im Boden [ $\text{Bq kg}^{-1}$ ]
$C_i^*$	Hintergrundbodenkonzentration [ $\text{Bq kg}^{-1}$ ]
$t$	Aufenthaltsdauer auf dem Tailing [ $\text{h d}^{-1}$ ]
$d_i$	Dosiskoeffizient für externe Exposition durch NORM [ $\text{nSv kg h}^{-1} \text{ Bq}^{-1}$ ]

Berechnung der effektiven Dosis durch NORM:

$$E = (d_{Th} \cdot (C_{Th} - C_{Th}^*) + d_{Ra} \cdot (C_{Ra} - C_{Ra}^*) + d_K \cdot (C_K - C_K^*)) \cdot t. \quad (8)$$

**Tabelle 1:** Angegebene Rohdaten für die Bodenproben des Tailingbeckens (Zhuang et al. 2016).

	Ra-226	Th-232	K-40
	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
Min	16,6	9,3	716,9
Max	31,7	17,9	762,3
Mittelwert	23,9	13,6	737,7

**Tabelle 2:** Durchschnittliche Hintergrundaktivität im Boden von China nach UNSCEAR 2000.

	Ra-226	Th-232	K-40
	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
Mittelwert	32	41	440

Berechnung des Mittelwerts der effektiven Dosis:

$$\begin{aligned}
 4,49 \cdot 10^{-3} \text{ mSv} &= (0 \cdot 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ Sv kg h}^{-1} \text{ Bq}^{-1} + 0 \cdot 0,46 \cdot 10^{-9} \text{ Sv kg h}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \\
 &+ (737,7 \text{ Bq kg}^{-1} - 440 \text{ Bq kg}^{-1}) \cdot 0,029 \cdot 10^{-9} \text{ Sv kg h}^{-1} \text{ Bq}^{-1}) \quad (9) \\
 &\cdot 10^3 \cdot 2 \text{ h d}^{-1} \cdot 260 \text{ d}.
 \end{aligned}$$

Die jährliche Produktion der Förderanlage war nicht gegeben. Sie wurde mit 1,36 Mt abgeschätzt. Der Wert orientiert sich an der Produktionsgröße eines Stahlwerks in Ägypten (Egyptian Steel 2020a). Er liegt zwischen der jährlichen Produktionsgröße des Stahlwerks ILVA in Tarent in Italien mit 12 Mt (Jia 2013) und des kleinsten Werts von 0,3 Mt für ein Stahlwerk in Ägypten (Egyptian Steel 2020b).

Das benötigte Material für eine 3 MW Windkraftanlage wurde aus der in Abschnitt 2.2 besprochenen Veröffentlichung von Jensen (2019) entnommen. Es wird eine Eisenmenge von 328 t für eine 3 MW Windkraftanlage benötigt, siehe im Anhang Tabelle 17. Dies entspricht ein Zwanzigstel des Eisenmetallbedarfs des 60 MW Windparks.

Um eine Kollektivdosis zu erhalten, wird die Anzahl der exponierten Personen benötigt, also wie viele Personen auf dem Tailing arbeiten. Diese Angabe ist nicht zu finden. Es wird mit einer Schätzung von 100 Personen gerechnet. Da es keinen Anhaltspunkt für den Zahlenwert der Schätzung gibt, ist die Unsicherheit dieses Wertes groß. Allerdings ist die effektive Dosis im Vergleich zu anderen Quellen sehr gering und somit der Einfluss auf das Gesamtergebnis nur in geringem Maß abhängig von der Personenanzahl.

Anzumerken ist, dass es für Einzelpersonen sehr wohl einen Unterschied machen kann, ob sie auf dem Tailing arbeiten, insbesondere bei höheren Dosen. Ein Arbeiter auf dem Tailing erhält im Vergleich zum vorherigen Arbeitsort eine erhöhte Dosis, in diesem Fall vor allem durch K-40. Daraus resultiert eine höhere Wahrscheinlichkeit für stochastische Strahlenschäden, die mit einer gewissen Latenzzeit auftreten können. Allerdings liegt die Strahlenbelastung von Einzelpersonen nicht im Fokus der Arbeit.

Schließlich ergibt sich eine gewichtete effektive Dosis und eine Kollektivdosis von

$$1,08 \cdot 10^{-9} \text{ Sv} = 4,49 \cdot 10^{-6} \text{ Sv} \cdot \frac{328 \text{ t}}{1,36 \text{ Mt}} \quad (10)$$

$$1,08 \cdot 10^{-7} \text{ manSv} = 1,08 \cdot 10^{-9} \text{ Sv} \cdot 100 \quad (11)$$

für den Produktionsschritt der Eisenerzförderung.

### 3.3.1.2 Nuklidfreisetzung Umgebung Stahlproduktion

Die wichtigsten Nuklide bezüglich der Emission bei der Stahlproduktion sind Blei-210 und Polonium-210 (Jia 2013). Die Aktivitätskonzentration dieser Nuklide wurde für die Umgebung des Stahlwerks ILVA in Tarent (Italien) von Jia (2013) untersucht. Dafür wurden Oberflächenbodenproben und Luftproben genommen und ausgewertet. Es wurde bevorzugt in Windrichtung geprobt. Die Bestimmung der Aktivitäten von Blei und Polonium wird detailliert in der Veröffentlichung beschrieben.

Für die Rechnung wird der Datensatz der Luftproben von Mai 2009 verwendet und für das Vergleichsgebiet der Datensatz von November 2008. Da Blei-210 ein Beta-Strahler und Polonium-210 ein Alpha-Strahler ist, ist die Inhalation ein wichtiger Expositionspfad (Jia 2013). Die Berechnung der Inhalationsdosis in der Veröffentlichung von Jia (2013) wird modifiziert, um eine einheitliche Berechnung der Dosen zu erhalten. Es werden zusätzlich die Aufenthaltsanteile der betroffenen Personen nach UNSCEAR (2000) in die Rechnung eingebunden.

$E$	effektive Dosis [mSv]
$B$	Atemrate [ $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ]
$F$	Aufenthaltsanteil innerhalb geschlossener Räume
$F_r$	Konzentrationsverhältnis innen/außen
$d_i$	Dosiskoeffizienten für die betrachteten Nuklide [ $\text{nSv Bq}^{-1}$ ]
$t$	Expositionsdauer im Jahr [d]
$C_i$	Aktivitätskonzentration in der Luft [ $\mu\text{Bq m}^{-3}$ ]
$C_i^*$	Aktivitätskonzentration Vergleichsgebiet [ $\mu\text{Bq m}^{-3}$ ]

Dosisberechnung:

$$E = ((C_{\text{Po}} - C_{\text{Po}}^*) \cdot d_{\text{Po}} + (C_{\text{Pb}} - C_{\text{Pb}}^*) \cdot d_{\text{Pb}}) \cdot B \cdot t \cdot ((1 - F) + F \cdot F_r). \quad (12)$$

**Tabelle 3:** Aktivitätskonzentration in der Luft, publiziert von Jia (2013).

	Umgebung Stahlwerk	Vergleichsgebiet
Po-210	$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$	$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Min	154	45,2
Max	564	51,8
Mittelwert	291	48,5

	Umgebung Stahlwerk	Vergleichsgebiet
Pb-210	$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$	$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
Min	618	382
Max	1 087	416
Mittelwert	812	399

Berechnung des Mittelwerts der effektiven Dosis pro Jahr durch Inhalation:

$$\begin{aligned}
 1,20 \cdot 10^{-2} \text{ mSv} &= ((291 \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-3} - 48,5 \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-3}) \cdot 4300 \cdot 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} \\
 &+ (812 \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-3} - 399 \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-3}) \cdot 5600 \cdot 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}) \quad (13) \\
 &\cdot 22,2 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \cdot 365 \text{ d} \cdot ((1 - 0,8) + 0,8 \cdot 0,3) \cdot 10^3.
 \end{aligned}$$

Eine grobe Abschätzung der jährlichen effektiven Dosis durch die Ingestion von pflanzlichen Produkten<sup>2</sup> sowie Blattgemüse wird im Anhang nach der Berechnungsgrundlage Bergbau (BfS 2010) getätigt. Berücksichtigt wird der Expositionspfad durch die Ablagerung von an Staub gebundenem Pb-210 und Po-210. Die Abschätzung ergibt eine zusätzliche jährliche effektive Dosis von 497  $\mu\text{Sv}$ . Allerdings betrifft diese Dosis in der Umgebung des Stahlwerks in Italien nur wenige bzw. hypothetische Personen. Die Ingestionsdosis ist eine grobe Abschätzung und wird im weiteren Verlauf der Arbeit nicht mit berücksichtigt.

Die jährliche Produktion des Stahlwerks ist angegeben mit 12 Mt (Jia 2013).

Für die Gewichtung ist zu berücksichtigen, wieviel Eisenerz für die gleiche Menge an Stahl benötigt wird. Laut der Wirtschaftsvereinigung Stahl (2020) werden ungefähr zwei Tonnen Rohstoffe für eine Tonne Stahl benötigt. Allerdings macht das Eisenerz nur rund eine Tonne der Rohstoffe aus. Somit wird die gleiche Menge an Eisenerz benötigt wie an Stahl produziert wird. Daher ist kein Korrekturfaktor erforderlich. Die zweite Tonne an Rohstoffen setzt sich zusammen aus etwa einer halben Tonne Kohle und Koks sowie einer halben Tonne Stahlschrott und Zuschlagstoffe. Die Exposition durch Kohle, Koks, Stahlschrott und Zuschlagstoffe wird nicht betrachtet.

Als betroffene Bevölkerung der Umgebung des Stahlwerks wird die Bevölkerung der an-

<sup>2</sup>ausgenommen Blattgemüse

liegenden Stadt Tarent angenommen. Der Zahlenwert ist angegeben mit 192 000 Personen (Jia 2013).

Es ergibt sich eine Kollektivdosis durch die Inhalation der Nuklide Pb-210 sowie Po-210 über die Gleichungen 5 & 6 von:

$$3,28 \cdot 10^{-10} \text{ Sv} = 1,20 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} \cdot \frac{328 \text{ t}}{12 \text{ Mt}} \quad (14)$$

$$6,30 \cdot 10^{-5} \text{ manSv} = 3,28 \cdot 10^{-10} \text{ Sv} \cdot 192\,000. \quad (15)$$

Zu diesen Rohdaten ist anzumerken, dass das Stahlwerk ILVA in Italien öffentlich kritisiert wurde, da die Emission von Feinstaubpartikeln, die der Gesundheit nicht zuträglich sind, sehr hoch war. Es sind viele Berichte in den Medien (Donadio 2013) sowie ein Bericht für das Europäische Parlament (Vagliasindi und Gerstetter 2015), aufgrund der anhaltenden Probleme über das Stahlwerk, vorhanden. Der Rohdatensatz wurde trotzdem verwendet, da davon ausgegangen werden kann, dass die Emission des Kraftwerkes bezüglich Blei und Polonium höher als für andere Stahlwerke ist. Somit wird das Expositionsrisiko nicht unterschätzt. Dies wird bestätigt durch Untersuchungen im Vereinigten Königreich von Crockett et al. (2003). Die abgeschätzten Individualdosen durch atmosphärische Freisetzungen der Stahlwerke in der Veröffentlichung sind alle niedriger als  $10 \mu\text{Sv}$ , insbesondere niedriger als die hier für das Stahlwerk ILVA berechnete Dosis von  $12 \mu\text{Sv}$ .

### 3.3.1.3 Staubinhalation im Stahlwerk

Khater und Wafaa F. Bakr (2011) haben in ihrer Veröffentlichung verschiedene Produkte bei der Stahlproduktion in Ägypten auf die Nuklide Blei-210 und Polonium-210 untersucht.

Es wurden 16 Proben von vier Stahlwerken genommen. Daraufhin wurden die Proben getrocknet, zerkleinert, homogenisiert und gesiebt. Die Konzentration von Blei-210 wurde über dessen Gamma-Strahlungsenergie mithilfe eines Germaniumdetektors bestimmt. Die Konzentration von Polonium-210 wurde nach radiochemischer Aufarbeitung der Probe über Alpha Spektrometrie erhalten (Khater und Wafaa F. Bakr 2011).

In der Veröffentlichung von Khater und Wafaa F. Bakr (2011) wurde eine potentielle Inhalationsdosis durch jede Probe errechnet. In der folgenden Rechnung geschieht dies nur für den Hochofenstaub. Er hat eine, im Vergleich zu den anderen Proben, hohe Aktivitätskonzentration. Weiterhin ist es wahrscheinlich, dass dieser im Gegensatz zu Waschrückständen, bei denen eine Staubbildung noch zusätzlich angenommen werden müsste, in die Lunge gerät.

Die genaue Berechnung in der Veröffentlichung (Khater und Wafaa F. Bakr 2011) wurde nicht angegeben, somit ist es möglich, dass die hier gewählte Berechnung abweicht. Der Wert der Staubkonzentration wird von  $0,1 \text{ mg m}^{-3}$  auf  $5 \text{ mg m}^{-3}$  angepasst. Dieser findet sich für die Exposition in Mineralien verarbeitenden Industrien im UNSCEAR Bericht (UNSCEAR 2000) wieder. Es wird für die Berechnung angenommen, dass die gesamte Staubkonzentration aus dem Hochofenstaub resultiert. Das ist in der Realität nicht der Fall, führt allerdings zu einer konservativen Abschätzung. Es wird eine erhöhte Atemrate von  $28,8 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  im Vergleich zu der Atemrate der Bevölkerung verwendet, da es beruflich exponierte Personen betrifft. Die Angestellten arbeiten 2000 Stunden im Jahr und sind über diese Zeit exponiert.

$E$	effektive Dosis [mSv]
$B$	Atemrate [ $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ ]
$c$	Staubkonzentration [ $\text{mg m}^{-3}$ ]
$t$	Arbeitsstunden im Jahr [h]
$d_i$	Dosiskoeffizient der betrachteten Nuklide [ $\text{nSv Bq}^{-1}$ ]
$C_i$	Aktivitätskonzentration [ $\text{Bq kg}^{-1}$ ]

Dosisberechnung:

$$E = (C_{\text{Pb}} \cdot c \cdot d_{\text{Pb}} + C_{\text{Po}} \cdot c \cdot d_{\text{Po}}) \cdot B \cdot 365 \cdot \frac{t}{8760}. \quad (16)$$

**Tabelle 4:** Rohdaten für den Hochofenstaub aus dem ägyptischen Stahlwerk. Auffällig ist das starke Ungleichgewicht zwischen den Aktivitätskonzentrationen des Bleis und des Poloniums. Dies ist eine Konsequenz der verschiedenen chemischen Eigenschaften der beiden Nuklide. Somit werden sie in unterschiedlichen Prozessen unterschiedlich angereichert oder abgereichert (Khater und Wafaa F. Bakr 2011).

	Pb-210	Po-210
Staub	Bq/kg	Bq/kg
Min	2 304	455
Max	2 376	485
Mittelwert	2 340	470



Berechnung der effektiven Dosis durch die Inhalation von Hochofenstaub:

$$\begin{aligned}
 2,84 \cdot 10^{-2} \text{ mSv} &= (2340 \text{ Bq kg}^{-1} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-3} \cdot 890 \cdot 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} + 470 \text{ Bq kg}^{-1} \\
 &\cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-3} \cdot 600 \cdot 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1}) \cdot 28,8 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \cdot 365 \text{ d} \\
 &\cdot \frac{2000 \text{ h a}^{-1}}{8760 \text{ h a}^{-1}} \cdot 10^3.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Im UNSCEAR Bericht(UNSCEAR 2000) wird für Deutschland eine natürlichen Konzentration in der Luft von bis zu  $2250 \mu\text{Bq m}^{-3}$  von Pb-210 und von bis zu  $80 \mu\text{Bq m}^{-3}$  von Po-210 angegeben. Allerdings wird für diese Rohdaten kein Hintergrund subtrahiert, denn die Inhalation von Blei-210 und Polonium-210 durch den Hochofenstaub exponiert zusätzlich zu der bereits natürlichen Exposition.

Es ist nicht angegeben, welche Stahlwerke konkret beprobt wurden. Gerechnet wird mit einer jährlichen Produktion von 1,36 Mt. Dies ist eine Angabe eines ägyptischen Stahlherstellers und liegt zwischen der kleinsten jährlichen Produktion (0,3 Mt) des Herstellers und der Produktion des Stahlwerks ILVA (12 Mt) (Egyptian Steel 2020a; Jia 2013).

Es ist ebenfalls keine Angabe über die Anzahl der Angestellten in den jeweiligen Stahlwerken vorhanden, daher wird hier ein Zahlenwert von 700 verwendet. Dies entspricht der größten Angestelltanzahl eines Stahlwerks eines ägyptischen Stahlherstellers (Egyptian Steel 2020a).

