

Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De [catalogus](#) van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde [tijdschriften](#) uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling [video's](#).

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material. Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

The [catalogue](#) of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized [magazines](#) from the Dutch anti-nuclear power movement and a [video-section](#).

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small [donation](#). Thank you.



www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

Fachstellungnahme zum Bericht des Joint Research Centre „Technical assessment of nuclear energy with respect to the ‘do no significant harm’ criteria of Regulation (EU) 2020/852 ‘Taxonomy Regulation’”

unter besonderer Berücksichtigung der Kriteriaeignung für die
Aufnahme der Kernenergie in die EU-Taxonomie

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)

Unter Mitarbeit des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS)

Juni 2021

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
1 Anlass und Hintergrund, Ziel, Vorgehensweise und Aufbau der Fachstellungnahme	3
1.1 Anlass und Hintergrund der Fachstellungnahme	3
1.2 Ziel der Fachstellungnahme	4
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Fachstellungnahme.....	5
2 Kritische Betrachtung der Methodik des JRC – DNSH-Kriterien und Nutzung der Kernenergie.....	6
2.1 Prüfungsmaßstab des JRC bei der Bewertung der DNSH-Kriterien.....	7
2.2 Ausgelassene umweltrelevante Aspekte der Kernenergienutzung und der Entsorgung radioaktiver Abfälle bei der Bewertung der DNSH-Kriterien im JRC-Bericht.....	9
2.2.1 Unfälle	9
2.2.2 Ungewissheiten	11
2.2.3 Forschung und Entwicklung.....	13
2.2.4 Sicherung	13
2.2.5 Langfristiger Informations- und Wissenserhalt unter Berücksichtigung von Human Intrusion	14
2.3 Zur Methodik des JRC.....	15
2.3.1 Vorgehensweise und Aufbau des JRC-Berichts	15
2.3.2 Ausgewogenheit der Darstellung, Daten- und Quellenauswahl	16
3 Kriterium 1 der Taxonomie-Verordnung – Beitrag zum Klimaschutz.....	17
3.1 Kernkraftwerke.....	18
3.1.1 Beitrag der Kernkraftwerke zum Klimaschutz im JRC-Bericht.....	18
3.1.2 Prognose der Kernenergienutzung im JRC-Bericht	19
3.2 Analyse des Beitrags von Small Modular Reactors zum Klimaschutz im JRC-Bericht	20
4 Kriterium 2 der Taxonomie-Verordnung - DNSH-Kriterien: Vom Uranabbau bis zum Kraftwerksbetrieb und -rückbau	22
4.1 Uranabbau und -verarbeitung.....	23
4.2 Umwandlung in Uranhexafluorid	24
4.3 Urananreicherung, Herstellung von Urandioxid-Brennelementen, Wiederaufbereitung, Herstellung von Mischoxid-Brennelementen	25
4.4 Kernkraftwerksbetrieb	27
4.5 Rückbau der Kernkraftwerke.....	28
4.6 Ionisierende Strahlung und ihre Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt während aller Lebenszyklusphasen (bis auf Entsorgung und Transporte).....	29

5 Kriterium 2 der Taxonomie-Verordnung – DNSH-Kriterien: Entsorgung, Transporte, Forschung und Entwicklung	30
5.1 Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle	30
5.2 Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle	31
5.3 Endlagerung hochradioaktiver Abfälle	36
5.4 Transporte	41
6 Künftige und weitere Kriterien der Taxonomie-Verordnung – weitere Nachhaltigkeitsziele und Mindeststandards.....	44
6.1 „Berücksichtigung künftiger Generationen“ und „partizipative Entscheidungsfindung“ bei der Endlagerung.....	45
6.2 Langfristiger Informations- und Wissenserhalt zur Endlagerung.....	47
6.3 Proliferation.....	48
6.4 Uranabbau - bergbauspezifischen Anforderungen an nachhaltigen Bergbau	49
Abkürzungen	51
Literatur/ Quellen.....	54

Zusammenfassung

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) hat das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) unter Beteiligung des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) den Bericht des Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Union (EU) „Technical assessment of nuclear energy with respect to the ‘do no significant harm’ criteria of Regulation (EU) 2020/852 (‘Taxonomy Regulation’)“ dahingehend geprüft, ob das JRC eine vollständige und nachvollziehbare technische Expertise zur möglichen Taxonomie-Fähigkeit der Nutzung der Kernspaltung zur Erzeugung von Energie (im Folgenden: Kernenergienutzung) vorgelegt hat.

Die Taxonomie-Verordnung definiert Kriterien, die bestimmen, ob eine Wirtschaftstätigkeit (und damit eine Investition in diese Tätigkeit) als ökologisch nachhaltig gilt. Das JRC, die Forschungsstelle der EU, kommt in seinem Bericht im März 2021 zum Ergebnis