Resultierend ergibt sich eine Kollektivdosis durch die Inhalation der Nuklide nach Gleichungen 5 & 6 von:

$$6,85 \cdot 10^{-9} \text{ Sv} = 2,84 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} \cdot \frac{328 \text{ t}}{1,36 \text{ Mt}} \tag{18}$$

$$4,80 \cdot 10^{-6} \text{ manSv} = 6,85 \cdot 10^{-9} \text{ Sv} \cdot 700. \tag{19}$$

### 3.3.2 Produktion von Seltenen Erden

Den größten Anteil im Jahr 2011 mit 95 % an der Weltproduktion von Seltenen Erden besaß das Land China (Humphries 2013). Ungefähr die Hälfte aller Seltenen Erden aus China werden in Bayan Obo gefördert. Das ist eine Eisenmine, die die Seltenen Erden als Nebenprodukt fördert (Ault et al. 2015). Das Schmelzen der geförderten Erzmengen ist in der nahegelegenen Stadt Baotou lokalisiert. Beide Regionen, Bayan Obo und Baotou, liegen in dem gleichnamigen Verwaltungsgebiet der Stadt. Das Verwaltungsgebiet Baotou liegt im südlichen Teil der übergeordneten autonomen Region Innere Mongolei im Norden von China.

Für die Aufschlüsselung nach den Produktionsschritten werden alle Expositionen in Bayan Obo dem Abbau zugeordnet und alle Expositionen in Baotou dem Schmelzen. Der Weiterverarbeitung werden die Dosisbeiträge aus dem Abschnitt 3.3.2.3 zugeordnet.

#### 3.3.2.1 Inhalationsdosis durch Abbau und Verarbeitung

Der Erzabbau in Bayan Obo wurde von Lingqing Wang et al. (2016) beleuchtet. Die Autoren haben im Abbaugbiet der Mine Bayan Obo und im Schmelzgebiet Baotou die Konzentration der Schwebstoffe (TSP) gemessen. Es wurde weiterhin die Inhalationsdosis von 10 Freiwilligen aus einer Gemeinde in der Nähe der Mine und von 9 Freiwilligen aus einer Gemeinde in der Nähe des Schmelzgebiets genauer untersucht. Den Freiwilligen wurde eine Filtermaske (personal inhalation exposure sampler) aufgesetzt, welche PM<sub>10</sub> Proben<sup>3</sup> genommen hat.

Für die Berechnung der Inhalationsdosis wird der Datensatz der Filtermasken der Personen verwendet. Die Zahlenwerte des Datensatzes sind innerhalb der Veröffentlichung von Lingqing Wang et al. (2016) im Kapitel „Inhalationsexposition“ im Text aufgeführt.

Die Filtermasken wurden 24 Stunden in der Atemzone getragen. Von jeder Person wurden drei Proben an drei aufeinanderfolgenden Tagen genommen. Vor der Benutzung wurden die Filter im Muffelofen bei 450° für 4 Stunden gebacken, danach im Kühlschrank (2°) über 24 Stunden gekühlt. Über die Gewichtszunahme nach der Beprobung war es möglich, mithilfe des Luftdurchflusses auf die Konzentration zu schließen. Die beprobten Filter wurden kleingeschnitten, luftdicht verpackt, gemischt mit HNO<sub>3</sub>, HCl, HF und mithilfe des Muffelofens aufgeschlossen. Die Thorium Konzentration wurde mithilfe der ICP-MS<sup>4</sup> analysiert.

In der Veröffentlichung wird die jährliche effektive Dosis durch die Inhalation der ge-

---

<sup>3</sup>Partikel mit einem maximalen Durchmesser von 10 µm werden gefiltert

<sup>4</sup>inductively coupled plasma mass spectrometry

messenen Konzentrationen berechnet. Es wurde nur der Aufenthaltsanteil innerhalb geschlossener Räume angepasst. Der Wert für einen Erwachsenen wurde von 0,92 auf 0,8 verringert, da dieser Wert im UNSCEAR (2000) Bericht verwendet wird. Es wird eine Atemrate von  $22,2 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  für die Bevölkerung verwendet.

$E$	effektive Dosis [mSv]
$B$	Atemrate [ $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ ]
$F$	Aufenthaltsanteil innerhalb geschlossener Räume
$F_r$	Konzentrationsverhältnis innen/außen
$d$	Konversionsfaktor [ $\text{nSv Bq}^{-1}$ ]
$C_i$	Aktivitätskonzentration in der Luft [ $\text{mBq m}^{-3}$ ]

Dosisberechnung der Inhalationsdosis:

$$E = C_{\text{Th}} \cdot B \cdot 365 \cdot d \cdot ((1 - F) + F \cdot F_r). \quad (20)$$

**Tabelle 5:** Die über Filtermasken bestimmte Aktivitätskonzentration in der Luft, publiziert von Lingqing Wang et al. (2016)

	Bayan Obo $\text{mBq/m}^3$	Baotou $\text{mBq/m}^3$
Min	1,81	2,38
Max	11,62	11,82
Mittelwert	5,97	5,79

Berechnung des Mittelwertes der effektiven Dosis durch die Inhalation von Th-232 für das Erzabbaugebiet Bayan Obo:

$$0,532 \text{ mSv} = 5,97 \cdot 10^{-3} \text{ Bq m}^{-3} \cdot 22,2 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \cdot 365 \text{ d} \cdot 25\,000 \cdot 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} \cdot ((1 - 0,8) + 0,8 \cdot 0,3) \cdot 10^3. \quad (21)$$

Die Hintergrundinhalationsdosis durch spezifische Nuklide aus der Uran und Thorium Zerfallsreihe beträgt  $5,8 \mu\text{Sv}$  (UNSCEAR 2000). Hierfür berücksichtigt wurden die Nuklide U-238, U-235, U-234, Th-232, Th-230, Th-228, Ra-228, Ra-226 sowie Pb-210 und Po-210. Dies entspricht ungefähr 1% von dem errechneten Mittelwert. Die errechnete Dosis liegt durch Unsicherheiten im Intervall von 0,161 mSv bis 1,04 mSv. Da die Abweichungen im Vergleich zum Hintergrund sehr groß sind, wird der Hintergrund vernachlässigt.

Die aufgenommenen Aktivitätskonzentrationen in der Luft entsprechen den eingeatmeten Konzentrationen von repräsentativen Personen aus der Gesellschaft (Hiermit ist nicht

die repräsentative Person im Sinne des deutschen Strahlenschutzrechts gemeint). Daher betrifft die berechnete Dosis die jeweils dort wohnende Bevölkerung. Es sind keine offiziellen Zahlen für die beiden Regionen vorhanden, da das Staatliche Amt für Statistik der Volksrepublik China die Bevölkerungszahlen nur für die autonomen Regionen angibt. Angenommen werden für Bayan Obo 125 200 betroffene Personen. Diese Zahl wird erhalten durch die Subtraktion der Bevölkerung der einzelnen Distrikte in Baotou von der angegebenen Gesamtbevölkerung (Chinadaily 2020). Für die Stadt Baotou wird eine Einwohnerzahl von 1 722 800 verwendet. Diese Zahl ergibt sich aus der Summe der Einwohner für die Distrikte Kundulun, Qingshan und Donghe (Chinadaily 2020). Die Summe der drei Distrikte ist eine akkurate Näherung für die Einwohnerzahl, denn die Fläche der Bezirke deckt eine große Fläche der Stadt ab.

Die jährliche Produktion von Seltenen Erden der Mine ist angegeben mit 55 000 t (Ault et al. 2015). Für das Schmelzgebiet wurde keine Angabe gefunden. Es wird davon ausgegangen, dass das gesamte geförderte Erz im Schmelzgebiet verarbeitet wird. Dafür spricht, dass zwischen den beiden Regionen (149 km voneinander entfernt) eine Zugverbindung nur für den Transport von Erz eingerichtet ist. Die Züge fahren die Strecke 24 Stunden am Tag im ganzen Jahr. Die daraus folgenden Umweltauswirkungen des Transportes wurden untersucht von Lu Wang et al. (2018).

Die benötigte Masse an Neodym für eine 3 MW Windkraftanlage beträgt 560 kg, siehe Anhang Tabelle 17. Dafür wird ein Zwanzigstel der Masse der Neodymmagneten eines 60 MW Windparks aus der in Abschnitt 2.2 besprochenen Veröffentlichung von Jensen (Jensen 2019) verwendet. Da die Magneten aus einem Masseanteil von 72 % Eisen bestehen, wird zusätzlich eine Korrektur an der von Jensen erhaltenen Masse mit dem Faktor 0,28 durchgeführt (Binnemans et al. 2013).

Schließlich ergibt sich eine Kollektivdosis für Bayan Obo durch die Inhalation von Th-232 nach Gleichung 5 & 6 von:

$$5,42 \cdot 10^{-9} \text{ Sv} = 0,532 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} \cdot \frac{560 \text{ kg}}{55\,000\,000 \text{ kg}} \quad (22)$$

$$6,79 \cdot 10^{-4} \text{ manSv} = 5,42 \cdot 10^{-9} \text{ Sv} \cdot 125\,200. \quad (23)$$

### 3.3.2.2 Externe Gammaexposition durch das Tailing

In der Veröffentlichung von Li et al. (2016) wurden die Nuklidkonzentrationen auf dem Tailing, in der Nähe des Tailings und im Wohngebiet abgeschätzt. Dafür wurde ein tragbares Gamma-Spektrometer mit einem Szintillationsdetektor verwendet. Es wurden die Impulse von Kalium-40, Bismut-214 und Thallium-208 über die charakteristischen Gammaenergien berechnet. Über die Lösung einer Matrixgleichung wurden mithilfe der Konversionsfaktoren die Bodenkonzentration von Kalium-40, Uran-238 und Thorium-232 erhalten.

Die Datensätze wurden für das Erzabbaugebiet Bayan Obo und für das Schmelzgebiet Baotou aufgenommen. Zusätzlich wurden diese lokal noch genauer aufgelöst, d.h. eine Messreihe auf dem Tailing Becken, eine Messreihe in der Nähe des Tailing Damms und eine Messreihe im Wohngebiet. Die genauen Beprobungsorte sind in der Veröffentlichung in einer Übersichtskarte eingezeichnet. Die verwendeten Rohdaten für das Erzabbaugebiet sind in Tabelle 6 angegeben.

In der Veröffentlichung wird die jährliche effektive Dosis angegeben, allerdings ohne Angabe der Berechnung. In dieser Arbeit wird die effektive Dosis durch externe Gammaexposition berechnet. Die Dosiskoeffizient sind dem UNSCEAR (2000) Bericht entnommen. Für die Dosiskoeffizienten von Th-232 und U-238 wird, unter der Annahme eines Gleichgewichts, die gesamte Zerfallsreihe mit berücksichtigt. Allerdings ist diese Annahme in dem hier betrachteten Szenario fehlerbehaftet. Die benötigte Zeit, bis sich die Radionuklide in einer Gleichgewichtssituation befinden, ist im Vergleich zu technischen Prozessdauern sehr lang. Die ermittelten Aktivitätskonzentrationen sind eine Konsequenz des Abbaus von Erz. Somit ist davon auszugehen, dass eine Gleichgewichtssituation zwischen den Nukliden nicht unbedingt vorliegt. Um die erhaltene Dosis nicht zu unterschätzen, wird allerdings ein Gleichgewicht angenommen und die Dosiskoeffizienten verwendet. Die Hintergrundkonzentration der Nuklide im Boden wurde bereits in der Veröffentlichung von den Daten abgezogen.

Anzumerken ist, dass diese Veröffentlichung dieselben Regionen untersucht wie die Veröffentlichung von Lingqing Wang et al. (2016). Diese wurde in Abschnitt 3.3.2.1 behandelt.

Somit betrifft die festgestellte Exposition auch dieselben Personen.

$E$	effektive Dosis [mSv]
$d_i$	Dosiskoeffizient für externe Exposition durch NORM [nSv kg h <sup>-1</sup> Bq <sup>-1</sup> ]
$F_i$	Anteil des Elements im Boden [mg kg <sup>-1</sup> ]
$t$	Aufenthaltsdauer [h]
$A_{si}$	spezifische Aktivität [Bq mg <sup>-1</sup> ]
$M_r$	relative Atommasse
$T_i$	Halbwertszeit [a]
$f_i$	Häufigkeit im natürlichen Element

Dosisberechnung:

$$E_i = (F_i \cdot f_i \cdot A_{si}) \cdot d_i \quad (24)$$

$$E = (E_K + E_{Th} + E_U) \cdot t. \quad (25)$$

Für die Aufenthaltsdauer auf dem Tailing wurde dieselbe Dauer von 2 h d<sup>-1</sup> wie beim Tailing vom Eisenerz angenommen, siehe Abschnitt 3.3.1.1. Es wird davon ausgegangen, dass fünf Tage die Woche in 52 Wochen im Jahr gearbeitet wird.

$$t(\text{Tailing}) = 2 \text{ h d}^{-1} \cdot 260 \text{ d} = 520 \text{ h} \quad (26)$$

$$t(\text{Nähe Tailing}) = 2000 \text{ h} \quad (27)$$

$$t(\text{Wohngebiet}) = 8760 \text{ h} \quad (28)$$

Da in den Rohdaten nur die Konzentrationen für die Elemente angegeben sind, benötigt man die spezifische Aktivität der Nuklide, um auf die Aktivitätskonzentrationen zu schließen. Die spezifische Aktivität wurde errechnet über die Gleichung (Vogt und Schultz 2011):

$$A_{si} = \frac{1}{7,57 \cdot 10^{-17}} \frac{1}{M_r \cdot T_i}. \quad (29)$$

$M_r$  bezeichnet hierbei die relative Atommasse und  $T_i$  bezeichnet die Halbwertszeit des betrachteten Nuklids. Die verwendeten Zahlenwerte finden sich in Tabelle 21 im Anhang.

**Tabelle 6:** Errechnete Bodenkonzentrationen für die Elemente Th, U, K. Die Kaliumwerte aus den Rohdaten wurden von % in  $\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$  über die Formel  $F_{\text{neu}} = \frac{F}{100} \cdot 10^6 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$  umgerechnet. Ein weiterer Datensatz für Baotou Stadt wurde verwendet. Dieser befindet sich im Anhang in Tabelle 12. Publiziert von Li et al. (2016)

Bayan	Tailing	Nähe Tailing	Wohnbereich
Thorium	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Min	275,43	2,40	17,15
Max	276,57	81,6	35,25
Mittelwert	276	39,6	26,20

Bayan	Tailing	Nähe Tailing	Wohnbereich
Uran	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Min	5,13	1,34	2,78
Max	6,27	2,50	3,08
Mittelwert	5,70	1,92	2,93

Bayan	Tailing	Nähe Tailing	Wohnbereich
Kalium	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Min	19 800	25 000	28 800
Max	21 200	35 200	33 800
Mittelwert	20 500	30 100	31 300

Berechnung des Mittelwerts der effektiven Dosis für Personen, die sich ein Jahr im Wohngebiet von Bayan Obo aufhalten:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{Wohngebiet}} &= 0,769 \text{ mSv} \\
 &= [31\,300 \text{ mg kg}^{-1} \cdot 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot 265 \text{ Bq mg}^{-1} \cdot 0,029 \cdot 10^{-9} \text{ Sv kg h}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \\
 &\quad + (2,93 \text{ mg kg}^{-1} \cdot 0,9927 \cdot 12,4 \text{ Bq mg}^{-1}) \cdot 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ Sv kg h}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \\
 &\quad + (26,2 \text{ mg kg}^{-1} \cdot 1 \cdot 4,05 \text{ Bq mg}^{-1}) \cdot 0,46 \cdot 10^{-9} \text{ Sv kg h}^{-1} \text{ Bq}^{-1}] \\
 &\quad \cdot 10^3 \cdot 8760 \text{ h.}
 \end{aligned} \tag{30}$$

Die Mittelwerte der effektiven Dosen für Personen in der Nähe des Tailingdamms und auf dem Tailing in Bayan Obo für ein Jahr, mit der jeweiligen oben angegebenen Aufenthaltsdauer, ergeben:

$$E_{\text{Nähe}} = 0,225 \text{ mSv} \tag{31}$$

$$E_{\text{Tailing}} = 0,288 \text{ mSv.} \tag{32}$$

Die erhaltene Dosis wird für verschiedene Expositionsszenarien errechnet. Abhängig von der Tagesroutine der beruflich exponierten Person hält diese sich unterschiedlich lang in den jeweiligen Szenarien auf. Dies wird im Folgenden berücksichtigt:

Eine Person, die auf dem Tailing arbeitet, erhält für 520 Stunden<sup>5</sup> im Jahr die Dosis des Aufenthalts auf dem Tailing, für die restlichen 1480 Stunden<sup>6</sup> der Arbeitszeit die Dosis durch den Aufenthalt in der Nähe des Tailingdamms und für das restliche Jahr (6760 Stunden) die Dosis durch den Aufenthalt im Wohngebiet. Somit erhält diese Personengruppe eine effektive Dosis von:

$$E_{\text{ArbeitTailing}} = E_{\text{Tailing}} + \frac{1480 \text{ h}}{2000 \text{ h}} E_{\text{Nähe}} + \frac{6760 \text{ h}}{8760 \text{ h}} E_{\text{Wohngebiet}} \quad (33)$$

$$= 1,05 \text{ mSv}. \quad (34)$$

Eine Person, die in der Mine für Seltene Erden arbeitet, erhält für 2000 Stunden die Dosis des Aufenthalts in der Nähe des Tailingdamms und für das restliche Jahr (6760 Stunden) die Dosis durch den Aufenthalt im Wohngebiet. Somit erhält diese Personengruppe eine effektive Dosis von:

$$E_{\text{Arbeit}} = E_{\text{Nähe}} + \frac{6760 \text{ h}}{8760 \text{ h}} E_{\text{Wohngebiet}} \quad (35)$$

$$= 0,818 \text{ mSv}. \quad (36)$$

Für die betroffenen Personen in den jeweiligen Wohngebieten wurde die abgeschätzte Einwohnerzahl verwendet. Für Baotou beträgt diese 1 722 800 und für Bayan Obo beträgt diese 125 200. Der Ursprung der Zahlenwerte wurde im Abschnitt 3.3.2.1 bereits besprochen.

Nach Ault et al. (2015) arbeiten in der Mine von Bayan Obo 6000 Personen. Für Baotou ist keine Angabe vorhanden. Es wurde angenommen, dass in beiden Städten/Regionen die Bergbaubranche den gleichen relativen Anteil einnimmt. Somit wurde das gleiche Verhältnis zwischen Arbeitenden im Bergbau und Bewohnern für Baotou verwendet. Demzufolge ergibt sich für Baotou, dass 82 562 Personen in der Bergbaubranche tätig sind.

Über die Anzahl der Personen, die sich auf dem Tailing aufhalten, sind keine Angaben bekannt. Somit wird eine Zahl von 100 für Bayan Obo und 600 für Baotou angenommen. Die hohe Unsicherheit der Abschätzung findet sich in der Betrachtung der Unsicherheiten der gewählten Parameter wieder, siehe Anhang Tabelle 24 bis 26. Allerdings sind die aus der Aktivitätskonzentration im Boden des Tailings resultierenden Kollektivdosisbeiträge im Vergleich zum Gesamtergebnis relativ gering. Das Tailing in Baotou hat einen Anteil von 0,02 % an der summierten Kollektivdosis, siehe Tabelle 8.

<sup>5</sup>getroffene Annahme für die Aufenthaltsdauer auf dem Tailing, siehe Gleichung 26

<sup>6</sup>Subtraktion der Stunden auf dem Tailing von den Arbeitsstunden, siehe Gleichung 26 sowie 27



Für die jährliche Produktion wurde die Angabe von 55 000 t für beide Regionen verwendet. Die genaue Argumentation findet sich ebenfalls in Abschnitt 3.3.2.1.

Die Kollektivdosis wird nun für die jeweiligen Bevölkerungsgruppen berechnet. Da die auf dem Tailing arbeitenden Personen eine Untergruppe aller Angestellten in der Mine sind, wird für die Kollektivdosisberechnung die Anzahl der Arbeiter auf dem Tailing von der angenommenen Gesamtanzahl der Angestellten subtrahiert, um Doppelung zu vermeiden. Alle Angestellten in der Mine sind wiederum eine Untergruppe der dort wohnenden Bevölkerung, daher wird die Anzahl aller Angestellten für die Kollektivdosisberechnung von der betroffenen Bevölkerung subtrahiert. Dies ergibt eine Kollektivdosis für die nicht an der Mine angestellte Bevölkerung von

$$7,83 \cdot 10^{-9} \text{ Sv} = 0,769 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} \cdot \frac{560 \text{ kg}}{55\,000\,000 \text{ kg}} \quad (37)$$

$$9,33 \cdot 10^{-4} \text{ manSv} = 7,83 \cdot 10^{-9} \text{ Sv} \cdot (125\,200 - 6000 - 100). \quad (38)$$

### 3.3.2.3 Exposition durch die Weiterverarbeitung

Haridasan et al. (2008) haben die Exposition von Angestellten in einer Weiterverarbeitungsanlage von Seltenen Erden in Kerala (Indien) untersucht. Dafür wurde an verschiedenen Orten, an denen sich die Mitarbeiter aufhalten, die externe Gammaexposition vermessen. Es wurde ein Szintillationsdetektor verwendet, der auf 1 m Höhe positioniert wurde. Die Messungen wurden monatlich wiederholt.

Zusätzlich wurden Luftproben auf 1,5 m Höhe an verschiedenen Orten innerhalb der Fabrik genommen. Vermessen wurden die Proben 300 Minuten nach der Probenentnahme auf Töchter von Radon-220 und nach einem Monat, um die Alpha-Aktivität der langlebigen Nuklide abzuschätzen. Es wurde ein Gleichgewicht bis Radium-224 angenommen. Anschließend wurde, anstelle der Einzelbeiträge von Th-232, Th-228 und Ra-224, ein Aktivitätsäquivalent für Thorium-232 berechnet.

Mithilfe von alpha Spektrometrie wurde der PAEC Wert für die Töchter von Radon-220 bestimmt.

In der Veröffentlichung wird die zusätzliche effektive Dosis für beide Expositionspfade berechnet. Für den Expositionspfad der externen Gammaexposition sowie für die Inhalationsdosis durch die Radon Töchter ist die Berechnung nicht genau angegeben. Für die Inhalation von Thorium wird für die Berechnung eine Atemrate für Angestellte von  $28,8 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  verwendet.

In der Veröffentlichung von Haridasan et al. wurde die Gammaexpositionsratesrate aufgenommen. In den vorher betrachteten Veröffentlichungen wurde die effektive Dosis durch

externe Gammaexposition direkt über die Aktivitätskonzentration berechnet. Um in diesem Fall die externe Gammaexposition in eine effektive Dosis umzurechnen, wird ein Konversionsfaktor von  $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$  für die externe Exposition durch natürlich vorkommende Radionuklide für erwachsene Personen verwendet. Anzumerken ist, dass der Wert für den Konversionsfaktor genau genommen abhängig von der Energie der Strahlung ist. Allerdings wird in der vorliegenden Arbeit keine Anpassung vorgenommen und der obige Wert aus dem UNSCEAR Bericht (UNSCEAR 2000) übernommen.

Für die Umrechnung der PAEC in eine effektive Dosis wird der Umrechnungsfaktor von  $1,67 \text{ mSv WLM}^{-1}$  in der Veröffentlichung (Haridasan et al. 2008) auf  $5 \text{ mSv WLM}^{-1}$  erhöht. Der hier verwendete Umrechnungsfaktor wird im UNSCEAR (2000) Bericht aufgeführt und entspricht der aktuellen Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK 2017).

$E$	effektive Dosis [mSv]
$B$	Atemrate [ $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ ]
$\dot{D}$	Gammaexpositionrate [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ]
$d$	Konversionsfaktor [ $\text{Sv Gy}^{-1}$ ]
$d'$	Dosiskoeffizienten der betrachteten Nuklide [ $\text{nSv Bq}^{-1}$ ]
$C_i$	Aktivitätskonzentration in der Luft [ $\text{mBq m}^{-3}$ ]
$t$	Arbeitsstunden im Jahr [h]
$\dot{D}^*$	Hintergrundrate [ $\mu\text{Gy h}^{-1}$ ]
$u$	Dosiskonversionsfaktor [ $\text{mSv WLM}^{-1}$ ]
$J$	potentielle Alphaenergiekonzentration [mWL]

Berechnung der effektiven Dosis durch die Gammaexposition:

$$E = (\dot{D} - \dot{D}^*) \cdot t \cdot d. \quad (39)$$

Berechnung der effektiven Dosis durch die Inhalation von Thorium-232:

$$E = C_{\text{Th}} \cdot B \cdot 365 \cdot \frac{t}{8760} \cdot d'. \quad (40)$$

Berechnung der effektiven Dosis durch die Inhalation der Töchter von Radon-220:

$$E = J \cdot \frac{1}{2000} \cdot 170 \cdot \frac{1}{170} \cdot u \cdot 2000. \quad (41)$$

**Tabelle 7:** Erhobene Rohdaten von Haridasan et al. (2008).

Gammaexpositionsrates		
Min	0,30	$\mu\text{Gy/h}$
Max	0,80	$\mu\text{Gy/h}$
Mittelwert	0,50	$\mu\text{Gy/h}$
Hintergrund	0,15	$\mu\text{Gy/h}$

PAEC Töchter Rn-220		
Min	31	mWL/a
Max	51	mWL/a
Mittelwert	41	mWL/a

Aktivitätskonzentration in Luft von Th-232		
Min	2	$\text{mBq/m}^3$
Max	4	$\text{mBq/m}^3$
Mittelwert	3	$\text{mBq/m}^3$

Berechnung des Mittelwerts der Gammaexposition:

$$0,490 \text{ mSv} = (0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Gy h}^{-1} - 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ Gy h}^{-1}) \cdot 2000 \text{ h} \cdot 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} \cdot 10^3. \quad (42)$$

Berechnung des Mittelwerts der Inhalationsdosis durch Th-232:

$$0,209 \text{ mSv} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Bq m}^{-3} \cdot 28,8 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \cdot 365 \text{ d} \cdot \frac{2000 \text{ h a}^{-1}}{8760 \text{ h a}^{-1}} \quad (43)$$

$$\cdot 29\,000 \cdot 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} \cdot 10^3. \quad (44)$$

Berechnung des Mittelwerts der Inhalationsdosis durch die Rn-220 Töchter:

$$0,205 \text{ mSv} = 41 \cdot 10^{-3} \text{ WL a}^{-1} \cdot \frac{170 \text{ h}}{2000 \text{ h a}^{-1}} \cdot \frac{1 \text{ WLM}}{170 \text{ WL h}} \cdot 5 \text{ mSv WLM}^{-1} \cdot 2000 \text{ h}. \quad (45)$$

Anzumerken ist, dass der Hintergrund der Inhalationsdosis durch spezifische Nuklide der Uran und Thorium Zerfallsreihen  $5,8 \mu\text{Sv}$  beträgt. Hierfür berücksichtigt wurden die Nuklide U-238, U-235, U-234, Th-232, Th-230, Th-228, Ra-228, Ra-226 sowie Pb-210 und Po-210 (UNSCEAR 2000). Der Wert für die Inhalationsdosis durch Thorium-232 liegt im Intervall von  $0,139 \text{ mSv}$  bis  $0,278 \text{ mSv}$ . Da die Unsicherheit der Berechnung deutlich größer ist als der natürliche Hintergrund, wird dieser vernachlässigt.

Es ist keine Angabe über einen Hintergrund für die Messung der PAEC der Radon Töchter vorhanden. Aufgrund der höheren Dosis durch das Thorium-232 im Vergleich zum natürlichen Hintergrund, wird davon ausgegangen, dass die PAEC ebenfalls zusätzlich zum Hintergrund exponiert, da Th-232 nach einigen Kernzerfällen in die Töchter von Rn-

220 zerfällt.

In der Veröffentlichung von Haridasan et al. (2008) wird keine Angabe über die genaue Fabrik gemacht. Allerdings ist in der Veröffentlichung der Name des Unternehmens und der Ort der Anlage aufgeführt. Aufgrund derselben Lage und der Verarbeitung von hochreinen Seltenen Erden spricht vieles dafür, dass die untersuchte Fabrik der Anlage „Rare Earths Division Aluva“ entspricht. Dieser Anlage ist auf der Webseite des Unternehmens eine jährliche Produktion von  $3600 \text{ t a}^{-1}$  zugewiesen (IREL 2020b).

Da alle Rohdaten in derselben Fabrik aufgenommen wurden, betreffen die errechneten Dosen dieselben Personen. Die Anzahl der dort arbeitenden Personen ist nicht angegeben. In einem öffentlich zugänglichen Jahresbericht 17/18 des angegebenen Unternehmens (IREL 2020a) wird von einer Gesamtanzahl der Mitarbeiter von 1521 Personen gesprochen. Es sind vier laufende Anlagen auf der Webseite aufgeführt, somit wird angenommen, dass ein Viertel der Angestellten in der Weiterverarbeitungsanlage arbeitet. Es wird mit 380 betroffenen Personen gerechnet.

Somit ergibt sich eine Kollektivdosis für die Weiterverarbeitung durch die externe Gammaexposition von:

$$7,62 \cdot 10^{-8} \text{ Sv} = 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} \cdot \frac{560 \text{ kg}}{3\,600\,000 \text{ kg}} \quad (46)$$

$$2,90 \cdot 10^{-5} \text{ manSv} = 7,62 \cdot 10^{-8} \text{ Sv} \cdot 380. \quad (47)$$

## 4 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt, diskutiert und mit dem Befund des UNSCEAR Berichtes in Relation gesetzt. Eine kritische Auseinandersetzung mit der Methodik findet statt. Zusätzlich werden Möglichkeiten der Reduktion der Dosis betrachtet und besprochen.

### 4.1 Zentrale Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnung von Kapitel 3.3 werden nun beleuchtet. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Parameter, die Expositionspfade sowie die Dosisbeiträge der einzelnen Strahlungsquellen. Die Summe aller betrachteten Einzeldosisquellen ergibt eine

**Tabelle 8:** Übersicht für die einzelnen Dosisbeiträge, B für berufliche Exposition und P für eine Exposition der Bevölkerung. Der betrachtete Expositionspfad ist mit I für Inhalation und mit E für externe Exposition gekennzeichnet.

Name	Pfad	Art	Dosis mSv	Abschnitt <sup>a</sup>	Kollektivdosis <sup>b</sup> manSv
Eisentailing	E	B	4,49E-03	3.3.1.1	1,08E-07
Stahlproduktion Umgebung	I	P	1,20E-02	3.3.1.2	6,30E-05
Inhalation im Stahlwerk	I	B	2,84E-02	3.3.1.3	4,80E-06
Inhalation Bayan	I	P	5,32E-01	3.3.2.1	6,79E-04
Inhalation Baotou	I	P	5,16E-01	3.3.2.1	9,04E-03
Bayan Tailing	E	B	1,05E-00 <sup>c</sup>	3.3.2.2	1,07E-06
Bayan Nähe Tailing	E	B	8,18E-01 <sup>c</sup>	3.3.2.2	4,91E-05
Bayan Wohnbereich	E	P	7,69E-01 <sup>c</sup>	3.3.2.2	9,33E-04
Baotou Tailing	E	B	7,71E-01 <sup>c</sup>	3.3.2.2	4,71E-06
Baotou Nähe Tailing	E	B	4,68E-01 <sup>c</sup>	3.3.2.2	3,91E-04
Baotou Wohngebiet	E	P	4,75E-01 <sup>c</sup>	3.3.2.2	7,94E-03
Weiterverarbeitung	E	B	4,90E-01	3.3.2.3	2,90E-05
Weiterverarbeitung	I	B	4,14E-01	3.3.2.3	2,45E-05
<b>Summe</b>					1,92E-02

<sup>a</sup> Abschnitt in dem die Rohdaten, Berechnung und Annahmen besprochen werden.

<sup>b</sup> Gewichtet nach Gleichung 5.

<sup>c</sup> Dargestellt sind die effektiven Dosen für die betroffenen Personengruppen.

Kollektivdosis von  $1,92 \cdot 10^{-2}$  manSv. Die Kollektivdosis wird normiert mithilfe der effektiven Leistung. Dafür wird der Wirkungsgrad benötigt, der über die Angaben des BMWi (2020) bezüglich Windkraft errechnet wird. Angegeben ist die installierte Leistung und

die produzierte Energie für Deutschland aus dem Jahr 2018.

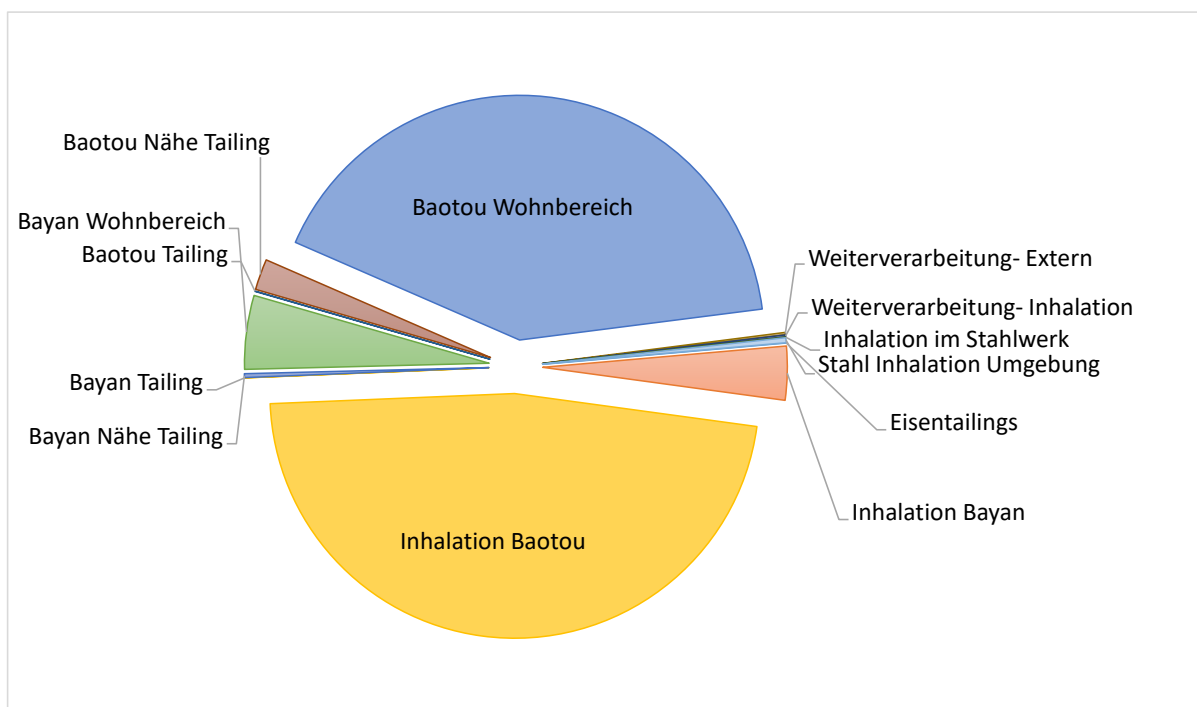
$$\begin{aligned}
 P_{\text{inst}} &= 58,9 \text{ GW} \\
 E_{\text{prod}} &= 110 \text{ TW h} \\
 \eta &= \frac{E_{\text{prod}}}{P_{\text{inst}} \cdot 8760 \text{ h}} = \frac{110\,000 \text{ GW h}}{515\,964 \text{ GW h}} = 0,21
 \end{aligned}
 \tag{48}$$

Anzumerken ist, dass der Wirkungsgrad einer Windkraftanlage stark standortabhängig ist. Dieses Problem wird durch Mittelung über ganz Deutschland und über ein ganzes Jahr verringert. Laut Jensen (2019) liegt die Lebensdauer einer Anlage im Bereich von 20 bis 25 Jahren, somit wird ein Wert von 22,5 Jahren verwendet. Die Normierung nach Gleichung 7 ergibt eine normierte Kollektivdosis von:

$$1,35 \text{ manSv GW}^{-1} \text{ a}^{-1} = \frac{1,92 \cdot 10^{-2} \text{ manSv}}{3 \cdot 10^{-3} \text{ GW} \cdot 0,21 \cdot 22,5 \text{ a}}.
 \tag{49}$$

Die errechnete Kollektivdosis verteilt sich auf 2 041 810 Personen. Es wird berücksichtigt, dass die betrachteten Veröffentlichungen teilweise dieselben Regionen untersucht haben, um eine Doppelzählung zu vermeiden.

An dieser Stelle fällt auf, dass die größten Anteile der Kollektivdosen auf die Strahlungs-



**Abbildung 3:** Aufschlüsselung der Kollektivdosis in die Einzelanteile.

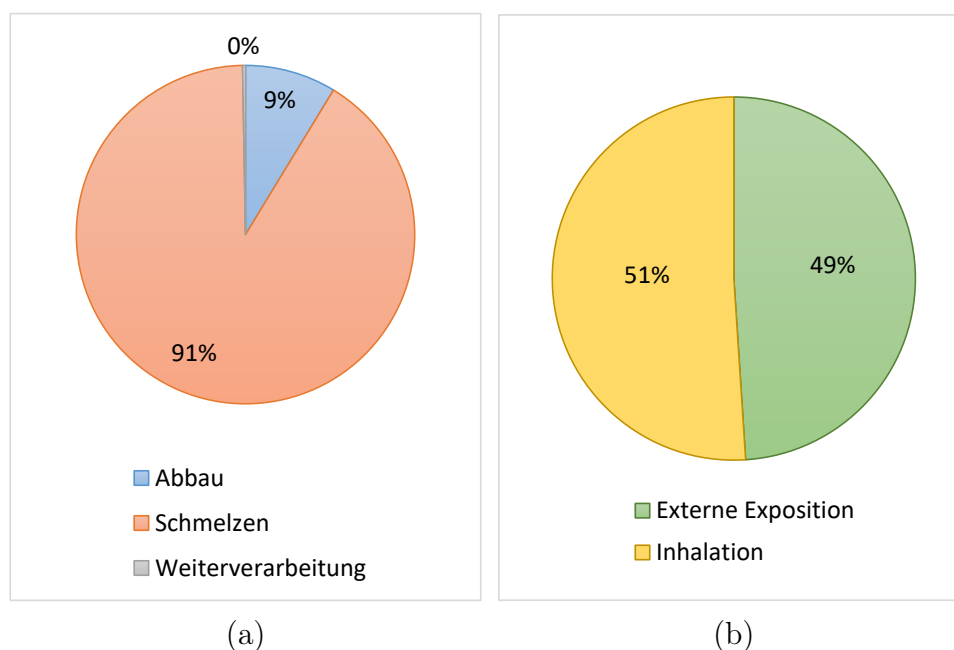
quellen zurückzuführen sind, die in Wohngebieten exponieren. Die Inhalationsdosis im Schmelzgebiet (Baotou) und die externe Gammaexposition im Wohngebiet von Baotou führen zu den größten Kollektivdosen. Summiert ergeben sie einen Anteil von mehr als

75 %, siehe Abbildung 3.

Die nächstgrößeren Anteile sind die externe Gammaexposition vom Wohngebiet in Bayan Obo und die Inhalationsdosis im Erzabbaugebiet (Bayan Obo). In Bayan Obo ist ebenfalls eine hohe Anzahl Personen exponiert. Eine Aufschlüsselung des Zahlenwerts der Kollektivdosis nach der exponierten Personengruppe findet sich im Anhang in Tabelle 14. Die Kollektivdosis, die beruflich Exponierte betrifft, ist um zwei Größenordnungen geringer als die Kollektivdosis, die durch die Exposition der Bevölkerung entsteht. In den Abbildungen 9 und 10 im Anhang ist die Aufteilung der jeweiligen Kollektivdosen dargestellt.

Wird nun der Anteil des einzelnen Materials betrachtet, so fällt auf, dass der Großteil der Kollektivdosis auf die Förderung und Verarbeitung von Seltenen Erden zurückzuführen ist. Sie wird in Abbildung 4a nach den Produktionsschritten aufgeschlüsselt. Der Großteil der Kollektivdosis fällt im Schmelzvorgang an. Darüber hinaus ist der resultierende Anteil durch die externe Exposition ungefähr genauso groß wie der Anteil durch die Inhalation für die aus der Verwendung von Seltenen Erden resultierende Kollektivdosis, siehe Abbildung 4b.

Die Eisenmetalle besitzen einen Anteil von ungefähr 0,4 % an der gesamten Kollektivdosis.



**Abbildung 4:** (a): Aufteilung der durch die Verwendung von Seltenen Erden resultierenden Kollektivdosis in die einzelnen Produktionsschritte. Die Prozentangaben sind gerundet.

(b): Aufteilung der durch die Verwendung von Seltenen Erden resultierenden Kollektivdosis anhand der Expositionspfade.

Im UNSCEAR Bericht aus dem Jahr 2016 wird die zusätzliche normierte berufliche Kollektivdosis für die Windenergie durch den Erzabbau und dessen Verarbeitung abgeschätzt. Es wurde von einem 25 MWe Windpark mit einem Wirkungsgrad von 24 % und einer Lebensdauer von 20 Jahren ausgegangen. Die betrachteten Materialien sind Stahl und Beton. Die Gegenüberstellung der errechneten Werte findet sich in den Tabellen 9 und 10.

Der in dieser Arbeit errechnete Wert für die berufliche Exposition durch den Erzabbau und die Verarbeitung entspricht ungefähr 35 % des abgeschätzten Werts von UNSCEAR (2016). Jedoch findet im UNSCEAR Bericht keine Abschätzung der Kollektivdosis für die Bevölkerung statt. Innerhalb der vorliegenden Arbeit macht diese Kollektivdosis den größten Anteil der gesamten Kollektivdosis aus. Wird nun die Summe der die Bevölkerung betreffenden Kollektivdosis sowie der Kollektivdosis für beruflich Exponierte betrachtet, so ist sichtbar, dass der errechnete Wert der Kollektivdosis im Vergleich zur Kollektivdosis aus dem UNSCEAR Bericht um ungefähr einen Faktor 13 höher liegt.

Verglichen mit den anderen aufgeführten Technologien ist die berechnete Kollektivdosis nach der Kollektivdosis für die Solarenergie, die zweit geringste. Die Kollektivdosis der Kernkraft ist um ungefähr einen Faktor 3,7 und die Kollektivdosis der Kohlekraft im Vergleich zu der errechneten Kollektivdosis für die Windenergie ungefähr um einen Faktor 10 höher.

Wird allerdings nur die Kollektivdosis betrachtet, die durch die Förderung und Verwendung der Materialien sowie durch die Exposition der Bevölkerung entsteht (Zwischensumme in Tabelle 10), so ist die Kollektivdosis für die Windkraftanlage am zweit höchsten. Nur die resultierende Kollektivdosis für ein älteres Kohlekraftwerk übertrifft den errechneten Wert.

Die berechnete normierte Kollektivdosis liegt unter Berücksichtigung der Unsicherheiten im Intervall von  $3,75 \cdot 10^{-1} \text{ manSv GW}^{-1} \text{ a}^{-1}$  bis  $4,10 \text{ manSv GW}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Das Intervall schließt den Wert der Kollektivdosis für die Solarenergie mit ein, allerdings nicht den von UNSCEAR abgeschätzten Wert für die Windenergie.



**Tabelle 9:** Gegenüberstellung der errechneten Kollektivdosis und der Abschätzung vom UNSCEAR 2016 Bericht.

	Windenergie, UNSCEAR	Windenergie, errechnet
	manSv/(GW a)	manSv/(GW a)
Kollektivdosis Materialien <sup>a</sup>	1E-01	3,56E-02
Kollektivdosis Bevölkerung <sup>b</sup>	/ <sup>c</sup>	1,32E+00
<b>Summe</b>	1E-01	1,35E+00

**Tabelle 10:** Gegenüberstellung der errechneten Werte für Windkraft mit Abschätzungen anderer Technologien aus dem UNSCEAR 2016 Bericht.

Dosis manSv GW <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	Solarenergie	Kernkraft	Kohlekraft, modern	Kohlekraft, alt	Windkraft, errechnet
Kollektivdosis Materialien <sup>a</sup>	8,00E-01 <sup>d</sup>	2,00E-01	1,00E-02	1,00E-02	3,56E-02
Kollektivdosis Bevölkerung <sup>b</sup>	/ <sup>e</sup>	4,30E-01	7,00E-01	1,40E+00	1,32E+00
<b>Zwischensumme</b>	8,00E-01	4,50E-01	7,10E-01	1,41E+00	1,35E+00
Kollektivdosis Personal <sup>c</sup>	/ <sup>f</sup>	4,50E+00	1,10E+01	1,10E+01	/ <sup>g</sup>
<b>Summe</b>	8,00E-01	4,95E+00	1,17E+01	1,24E+01	1,35E+00

<sup>a</sup> Betrachtet wird hier nur die berufliche Exposition durch den Erzabbau und die Verarbeitung.

<sup>b</sup> Dies sind alle Kollektivdosisbeiträge, die zu einer Exposition der Bevölkerung führen (inklusive Betrieb für konventionelle Kraftwerke). Nicht berücksichtigt sind global zirkulierende Nuklide.

<sup>c</sup> Enthalten ist die Kollektivdosis für das Personal im laufenden Betrieb. Für die Kernkraft ist zusätzlich die Kollektivdosis durch die Stilllegung mit berücksichtigt.

<sup>d</sup> Für die Solarenergie wurden Seltene Erden als Material in der Berechnung mit berücksichtigt.

<sup>e</sup> Im UNSCEAR (2016) Bericht wurden für die Technologien nur die radiologisch relevanten Anteile untersucht. Für Wind- und Solarenergie ist dies die Dosis durch den Abbau von Metallen. Es sind keine konkreten Angaben vorhanden, warum das nicht die Bevölkerung betrifft.

<sup>f</sup> Keine Angabe im UNSCEAR Bericht.

<sup>g</sup> Wird in dieser Arbeit nicht genauer betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass keine Exposition stattfindet, siehe Abschnitt 3.1.

Ein wichtiger Punkt ist, dass bei konventionellen Kraftwerken die Angestellten sowie Personen aus der Bevölkerung im laufenden Betrieb am Kraftwerksstandort exponiert werden. Diese Personen profitieren allerdings auch vom Nutzen der Technologie, der Stromproduktion vor Ort. Das ist für eine Windkraftanlage nicht gegeben. Die Exposition und der Nutzen sind geografisch entkoppelt. So findet der Großteil der Exposition durch Seltene Erden im Ausland statt. Somit werden andere Personen exponiert als die, die von der Technologie profitieren. Dies ist kritisch, denn die Personen vor Ort in Deutschland, die über den Bau und Betrieb einer solchen Anlage entscheiden, müssen die radiologischen Risiken nicht tragen. Das kann Einfluss auf die Entscheidung und Rechtfertigung einer Anlage haben.

Eine Betrachtung der effektiven Dosis durch die Rohdaten vor der Gewichtung (Übersicht in Tabelle 8) zeigt auf, dass die Expositionen für Erwachsene im Vergleich zur natürlichen Exposition von 2 mSv relevant sind. Für die Betrachtung anderer Altersgruppen ist unter anderem eine Modifikation der Dosiskoeffizienten nötig, daher lässt sich keine Aussage ableiten.

Die Beprobung der Tailingproben sowie auch der Luftproben für die Förderung von Seltenen Erden wurde im selben Gebiet (Bayan Obo bzw. Baotou Stadt) ausgeführt. Somit betreffen beide Expositionen dieselbe Bevölkerung. Die Addition beider Expositionspfade führt in Bayan Obo zu der Überschreitung des Grenzwertes einer geplanten Expositionssituation von 1 mSv für die Bevölkerung (ICRP 2007). Nach Summieren der Dosen beider Expositionspfade (Inhalation und externe Exposition) erhält die Bevölkerung dort eine jährliche effektive Dosis von ungefähr 1,3 mSv. Für den Stadtbereich von Baotou ergibt sich durch die Betrachtung beider Expositionspfade eine jährliche effektive Dosis von 0,99 mSv. Es ist zu berücksichtigen, dass der Expositionspfad der Ingestion nicht betrachtet wird, wodurch eine Unterschätzung der Exposition möglich ist. Der Grenzwert für beruflich exponierte Personen durch Tätigkeiten von 20 mSv aus den Empfehlungen der ICRP (2007) wird unter den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen in keiner Region überschritten.

## 4.2 Auseinandersetzung mit Methodik und Ergebnis

Im Verlauf dieses Abschnittes werden wichtige Aspekte aufgeführt, die bei einer Interpretation des Ergebnisses dieser Arbeit mit berücksichtigt werden sollten.

In der vorliegenden Arbeit werden die Kollektivdosen nur einem Rohstoff zugeordnet. Das entspricht nicht der Realität, denn die Mine in Bayan Obo fördert beispielsweise größtenteils Eisen und als Nebenprodukt die Metalle der Seltenen Erden (Ault et al. 2015). Eine Modifikation des hier verwendeten Modells wäre für eine genauere Berechnung notwendig.

Des Weiteren wird in dieser Arbeit mit Rohdaten von anderen Veröffentlichungen gearbeitet. Das Ergebnis ist somit abhängig von der Qualität der erhobenen Daten und von der Anzahl der veröffentlichten Datensätze. Es sind nicht viele Veröffentlichungen vorhanden, die relevante Datensätze für diese Arbeit geliefert haben. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die Datensätze für die jeweiligen Produktionsschritte repräsentativ sind, da kaum andere Vergleichsdaten vorhanden sind. Zusätzlich ist die Berechnung der resultierenden Dosen in den jeweiligen Veröffentlichungen nicht immer angegeben, so dass ein Vergleich der Methodik mit den von den Autoren gewählten Methoden nicht immer möglich war.

Außerdem sind die anderen Parameter für die Gewichtung, beziehungsweise die genauen Bedingungen der Exposition, häufig nicht angegeben. Somit werden im Laufe der Arbeit viele Annahmen getroffen, um einen möglichst allgemeinen sowie konservativen Fall zu betrachten. Der Zahlenwert der Kollektivdosis ist nur im Rahmen der getätigten Annahmen aussagekräftig.

Die Normierung der Kollektivdosen für eine Windkraftanlage wird in dieser Arbeit für den Vergleich zu der bereits abgeschätzten Dosis getätigt. Aufgrund der Tatsache, dass die Kollektivdosis nur durch die Beschaffung der Materialien entsteht, findet die Exposition nur einmal statt. Dies geschieht vor dem Aufbau der Windkraftanlage. Es ist dafür nicht relevant, wie viel Energie diese Windkraftanlage produziert und wie lange sie in Betrieb ist. Das unterscheidet die Windkraftanlagen von konventionellen Kraftwerken.

Ein wichtiger Punkt ist, dass bei der Betrachtung einer Kollektivdosis der Zahlenwert sehr stark von der Anzahl der exponierten Personen abhängig ist. Die meisten exponierten Personen in dieser Arbeit sind in den Abbaugebieten der Seltenen Erden in China zu finden. Allerdings ist die Bevölkerungszahl der jeweiligen Gebiete unsicher. Das staatliche Amt für Statistik der Volksrepublik China hat in den jährlichen Untersuchungen die Personenanzahl nur für die Provinzen untersucht. Somit sind die verwendeten Zahlen

inoffizielle Angaben.

Ergänzend ist zu erwähnen, dass es sich in der vorliegenden Arbeit um eine konservative<sup>7</sup> Rechnung handelt. Konservative Annahmen sind unter anderem die Gleichgewichtssituation der Radionuklide für die externe Gammaexposition (Kapitel 3.3.1.1 und 3.3.2.2), die Berücksichtigung des Datensatzes eines Stahlwerks mit erhöhter Feinstaub Emission (Kapitel 3.3.1.2) sowie die Annahme, dass die gesamte Staubkonzentration im Stahlwerk durch den betrachteten Hochofenstaub resultiert (Kapitel 3.3.1.3). Zudem sind die Kollektivdosen für die anderen Bauarten einer Windkraftanlage deutlich geringer, da dort keine Seltenen Erden verwendet werden und die Verwendung der Metalle der Seltenen Erden den Großteil der Kollektivdosis ausmacht.

Weiterhin ist der Vergleichswert nicht optimal gewählt, denn im UNSCEAR (2016) Bericht wird eine andere Bauart der Windkraftanlage und somit keine Seltenen Erden betrachtet. Der Großteil der Kollektivdosis sowie der Großteil der Exposition der Bevölkerung ist in der vorliegenden Arbeit auf die Metalle der Seltenen Erden zurückzuführen. Daher ist eine Differenz zwischen der errechneten und der von UNSCEAR abgeschätzten Kollektivdosis zu erwarten. Die von UNSCEAR verwendeten Daten für den Materialbedarf wurden aufgenommen von White und Kulcinski (2000). Die Materialien für die Konstruktion wurden für den Windpark Buffalo Ridge in Minnesota zusammengestellt (White und Kulcinski 2000). Es wurde allerdings der gesamte Windpark mit 25 MWe betrachtet. Durch die Normierung ist der Zahlenwert unabhängig von der Anlagengröße, jedoch skaliert der Materialbedarf nicht unbedingt linear mit der Anlagengröße, wodurch eine Ungenauigkeit zu erwarten ist.

Abschließend ist anzumerken, dass für eine radiologische Einschätzung die Summe aller relevanten Expositionspfade betrachtet werden muss. Aufgrund der unzureichenden Datenlage ist dies nicht möglich, da nicht für alle Expositionspfade Rohdaten aufgenommen wurden. Somit wird in dieser Arbeit nur die externe Gammaexposition und die Inhalation betrachtet.

---

<sup>7</sup>Die berechnete Größe ist eine Obergrenze. Im Strahlenschutz sorgen konservative Berechnungen dafür, dass die erhaltene Dosis und somit die Risiken von ionisierender Strahlung nicht unterschätzt werden.

### 4.3 Möglichkeiten zur Dosisreduktion

Im folgenden Abschnitt werden Maßnahmen herausgearbeitet, die die errechnete Kollektivdosis einer Windkraftanlage verringern können. Die Maßnahmen zur Dosisreduktion sind relevant, denn es ergibt sich, dass ein Teil der Bevölkerung im Abbauggebiet Bayan Obo eine Exposition erfährt, die oberhalb des empfohlenen Grenzwerts liegt. Das Thema Strahlenschutz für den Menschen wird in den Empfehlungen der ICRP von 2007 detailliert erläutert. Die Kernaussagen der Empfehlungen finden sich in den dort formulierten Grundsätzen wieder.

Der erste Grundsatz der Rechtfertigung besagt, dass Änderungen der Exposition individuellen oder gesellschaftlichen Nutzen bringen müssen. Dieser Nutzen muss gegenüber dem verursachten Schaden überwiegen.

Im zweiten Grundsatz, dem Grundsatz der Optimierung des Schutzes, wird festgehalten, dass die Wahrscheinlichkeit der Exposition, Anzahl der exponierten Personen sowie der Dosiswert „unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Faktoren“ (ICRP 2007, S. 83) minimiert werden muss.

Der dritte Grundsatz betrifft die Dosisgrenzen. Die Dosisgrenzwerte sind für jede Person für geplante Expositionen einzuhalten. Davon ausgenommen sind medizinische Expositionen.

Ein Abwägen des Schadens gegenüber dem Nutzen findet in dieser Arbeit nicht statt. Allerdings wird mit dem Überschreiten des Dosisgrenzwerts für die Bevölkerung ein Grundsatz verletzt. Die Optimierung des Schutzes ist mithilfe von Maßnahmen möglich, die die erhaltene Dosis minimieren und somit eine Grenzwertüberschreitung verhindern können.

Der Großteil der errechneten Kollektivdosis für die betrachteten Expositionssituationen betrifft die Bevölkerung in dem Abbauggebiet oder Schmelzgebiet von Seltenen Erden. Die Exposition in den Gebieten resultiert aus einer hohen Konzentration von Thorium-232 in der Luft bzw. im Boden. Eine Reduktion der Emissionen des Thoriums würde zu einer geringeren Dosis führen.

Eine Möglichkeit ist die Abdeckung der Tailing Becken. Sterk und Spaan (1997) haben die Erosion durch Wind in der Sahelzone untersucht. Durch eine Abdeckung der Fläche mit Mulch ( $1500 \text{ kg ha}^{-1}$ ) wurde der Sedimenttransport um durchschnittlich 64 % reduziert. Eine weitere Methode ist das Anpflanzen von Vegetation als Schutz vor dem Wind. Michels et al. (1998) haben unter anderem den Einfluss von bepflanzten Streifen auf die

durch Erosion hervorgerufenen Austragungen in der Sahelregion beleuchtet. Es wurde eine Reduktion von bis zu 77 % des Sedimentflusses erreicht. Weiterhin wurde von Munkhtsetseg et al. (2016) festgestellt, dass eine höhere Feuchtigkeit in der Erde die Staubbildung reduziert. Durch die Verringerung der Austragung von Thorium sinkt die Inhalationsdosis wie auch die durch Ablagerungen des Thoriums resultierende Bodenkonzentration. Somit wird auch die externe Gammaexposition verringert.

In der Veröffentlichung von Liu und Pan (2012) werden zusätzliche Handlungsempfehlungen gegeben. Die Autoren führen an, dass für eine Reduktion der Exposition der Arbeiter das Vermeiden von großflächigen Abbaugebieten eine Möglichkeit sei. Weiterhin soll die Aufenthaltsdauer in stark belasteten Gebieten verringert werden. Um die interne Exposition zu reduzieren, sollen Personenschutzmaßnahmen eingeführt werden. Zusätzlich dazu soll eine Ausbildung der Angestellten zum Thema Strahlenschutz durchgeführt werden.

Für die Reduktion der Exposition der Bevölkerung wird von den Autoren eine gute Ventilation der Gebäude angeführt. Weiterhin ist es hilfreich, wenn Baumaterialien mit niedriger Ortsdosisleistung verwendet werden und der längere Aufenthalt in Kellergewölben vermieden wird. Des Weiteren schlagen Liu und Pan (2012) vor, dass geschlossene Anlagen gesäubert und zurückgebaut werden. Abschließend wird angemerkt, dass das Strahlenschutzmanagement der jeweiligen Umweltbehörde ebenfalls für die Produktion, Abwasserableitung, Abgasemission und das Geschäft mit Schlacke durchgesetzt werden soll.

## 5 Ausblick

Für eine flächendeckende und größtenteils auf erneuerbare Energien basierende Stromproduktion werden neben der Windkraft weitere Technologien benötigt, um die Grundlast des Stromnetzes bereitzustellen. Hier sind unter anderem die Photovoltaik und Speichertechnologien zu nennen. Die Förderung der Rohstoffe für diese Technologien führt allerdings ebenfalls zu einer Exposition von Personen und sollte daher für ein Gesamtbild mitberücksichtigt werden.

Mit Blick auf die Photovoltaik wird im UNSCEAR 2016 Bericht eine berufliche Kollektivdosis durch den Abbau und die Verarbeitung der Materialien angegeben. Es wurde eine 3 kW-Peak polykristalline Solarzelle, die auf einem Dach in der Schweiz montiert war, abgeschätzt. Sie hatte einen Wirkungsgrad von 9,4%. Es wurde eine Lebenszeit von 30 Jahren für die Solarzelle und von 15 Jahren für den Wechselrichter angenommen. Der geschätzte Wert der Kollektivdosis belief sich auf  $0,8 \text{ manSv GW}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (UNSCEAR 2016). Das ist der höchste von UNSCEAR abgeschätzte Wert einer Kollektivdosis, resultierend aus der Förderung von Rohstoffen. Er entspricht ungefähr 60% der in dieser Arbeit berechneten Kollektivdosis für die Windenergie. Allerdings ist in der Schätzung von UNSCEAR für Solarenergie ebenfalls keine Exposition der Bevölkerung vorgesehen. Da geringe Mengen von Seltenen Erden für die Solarzelle benötigt werden, ist eine Exposition der Bevölkerung nicht auszuschließen. Hier könnten zusätzliche Studien hilfreich sein, um die Exposition abzuschätzen.

Für eine Speichertechnologie wie Lithiumionenakkumulatoren sind keine Daten für eine radiologische Betrachtung des Lebenszykluses vorhanden. Allerdings werden Gesundheitsrisiken bei der Entsorgung angesprochen (Gottesfeld 2019).

Um eine genauere Aussage über die Exposition durch ionisierende Strahlung und radioaktive Stoffe durch die Verwendung von erneuerbarer Energien mithilfe einer Kollektivdosis tätigen zu können, ist eine bessere Datenlage notwendig. Einzelne Produktionsschritte für die verschiedenen Technologien müssten auf relevante Radionuklide untersucht werden. Mit der daraus resultierenden Exposition wäre ein Vergleich zu den bereits detailliert untersuchten konventionellen Energieträgern möglich.

## 6 Eigenständigkeitserklärung

Ich, Simon Bittner, bestätige hiermit, dass die Arbeit selbstständig formuliert wurde. Weiterhin wurden keine anderen Quellen und Hilfsmittel, als die angegebenen, verwendet. Alle Stellen in der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen entnommen wurden, sind als solche gekennzeichnet. Diese Arbeit hat keiner Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegen (Fakultät für Mathematik und Physik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover 2018).

Hannover, den 11 Juni 2020

---

Ort, Datum

---

Unterschrift



## Literaturverzeichnis

- Abbady, Adel G. E. und A. M. El-Arabi (2006). “Naturally occurring radioactive material from the aluminium industry - a case study: the Egyptian Aluminium Company, Nag Hammady, Egypt”. English. In: *JOURNAL OF RADIOLOGICAL PROTECTION* 26.4, 415–422. ISSN: 0952-4746. DOI: {10.1088/0952-4746/26/4/006}.
- ARADEx (2020). “Getriebe vs. Direktantrieb: eine Gegenüberstellung”. URL: <https://www.aradex.de/de/system-solutions/whitepaper-leistungselektronik/getriebe-vs-direktantrieb/> (abgerufen am 09.03.2020).
- Ault, Timothy, Steven Krahn und Allen Croff (2015). “Radiological Impacts and Regulation of Rare Earth Elements in Non-Nuclear Energy Production”. English. In: *ENERGIES* 8.3, 2066–2081. ISSN: 1996-1073. DOI: {10.3390/en8032066}.
- Bakr, W. F. (2010). “Assessment of the radiological impact of oil refining industry”. English. In: *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY* 101.3, 237–243. ISSN: 0265-931X. DOI: {10.1016/j.jenvrad.2009.11.005}.
- Belyaeva, Olga, Konstantin Pyuskyulyan, Nona Movsisyan, Armen Saghatelyan und Fernando P. Carvalho (2019). “Natural radioactivity in urban soils of mining centers in Armenia: Dose rate and risk assessment”. English. In: *CHEMOSPHERE* 225, 859–870. ISSN: 0045-6535. DOI: {10.1016/j.chemosphere.2019.03.057}.
- Betz, Albert (1920). “Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren.” In: *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen* 26, S. 307–309.
- Binnemans, Koen, Peter Tom Jones, Bart Blanpain, Tom Van Gerven, Yongxiang Yang, Allan Walton und Matthias Buchert (2013). “Recycling of rare earths: a critical review”. English. In: *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 51, 1–22. ISSN: 0959-6526. DOI: {10.1016/j.jclepro.2012.12.037}.
- Bundesamt für Strahlenschutz (2010). “Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität”. URL: [https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-20100329966/3/BfS\\_2010\\_SW\\_07\\_10\\_Bergbau.pdf](https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-20100329966/3/BfS_2010_SW_07_10_Bergbau.pdf) (abgerufen am 04.06.2020).

- Bundesamt für Strahlenschutz (2020). “Überwachung der Gamma-Ortsdosisleistung”. URL: [https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/luft-boden/odl/odl\\_node.html](https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/luft-boden/odl/odl_node.html) (abgerufen am 05.05.2020).
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020). “Eneuerbare Energien”. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html> (abgerufen am 26.01.2020).
- Bundesregierung (2020a). “Energiewende im Überblick”. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/energiewende-im-ueberblick-229564> (abgerufen am 29.03.2020).
- Bundesregierung (2020b). “Ein neues Zeitalter hat begonnen”. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/energie-erzeugen/ein-neues-zeitalter-hat-begonnen-317608> (abgerufen am 29.03.2020).
- Bundesverband Windenergie (2020a). “Leistungsbegrenzung und -regelung”. URL: <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/leistungsbegrenzung/> (abgerufen am 23.03.2020).
- Bundesverband Windenergie (2020b). “Betz- und Leistungsentnahme”. URL: <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/betz-und-leistungsentnahme/> (abgerufen am 27.04.2020).
- Bundesverband Windenergie (2020c). “Zahlen und Fakten”. URL: <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/> (abgerufen am 10.02.2020).
- Chinadaily (2020). “Districs”. URL: <http://www.chinadaily.com.cn/m/innermongolia/baotou/districts.html> (abgerufen am 12.02.2020).
- Cowie, Michael, Khalid Mously, Osama Fageeha und Rafat Nassar (2008). “NORM management in the oil & gas industry”. English. In: *NATURAL RADIATION ENVIRONMENT*. Bd. 1034. AIP CONFERENCE PROCEEDINGS. 8th International Symposium on Natural Radiation Environment, Buzios, BRAZIL, OCT 07-12, 2007. AMER INST PHYSICS, 319–321. ISBN: 978-0-7354-0559-2.
- Crockett, G M, K R Smith, W B Oatway und S F Mobbs (2003). “Radiological Impact on the UK Population of Industries which Use or Produce Materials Containing Enhanced Levels of Naturally Occuring Radionuclides, Part II: The Steel Production Industry”.

- Cuenot, Nicolas, Julia Scheiber, Wildfrid Moeckes und Albert Genter (2015). “Evolution of the Natural Radioactivity on the Soultz-sous-Forêt EGS Power Plant and Implication for Radiation Protection”. In: *World Geothermal Congress 2015*.
- Donadio, Rachel (2013). “Der rosa Staub, der den Tod bringt”. URL: <https://www.welt.de/politik/ausland/article112364680/Der-rosa-Staub-der-den-Tod-bringt.html> (abgerufen am 05.04.2020).
- Eggeling, Lena, Albert Genter, Thomas Koelbel und Wolfram Muench (2013). “Impact of natural radionuclides on geothermal exploitation in the Upper Rhine Graben”. English. In: *GEO THERMICS* 47, 80–88. ISSN: 0375-6505. DOI: {10.1016/j.geothermics.2013.03.002}.
- Egyptian Steel (2020a). “Companies and Plants”. URL: [http://www.egyptian-steel.com/Companies-and-Factories/National-Port-Said-Steel-Company-\(NPSS\).aspx](http://www.egyptian-steel.com/Companies-and-Factories/National-Port-Said-Steel-Company-(NPSS).aspx) (abgerufen am 20.02.2020).
- Egyptian Steel (2020b). “Companies and Plants”. URL: <http://www.egyptian-steel.com/Companies-and-Factories/IIC-For-Steel-Plants-Management-Company.aspx> (abgerufen am 20.02.2020).
- Enercon (2020). “Technische Daten im Überblick”. URL: <https://www.enercon.de/produkte/ep-5/e-147-ep5-e2/> (abgerufen am 10.02.2020).
- Fakultät für Mathematik und Physik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (2018). “Prüfungsordnung für den Bachelorstudiengang Physik an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover”.
- Gottesfeld, Perry (2019). “Commentary health risks from climate fix: The downside of energy storage batteries”. English. In: *ENVIRONMENTAL RESEARCH* 178. ISSN: 0013-9351. DOI: {10.1016/j.envres.2019.108677}.
- Haridasan, P. P., P. M. B. Pillai, R. M. Tripathi und V. D. Puranik (2008). “Occupational radiation exposure due to NORM in a Rare Earth compounds production facility”. English. In: *RADIATION PROTECTION DOSIMETRY* 131.2, 217–221. ISSN: 0144-8420. DOI: {10.1093/rpd/ncn170}.

- Hau, Erich (2016). “Windkraftanlagen : Grundlagen - Technik - Einsatz - Wirtschaftlichkeit”. Berlin: Springer Vieweg; ISBN: 9783662531549. DOI: 10.1007/978-3-662-53154-9.
- Humphries, Marc (2013). “Rare Earth Elements: The Global Supply Chain”. URL: <https://fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf> (abgerufen am 14.03.2020).
- ICRP (2012). “Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60.” In: *ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41 (Suppl.)*
- ICRP (2007). “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”. In: *ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4)*.
- Indian Rare Earths Limited (2020a). “68th Annual Report 2017-18”. URL: <http://irel.co.in/WriteReadData/userfiles/file/AR1718.pdf> (abgerufen am 19.10.2020).
- Indian Rare Earths Limited (2020b). “Rare Earths Division Aluva”. URL: [http://irel.co.in/content/1479\\_1\\_RareEarthsDivisionAluva.aspx](http://irel.co.in/content/1479_1_RareEarthsDivisionAluva.aspx) (abgerufen am 19.01.2020).
- International Atomic Energy Agency (2013). “Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VII)”. In: *Proceedings of an International Symposium Beijing, China, 22-26 April 2013*.
- International Atomic Energy Agency (2006). “Safety Reports Series No. 49: Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials”.
- Isinkaye, Omoniyi Matthew, Segun Adeleke und Daniel Ajide Isah (2018). “Background Radiation Measurement and the Assessment of Radiological Impacts due to Natural Radioactivity Around Itakpe Iron-Ore Mines”. English. In: *MAPAN-JOURNAL OF METROLOGY SOCIETY OF INDIA* 33.3, 271–280. ISSN: 0970-3950. DOI: {10.1007/s12647-018-0261-9}.
- Jensen, Jonas Pagh (2019). “Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines”. English. In: *WIND ENERGY* 22.2, 316–326. ISSN: 1095-4244. DOI: {10.1002/we.2287}.

- Jia, Guogang (2013). “The Radiological Impact of Pb-210 and Po-210 Released from the Iron- and Steel-Making Plant ILVA in Taranto (Italy) on the Environment and the Public”. English. In: *JOURNAL OF CHEMISTRY*. ISSN: 2090-9063. DOI: {10.1155/2013/964310}.
- Khater, Ashraf E. M. und Wafaa F. Bakr (2011). “Technologically enhanced Pb-210 and Po-210 in iron and steel industry”. In: *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY* 102.5, SI. International Topical Conference on Po and Radioactive Pb Isotopes, Seville, SPAIN, OCT 26-28, 2009, 527–530. ISSN: 0265-931X. DOI: {10.1016/j.jenvrad.2011.02.002}.
- Li, Baochuan, Nanping Wang, Jianhua Wan, Shengqing Xiong, Hongtao Liu, Shijun Li und Rong Zhao (2016). “In-situ gamma-ray survey of rare-earth tailings dams - A case study in Baotou and Bayan Obo Districts, China”. English. In: *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY* 151.1, 304–310. ISSN: 0265-931X. DOI: {10.1016/j.jenvrad.2015.10.027}.
- Liu, H. und Z. Pan (2012). “NORM situation in non-uranium mining in China”. In: *ANNALS OF THE ICRP* 41.3-4. cited By 6, S. 343–351. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.06.015. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867800750&doi=10.1016%2fj.icrp.2012.06.015&partnerID=40&md5=4bb7d5ffd2403804146f99f1112a62a4>.
- Magill, J., G. Pfennig, R. Dreher und Z. Sóti (2015). “Karlsruher Nuklidkarte”.
- Michels, K., J. P. A. Lamers und A. Buerkert (1998). “Effects of windbreak species and mulching on wind erosion and millet yield in the Sahel”. In: *EXPERIMENTAL AGRICULTURE* 34.4, S. 449–464. DOI: 10.1017/S0014479798004050.
- Munkhtsetseg, Erdenebayar, Masato Shinoda, John A. Gillies, Reiji Kimura, James King und George Nikolich (2016). “Relationships between soil moisture and dust emissions in a bare sandy soil of Mongolia”. In: *PARTICUOLOGY* 28, 131–137. ISSN: 1674-2001. DOI: {10.1016/j.partic.2016.03.001}.
- Osterhage, Wolfgang (2015). “Die Energiewende: Potenziale bei der Energiegewinnung. essentials.” Springer Spektrum, Wiesbaden.
- Parmaksiz, A. (2013). “Measurement of naturally occurring radionuclides in geothermal samples and assessment of radiological risks and radiation doses”. English. In: *RADIA-*

*TION PROTECTION DOSIMETRY* 157.4, 585–593. ISSN: 0144-8420. DOI: {10.1093/rpd/nct175}.

Soflic, T., D. Barisic und U. Soflic (2011). “Natural radioactivity in steel aggregate”. English. In: *ARCHIVES OF METALLURGY AND MATERIALS* 56.3, 627–634. ISSN: 1733-3490. DOI: {10.2478/v10172-011-0068-y}.

Sterk, G und WP Spaan (1997). “Wind erosion control with crop residues in the Sahel”. In: *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL* 61.3, 911–917. ISSN: 0361-5995. DOI: {10.2136/sssaj1997.03615995006100030028x}.

Strahlenschutzkommission. (2017). “Radon Dosiskoeffizienten, Empfehlung der Strahlenschutzkommission.”

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). “Sources and effects of ionizing radiation.”

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2016). “Sources, effects and risks of ionizing radiation.”

Vagliasindi, Grazia Maria und Christiane Gerstetter (2015). “The ILVA Industrial Site in Taranto: In Depth Analysis for the ENVI Committee”. URL: <https://www.ecologic.eu/12327> (abgerufen am 20.02.2020).

Vogt, Hans-Gerrit und Heinrich Schultz (2011). “Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes”.

Wang, Lingqing, Buqing Zhong, Tao Liang, Baoshan Xing und Yifang Zhu (2016). “Atmospheric thorium pollution and inhalation exposure in the largest rare earth mining and smelting area in China”. English. In: *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 572, 1–8. ISSN: 0048-9697. DOI: {10.1016/j.scitotenv.2016.07.192}.

Wang, Lu, Guohua Jiao, Husheng Lu und Qianqian Wang (2018). “Environmental Load of Iron Ore Transportation, Bayan Obo Mine, China”. English. In: *2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON AIR POLLUTION AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING (APEE 2018)*. Bd. 208. IOP Conference Series-Earth and Environmental Science. International Conference on Air Pollution and Environmental Engineering (APEE), Hong Kong, OCT 26-28, 2018. DOI: {10.1088/1755-1315/208/1/012004}.

- Wang, Meng, G. Audi, F.G. Kondev, W.J. Huang, S. Naimi und Xing Xu (2017). “The AME2016 atomic mass evaluation”. In: *CHINESE PHYSICS C* 41.3. URL: <http://www.nndc.bnl.gov/masses/>.
- White, Scott W und Gerald L Kulcinski (2000). “Birth to death analysis of the energy payback ratio and CO2 gas emission rates from coal, fission, wind, and DT-fusion electrical power plants”. In: *FUSION ENGINEERING AND DESIGN* 48.3, S. 473–481. ISSN: 0920-3796. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(00\)00158-7](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(00)00158-7). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379600001587>.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2020). “Stahlindustrie in Deutschland 2016”. URL: <https://www.stahl-online.de/index.php/statistiken/3/> (abgerufen am 26.01.2020).
- Zhuang, Sukai, Xinwei Lu, Jiantao Li und Qian Li (2016). “Radiation hazard of solid metallic tailings in Shangluo, China”. In: *NUCLEAR TECHNOLOGY & RADIATION PROTECTION* 31.2, 190–194.

## 7 Anhang

### 7.1 Weitere Datensätze

**Tabelle 11:** Masse der Materialien für einen 60 MW Windpark nach Jensen et al. Die Kunststoffe sind zusammengefasst.

Name	Masse
	kg
Eisenmetalle	6 560 000
Aluminium	104 000
Verbundmaterialien	660 000
Schmieröl	30 000
Elektronik	124 000
Batterien	36 000
Lampen	3800
NdFeB Magnet	40 000
Kupfer	292 000
Holz	29 000
Kunststoffe	44 600
<b>Summe</b>	<b>7 923 400</b>

**Tabelle 12:** Rohdaten von Li et al. (2016) für Baotou. Errechnete Bodenkonzentration für die Elemente Th, U, K. Die Kaliumwerte wurden von % in  $\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$  umgerechnet aus den Rohdaten über die Formel  $F_{\text{neu}} = \frac{F}{100} \cdot 10^6 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$ .

Baotou	Tailing	Nähe Tailing	Wohnbereich
Thorium	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Min	290,30	8,74	7,80
Max	351,70	18,06	17,40
Mittelwert	321	13,40	12,60

Baotou	Tailing	Nähe Tailing	Wohnbereich
Uran	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Min	1,98	1,85	1,24
Max	4,06	2,59	4,52
Mittelwert	3,02	2,22	2,88

Baotou	Tailing	Nähe Tailing	Wohnbereich
Kalium	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Min	25 900	15 600	14 900
Max	31 300	22 400	29 900
Mittelwert	28 600	19 000	22 400



**Tabelle 13:** Ergebnisse der Rechnung: Dargestellt ist die gesamte Kollektivdosis für eine 3 MW Anlage und die normierte Kollektivdosis

	S	S <sub>a</sub>
	manSv	manSv/(GW a)
Min	5,90E-03	3,75E-01
Max	5,17E-02	4,10E+00
Mittelwert	1,92E-02	1,35E+00

**Tabelle 14:** Aufteilung der normierten Kollektivdosis in die Anteile der exponierten Personengruppen

	S <sub>Bev</sub>	S <sub>Beruf</sub>
	manSv/(GW a)	manSv/(GW a)
Min	3,71E-01	3,84E-03
Max	3,71E+00	3,96E-01
Mittelwert	1,32E+00	3,56E-02

**Tabelle 15:** Aufteilung der normierten Kollektivdosis in die Anteile der betrachteten Materialien

	S <sub>Fe</sub>	S <sub>Nd</sub>
	manSv/(GW a)	manSv/(GW a)
Min	2,15E-03	3,71E-01
Max	4,02E-02	4,06E+00
Mittelwert	4,79E-03	1,35E+00

## 7.2 Weitere Abbildungen

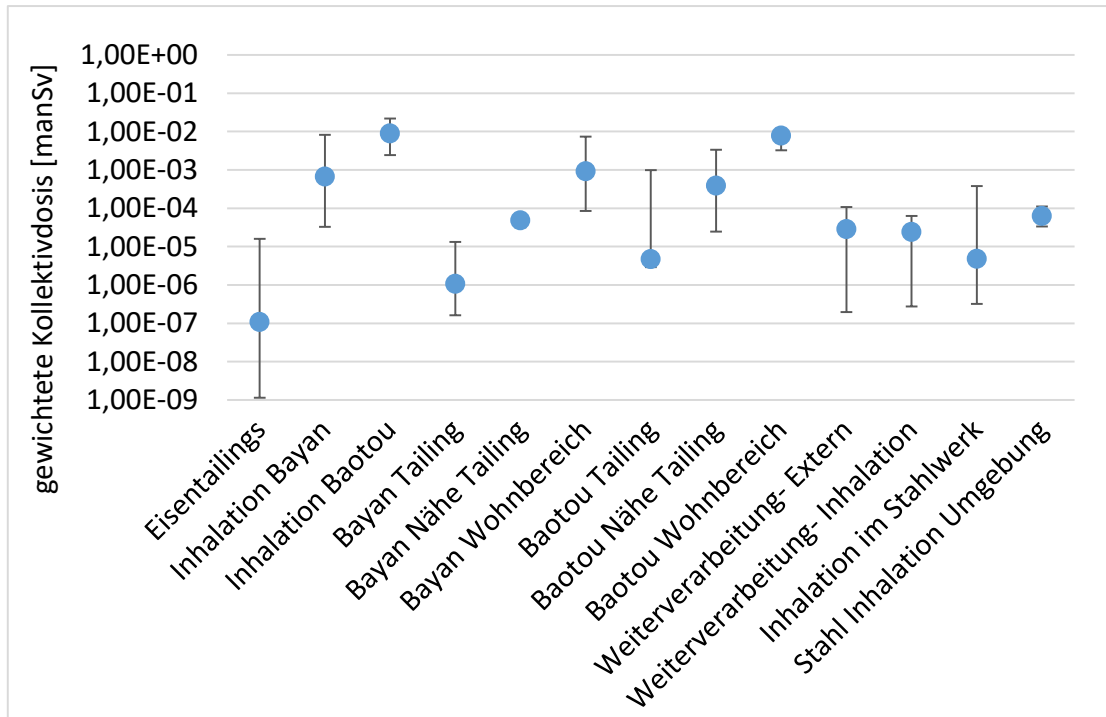


Abbildung 5: Kollektivdosis für die einzelnen Dosisquellen einer 3 MW Anlage (logarithmische Skalierung der Y-Achse)

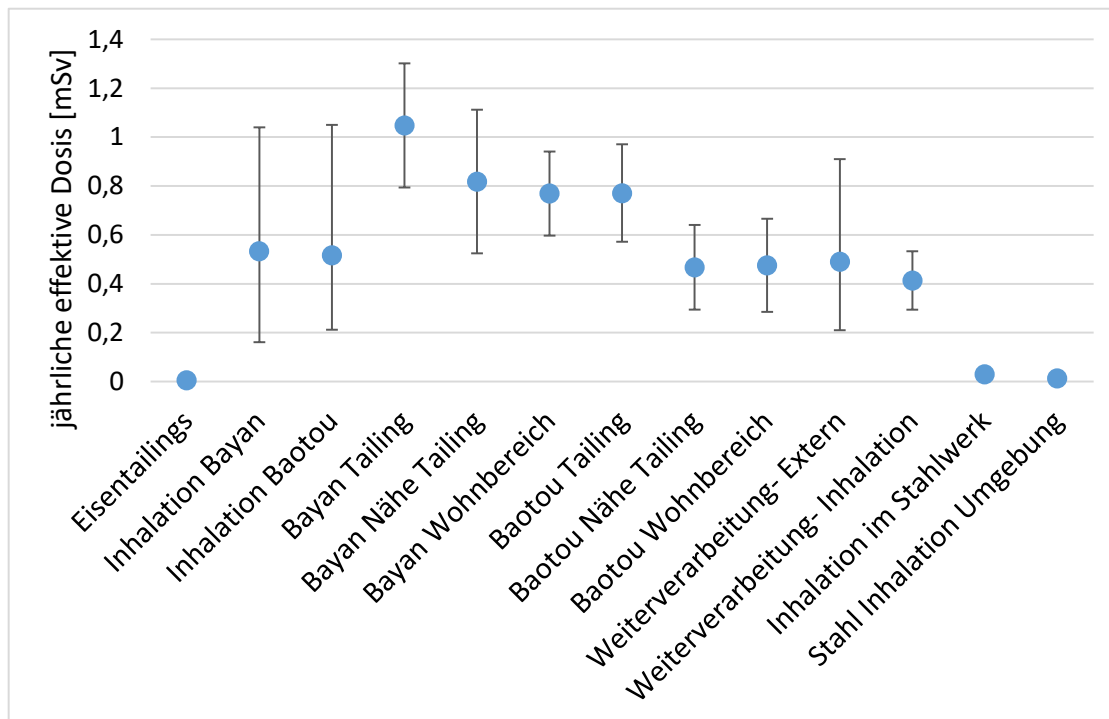


Abbildung 6: Die zusätzliche jährliche effektive Dosis für die einzelnen Quellen mit Unsicherheit

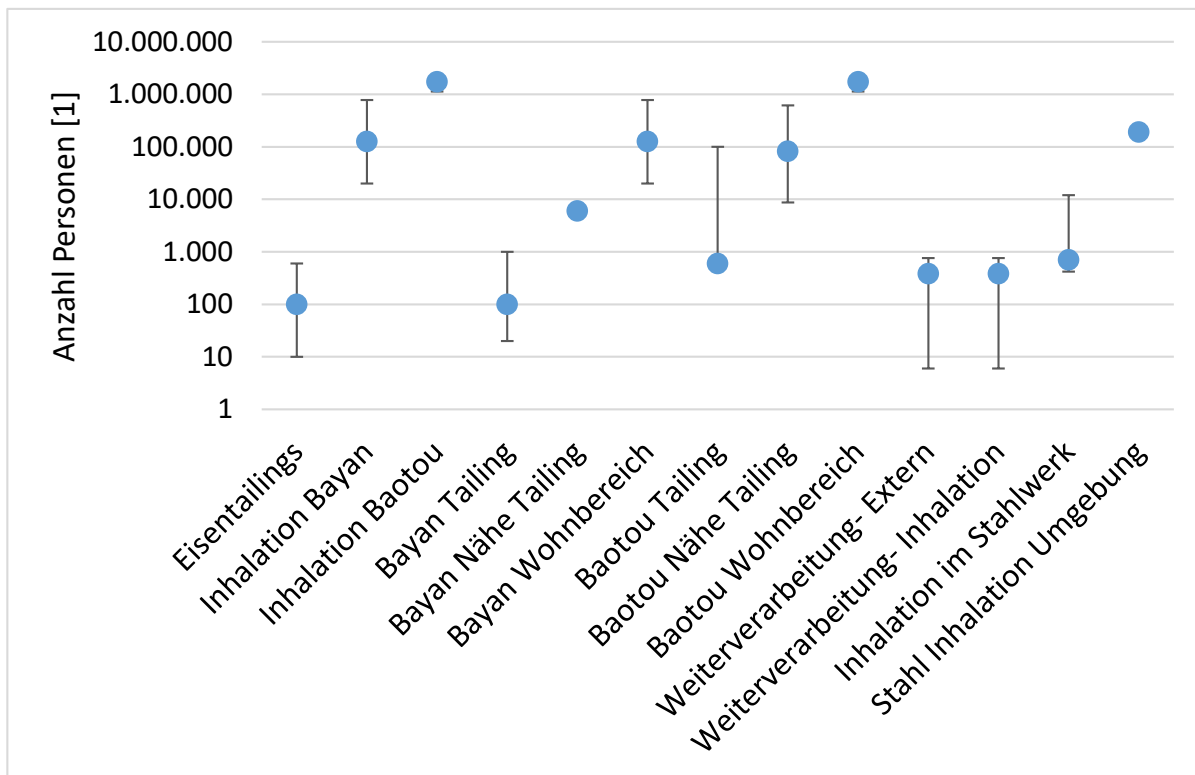


Abbildung 7: Anzahl der jeweils angenommenen exponierten Personen, der jeweiligen Quelle (logarithmische Skalierung der Y-Achse)

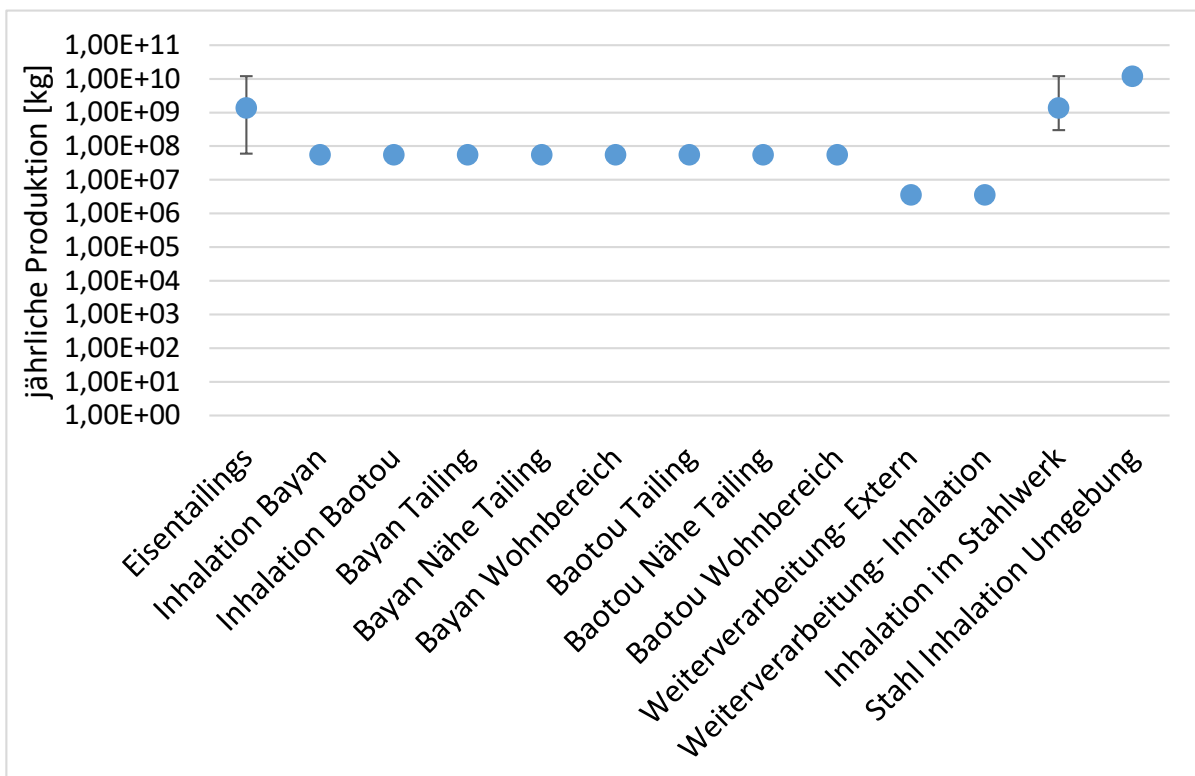
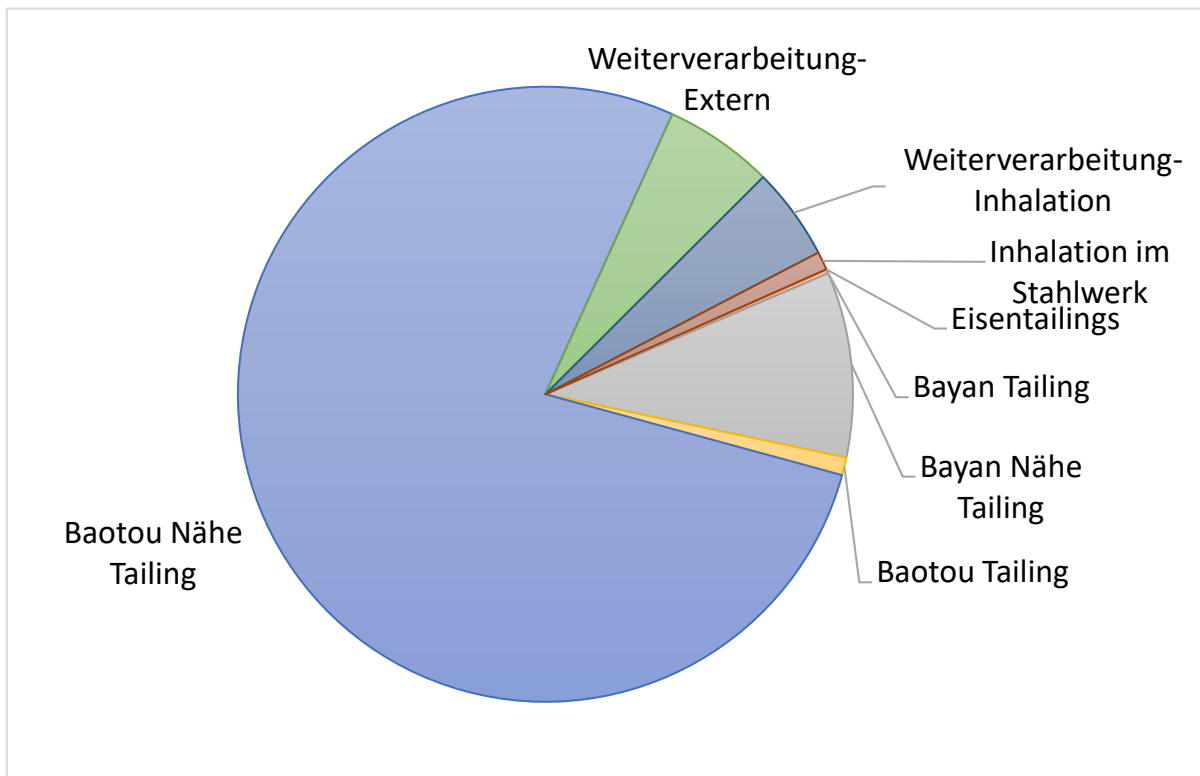
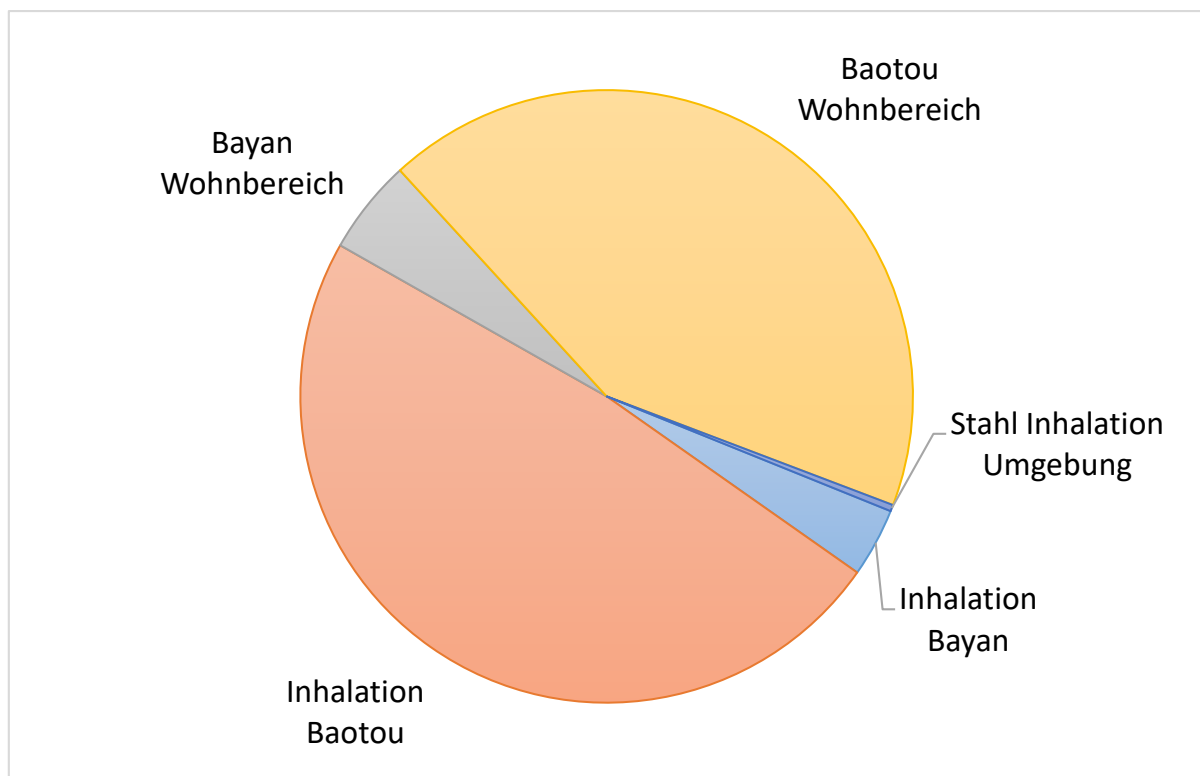


Abbildung 8: Die angenommene jährliche Produktion der jeweiligen Produktionsstätte (logarithmische Skalierung der Y-Achse)



**Abbildung 9:** Aufteilung der normierten Kollektivdosis für beruflich Exponierte



**Abbildung 10:** Aufteilung der normierten Kollektivdosis, die auf die Exposition der Bevölkerung zurückzuführen ist

### 7.3 Parameterwerte

**Tabelle 16:** Parameterwerte für die Einzeldosisberechnung. Für den UNSCEAR Bericht ist zusätzlich der jeweilige Fundort mit Annex und Absatz angegeben.

Name	Wert	Einheit	Quelle
Atemrate Erwachsener <sup>a</sup>	22,2	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	UNSCEAR (2000), A Tabelle 16
Atemrate Angestellter <sup>b</sup>	28,8	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	UNSCEAR (2000), B Absatz 144
Aufenthaltsanteil in geschlossenen Räumen	0,8	1	UNSCEAR (2000), A Absatz 59
Arbeitsstunden im Jahr	2000	h a <sup>-1</sup>	UNSCEAR (2000), E Absatz 254
Staubkonzentration	5	mg m <sup>-3</sup>	UNSCEAR (2000), E Absatz 263
Luftkonzentrationsverhältnis Innen/Außen	0,3	1	UNSCEAR (2000), A Absatz 109
Aufenthalt Tailing Becken	2	h d <sup>-1</sup>	Liu und Pan (2012)
Konversionsfaktor	0,7	Sv Gy <sup>-1</sup>	UNSCEAR (2000), A Absatz 58
Radon Töchter Konversionsfaktor	5	mSv WLM <sup>-1</sup>	UNSCEAR (2000), E Absatz 31

<sup>a</sup> Atemrate für einen Erwachsenen aus der Bevölkerung

<sup>b</sup> Atemrate für einen Erwachsenen bei leichter Tätigkeit, in der vorliegenden Arbeit für beruflich exponierte Personen verwendet

**Tabelle 17:** Parameterwerte für die Gewichtung der Kollektivdosis

Name	Wert	Einheit	Quelle
Wirkungsgrad Windkraftanlage	0,21 <sup>a</sup>	1	BMWi (2020)
Lebensdauer Windkraftanlage	22,5 <sup>b</sup>	a	Jensen (2019)
Masse: Eisenmetalle	328 000 <sup>c</sup>	kg	Jensen (2019)
Masse: Neodymmagnet	2000 <sup>c</sup>	kg	Jensen (2019)
Masse: Neodym	560 <sup>d</sup>	kg	Jensen (2019), Binnemans et al. (2013)

<sup>a</sup> Berechnet aufgrund der Rohdaten vom BMWi. Berechnung in Abschnitt 4.1

<sup>b</sup> Mittelwert der angegebenen Spanne

<sup>c</sup> Ist in Tabelle 11 für 60 MW angegeben, Ein zwanzigstel hier für 3 MW verwendet

<sup>d</sup> Korrigierte Masse von Neodym, da 72 % der NdFeB Magneten Eisen ist. Korrektur mit Faktor 0,28

**Tabelle 18:** Inhalationsdosiskoeffizienten für bestimmte Radionuklide für erwachsene Personen aus der Bevölkerung. Es wird die verwendete Partikelgröße und das verwendete Absorptionsverhalten aus der jeweiligen Veröffentlichung beibehalten.

Nuklid	Beschreibung	Wert	Einheit	Quelle
Pb-210	Slow, 5 $\mu\text{m}$	5600	nSv Bq <sup>-1</sup>	ICRP (2012) 119
Po-210	Slow, 5 $\mu\text{m}$	4300	nSv Bq <sup>-1</sup>	ICRP (2012) 119
Th-232	Slow, 5 $\mu\text{m}$	25 000	nSv Bq <sup>-1</sup>	ICRP (2012) 119

**Tabelle 19:** Inhalationsdosiskoeffizienten für bestimmte Radionuklide für berufliche Exponierte. Es wird die verwendete Partikelgröße und das verwendete Absorptionsverhalten aus der jeweiligen Veröffentlichung beibehalten.

Nuklid	Beschreibung	Wert	Einheit	Quelle
Pb-210	Fast, 1 $\mu\text{m}$	890	nSv Bq <sup>-1</sup>	ICRP (2012) 119
Po-210	Fast, 1 $\mu\text{m}$	600	nSv Bq <sup>-1</sup>	ICRP (2012) 119
Th-232	Medium, 5 $\mu\text{m}$	29 000	nSv Bq <sup>-1</sup>	ICRP (2012) 119

**Tabelle 20:** Dosiskonversionsfaktoren für die effektive Dosis aufgrund von natürlich auftretenden Nukliden im Boden für erwachsene Personen

Nuklid	Wert	Einheit	Quelle
K-40	0,029	nSv h <sup>-1</sup> kg Bq <sup>-1</sup>	UNSCEAR (2000), A Tabelle 7
Th-232*	0,46 <sup>a</sup>	nSv h <sup>-1</sup> kg Bq <sup>-1</sup>	UNSCEAR (2000), A Tabelle 7
U-238*	0,3 <sup>a</sup>	nSv h <sup>-1</sup> kg Bq <sup>-1</sup>	UNSCEAR (2000), A Tabelle 7

<sup>a</sup> Berücksichtigt unter der Annahme eines Gleichgewichts die gesamte Zerfallsreihe

**Tabelle 21:** Nuklidspezifische Daten

Nuklid	Halbwertszeit	Häufigkeit im natürlichen Element	relative Atommasse
K-40	1,25 · 10 <sup>9</sup> a	99,27 %	39,964 u
Th-232	1,41 · 10 <sup>10</sup> a	100 %	232,038 u
U-238	4,47 · 10 <sup>9</sup> a	0,0117 %	238,051 u
Quelle	Magill et al. (2015) <sup>a</sup>	Magill et al. (2015) <sup>a</sup>	M. Wang et al. (2017)

<sup>a</sup> aus Karlsruher Nuklidkarte

**Tabelle 22:** Parameterwerte für die Abschätzung der exponierten Personen

Nr.	Name	Wert	Quelle/Annahme
1	Arbeiter auf dem Eisenerztailling	100	Schätzung, keine Angabe
2	Bevölkerung Bayan Obo	125 200 <sup>a</sup>	Chinadaily (2020)
3	Bevölkerung Baotou	1 722 800 <sup>a</sup>	Chinadaily (2020)
4	Arbeiter auf Tailing, Bayan	100	Schätzung, keine Angabe
5	Arbeiter auf Tailing, Baotou	600	Schätzung, keine Angabe
6	Arbeiter Bayan Obo	6000 <sup>a</sup>	Ault et al. (2015)
7	Arbeiter Baotou	82 562 <sup>a</sup>	selbes Verhältnis <sup>b</sup> wie Bayan Obo
8	Arbeiter Weiterverarbeitung	380	IREL (2020a) geviertelt
9	Arbeiter Stahlwerk, Ägypten	700	Egyptian Steel 2020a
10	Bevölkerung Stahlwerknahe, Tarrent Italien	192 000	Jia (2013)

<sup>a</sup> Die Zahlenwerte der Parameter werden im Kapitel 3.3.2.1 verwendet. Zur Vermeidung von Dopplung werden für die getätigte Berechnung im Kapitel 3.3.2.2 die Zahlenwerte angepasst, siehe Kapitel 3.3.2.2.

<sup>b</sup> Verhältnis von Arbeitern zur Bevölkerung

**Tabelle 23:** Parameterwerte der jährlichen Produktion, SE = Seltene Erden

Nr	Name	Wert	Rohstoff	Quelle/Annahme
11	Eisenmine	1,36 Mt a <sup>-1</sup>	Eisen	gleich wie das betrachte Stahlwerk, Ägypten
12	Erzabbaugebiet, Bayan	55 000 t a <sup>-1</sup>	SE	Ault et al. (2015)
13	Schmelzgebiet, Baotou	55 000 t a <sup>-1</sup>	SE	Verarbeitet alles aus Bayan
14	Weiterverarbeitungsanlage	3600 t a <sup>-1</sup>	SE	IREL (2020b)
15	Stahlwerk, Ägypten	1,36 Mt a <sup>-1</sup>	Eisen	Egyptian Steel (2020a)
16	Stahlwerk, Italien	12 Mt a <sup>-1</sup>	Eisen	Jia (2013)



## 7.4 Unsicherheiten der Parameter

**Tabelle 24:** Unsicherheiten der Jahresproduktionen

Nr	Beschreibung Min	Wert	Beschreibung Max	Wert
11	fünftel, kleinstes Stahlwerk <sup>a</sup>	60 000 t a <sup>-1</sup>	gleiche Größe <sup>b</sup>	12 Mt a <sup>-1</sup>
12	keine Unsicherheit	55 000 t a <sup>-1</sup>	keine Unsicherheit	55 000 t a <sup>-1</sup>
13	Verarbeitung von Bayan	55 000 t a <sup>-1</sup>	gleich wie Bayan	55 000 t a <sup>-1</sup>
14	keine Unsicherheit	3600 t a <sup>-1</sup>	keine Unsicherheit	3600 t a <sup>-1</sup>
15	kleinstes Stahlwerk, Ägypten <sup>c</sup>	300 000 t a <sup>-1</sup>	gleiche Größe <sup>d</sup>	12 Mt a <sup>-1</sup>
16	keine Unsicherheit	12 Mt a <sup>-1</sup>	keine Unsicherheit	12 Mt a <sup>-1</sup>

<sup>a</sup> Es wird geschätzt, dass fünf Eisenminen ein Stahlwerk beliefern könnten. Das gewählte Stahlwerk ist das kleinste vom ägyptischen Produzenten (Egyptian Steel 2020b)

<sup>b</sup> Hintergrund ist die Versorgung eines Stahlwerks durch eine Eisenmine. Das gewählte Stahlwerk ist das Stahlwerk aus Tarent, Italien

<sup>c</sup> kleinstes Stahlwerk vom ägyptischen Produzenten (Egyptian Steel 2020b)

<sup>d</sup> wie Stahlwerk in Tarent, Italien

**Tabelle 25:** Unsicherheiten von Parametern der Gewichtung

Name	Beschreibung Min	Wert	Beschreibung Max	Wert
Lebensdauer	Untergrenze Jensen (2019)	20 a	Obergrenze Jensen (2019)	25 a

**Tabelle 26:** Unsicherheiten von Parametern zur Abschätzung der exponierten Personen

Nr	Beschreibung Min	Wert	Beschreibung Max	Wert
1	Schätzung, keine Angabe	10	Schätzung, keine Angabe	600
2	niedrigste Angabe <sup>a</sup>	20 000	Subtraktion aller Bezirke von Gesamtheit <sup>b</sup>	778 000
3	Addition von Bezirken <sup>c</sup>	1 130 000 <sup>l</sup>	höchste Angabe <sup>d</sup>	2 050 000 <sup>l</sup>
4	Schätzung, keine Angabe	20	Schätzung, keine Angabe <sup>e</sup>	1000
5	Schätzung, keine Angabe	500	Schätzung, keine Angabe <sup>e</sup>	100 000
6	keine Unsicherheit	6000 <sup>l</sup>	keine Unsicherheit	6000 <sup>l</sup>
7	kleinstes Verhältnis im Vergleich zu Bayan <sup>f</sup>	8715 <sup>l</sup>	größtes Verhältnis im Vergleich zu Bayan <sup>g</sup>	615 000 <sup>l</sup>
8	produktionsgewichtet <sup>h</sup>	6	Hälfte der Angestellten <sup>i</sup>	761
9	kleinstes Stahlwerk, Ägypten <sup>j</sup>	420	größte Zahl, EU Briefing <sup>k</sup>	12 000
10	keine Unsicherheit	192 000	keine Unsicherheit	192 000

<sup>a</sup> Angabe von Wikipedia ohne Quelle [https://de.wikipedia.org/wiki/Bayan\\_0bo](https://de.wikipedia.org/wiki/Bayan_0bo) (abgerufen am 17.03.2020)

<sup>b</sup> Subtraktion aller Bezirke von der angegebenen Gesamtbevölkerung auf Wikipedia <https://de.wikipedia.org/wiki/Baotou> (abgerufen am 17.03.2020)

<sup>c</sup> Addition der Populationen von Wikipedia für Kundulun, Qingshan und Donghe <https://de.wikipedia.org/wiki/Baotou> (abgerufen am 17.03.2020)

<sup>d</sup> Angabe von Wikipedia ohne Quelle <https://de.wikipedia.org/wiki/Baotou> (abgerufen am 17.03.2020)

<sup>e</sup> ungefähr ein Sechstel der Arbeiter

<sup>f</sup> gleiches Verhältnis Arbeitern zur Bevölkerung, kleinstes für Bayan 6000/778 000

<sup>g</sup> gleiches Verhältnis Arbeitern zur Bevölkerung, größtes für Bayan 6000/20 000

<sup>h</sup> Gewichtung anhand des Anteils der Gesamtproduktion der relevanten Anlage von allen Anlagen des Unternehmens (IREL 2020b)

<sup>i</sup> Es sind vier Anlagen des Unternehmens aufgeführt. Da die Produktion der betrachteten Fabrik relativ gering ist im Vergleich zu anderen Anlagen, werden mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr als die Hälfte der Angestellten dort arbeiten (IREL 2020b)

<sup>j</sup> (Egyptian Steel 2020b)

<sup>k</sup> Die größte gefundene Zahl findet sich im Bericht an das Europaparlament. Darin wird von 12 000 direkt angestellten Personen gesprochen für das Stahlwerk in Tarent Italien. (Vagliasindi und Gerstetter 2015)

<sup>l</sup> Zur Vermeidung von Dopplung werden die Zahlenwerte der Parameter für die getätigte Berechnung im Kapitel 3.3.2.2 angepasst, siehe Kapitel 3.3.2.2.

## 7.5 Abschätzung der effektiven Dosis durch Ingestion

Berechnet wird die jährliche effektive Dosis durch die Ingestion von pflanzlichen Produkten für einen Erwachsenen. Dies wird speziell für die Umgebung des Stahlwerks in Tarent Italien betrachtet. Der zugrunde liegende Datensatz ist in Kapitel 3.3.1.2 in Tabelle 3 abgebildet. Der betrachtete Pfad der Deposition von Pb-210 sowie Po-210 ist das oberflächliche Ablagern von Staubpartikeln, an denen Radionuklide gebunden sind. Die Berechnung entspricht der Vorgehensweise in der Berechnungsgrundlage Bergbau vom BfS (BfS 2020). Die Bezeichnungen sind hier identisch gewählt.

Zuerst wird die Bodenkontaminationsrate durch trockene Ablagerung von Staub über die gemessenen Aktivitätskonzentrationen in der Luft (Tabelle 3) errechnet. Verwendet werden die Mittelwerte.

$\dot{B}_r$	Bodenkontaminationsrate, durch trockene Ablagerung [ $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]
$v_g$	Ablagerungsgeschwindigkeit [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$C_{\text{Luft},r}$	Aktivitätskonzentration des Radionuklids r in der bodennahen Außenluft [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]
$C_{\text{Luft},r}^{\text{U}}$	Untergrund Aktivitätskonzentration des Radionuklids r [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]

$$\dot{B}_r = v_g(C_{\text{Luft},r} - C_{\text{Luft},r}^{\text{U}}) \quad (50)$$

$$\dot{B}_{\text{Pb-210}} = 10^{-2} \text{ m s}^{-1} \cdot (812 - 399) \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-3} = 4,13 \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (51)$$

$$\dot{B}_{\text{Po-210}} = 10^{-2} \text{ m s}^{-1} \cdot (291 - 48,5) \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-3} = 2,43 \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (52)$$

Darauffolgend wird die resultierende spezifische Aktivität der vor Ort wachsenden Pflanzen errechnet. Berücksichtigt wird der Pfad der Deposition der Radionuklide. Dies geschieht über oberflächliche Staubablagerungen, an die sich Pb-210 und Po-210 gebunden haben. Der Expositionspfad der Berechnung wird nicht berücksichtigt. Es werden pflanzliche Produkte und Blattgemüse getrennt betrachtet. Eine genauere Aufschlüsselung der pflanzlichen Produkte wird nicht getätigt. Im Falle, dass der Parameterwert für die einzelnen Untergruppen aufgeführt ist, wird der Zahlenwert für Gemüse repräsentativ verwendet. Die Parameterwerte sind aufgeführt in Tabelle 27. Da nur eine Betrachtung des Expositionspfades der oberflächlichen Staubablagerungen stattfindet, wird der Untergrund nur bei der Berechnung der Bodenkontaminationsrate berücksichtigt.

$C_{A,n,r}$	spezifische Aktivität durch Expositionspfad A (Staubablagerung) [Bq kg <sup>-1</sup> ]
$\dot{B}_r$	Bodenkontaminationsrate, durch trockene Ablagerung [Bq m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{\text{eff,Pf},r}$	effektive Verweilkonstante des Radionuklids r auf der Pflanze [s <sup>-1</sup> ]
$t_{n,e}$	Kontaminationszeit für Pflanzen der Gruppe n in der Wachstumsperiode [s]
$Y_n$	Ertrag bzw. Bewuchsdichte [kg m <sup>-2</sup> ]
$\lambda_v$	Verweilkonstante für das Verbleiben der Radionuklide auf der Vegetation [s <sup>-1</sup> ]
$\lambda_r$	physikalische Zerfallskonstante des Radionuklids r [s <sup>-1</sup> ]
$t_r$	Halbwertszeit des Radionuklids r [s]

$$C_{A,n,r} = \dot{B}_r \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_{\text{eff,Pf},r} \cdot t_{n,e})}{Y_n \cdot \lambda_{\text{eff,Pf},r}} \quad (53)$$

$$\lambda_{\text{eff,Pf},r} = \lambda_v + \lambda_r \quad (54)$$

$$\lambda_r = \frac{\ln(2)}{t_r} \quad (55)$$

Nebenrechnung

$$\lambda_{\text{Pb-210}} = 9,9 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1} \quad (56)$$

$$\lambda_{\text{Po-210}} = 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} \quad (57)$$

$$\lambda_{\text{eff,Pf,Pb-210}} = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} + 9,9 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1} \approx 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \quad (58)$$

$$\lambda_{\text{eff,Pf,Po-210}} = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} + 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} = 6,28 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \quad (59)$$

Berechnung der spezifischen Aktivität für n = Pf (pflanzliche Produkte), Bl (Blattgemüse)

$$C_{A,\text{Pf,Pb-210}} = 4,13 \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot \frac{1 - \exp(-5,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \cdot 5,2 \cdot 10^6 \text{ s})}{2,4 \text{ kg m}^{-2} \cdot 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}} \quad (60)$$

$$= 2,86 \text{ Bq kg}^{-1} \quad (61)$$

$$C_{A,\text{Pf,Po-210}} = 2,43 \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot \frac{1 - \exp(-6,28 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \cdot 5,2 \cdot 10^6 \text{ s})}{2,4 \text{ kg m}^{-2} \cdot 6,28 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}} \quad (62)$$

$$= 1,55 \text{ Bq kg}^{-1} \quad (63)$$

$$C_{A,\text{Bl,Pb-210}} = 4,13 \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot \frac{1 - \exp(-5,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \cdot 5,2 \cdot 10^6 \text{ s})}{1,6 \text{ kg m}^{-2} \cdot 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}} \quad (64)$$

$$= 4,29 \text{ Bq kg}^{-1} \quad (65)$$

$$C_{A,\text{Bl,Po-210}} = 2,43 \cdot 10^{-6} \text{ Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot \frac{1 - \exp(-6,28 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \cdot 5,2 \cdot 10^6 \text{ s})}{1,6 \text{ kg m}^{-2} \cdot 6,28 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}} \quad (66)$$

$$= 2,33 \text{ Bq kg}^{-1} \quad (67)$$

Als letztes wird die resultierende effektive Jahresdosis für einen Erwachsenen durch die Ingestion von pflanzlichen Produkten und Blattgemüse errechnet.

$E_{\text{ing},j}$	effektive Jahresdosis durch Ingestion lokal erzeugter Lebensmittel [Sv]
$p_n$	Anteil an lokaler Produktion des Lebensmittels $n$ am Jahresverbrauch
$U_{n,j}$	Jahresverbrauch der Personengruppe $j$ des Lebensmittels $n$ [kg]
$C_{n,r}$	spezifische Aktivität des Radionuklids $r$ im Lebensmittel $n$ [ $\text{Bq kg}^{-1}$ ]
$g_{\text{ing},r,j}$	Ingestionsdosiskoeffizient für das Radionuklid $r$ [ $\text{Sv Bq}^{-1}$ ]

$$E_{\text{ing},j} = \sum_n p_n \cdot U_{n,j} \sum_r C_{n,r} \cdot g_{\text{ing},r,j} \quad (68)$$

Für  $j > 17$  Jahre und  $r = \text{Pb-210}$  sowie  $\text{Po-210}$  ergibt sich eine jährliche effektive Dosis von

$$\begin{aligned} E_{\text{ing}, >17 \text{ a}} &= 0,5 \cdot 13 \text{ kg} \cdot [4,29 \text{ Bq kg}^{-1} \cdot 6,9 \cdot 10^{-7} \text{ Sv Bq}^{-1} \\ &\quad + 2,33 \text{ Bq kg}^{-1} \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Sv Bq}^{-1}] \\ &\quad + 0,5 \cdot 240 \text{ kg} \cdot [2,86 \text{ Bq kg}^{-1} \cdot 6,9 \cdot 10^{-7} \text{ Sv Bq}^{-1} \\ &\quad + 1,55 \text{ Bq kg}^{-1} \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Sv Bq}^{-1}] \\ &= 37 \mu\text{Sv} + 460 \mu\text{Sv} \\ &= 497 \mu\text{Sv}. \end{aligned} \quad (69)$$

**Tabelle 27:** Parameterwerte für die Berechnung der Ingestionsdosis

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
$v_g$	$10^{-2}$	$\text{m s}^{-1}$	Berechnungsgrundlage Bergbau Abschnitt 6.2.3
$\lambda_v$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$\text{s}^{-1}$	Ber.Gl BB Tabelle IV.4
$Y_{\text{Pf}}$	2,4	$\text{kg m}^{-2}$	Ber.Gl BB Tabelle IV.4
$Y_{\text{Bl}}$	16	$\text{kg m}^{-2}$	Ber.Gl BB Tabelle IV.4
$t_{\text{Pf},e}$	$5,2 \cdot 10^6$	s	Ber.Gl BB Tabelle IV.4
$t_{\text{Bl},e}$	$5,2 \cdot 10^6$	s	Ber.Gl BB Tabelle IV.4
$p_{\text{Pf}}$	0,5	1	Ber.Gl BB Tabelle IV.4
$p_{\text{Bl}}$	0,5	1	Ber.Gl BB Tabelle IV.4
$U_{\text{Pf},>17 \text{ a}}$	240	kg	Ber.Gl BB Tabelle IV.2
$U_{\text{Bl},>17 \text{ a}}$	13	kg	Ber.Gl BB Tabelle IV.2
$g_{\text{ing,Pb-210},>17 \text{ a}}$	$6,9 \cdot 10^{-7}$	$\text{Sv Bq}^{-1}$	Ber.Gl BB Tabelle IV.1
$g_{\text{ing,Po-210},>17 \text{ a}}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$\text{Sv Bq}^{-1}$	Ber.Gl BB Tabelle IV.1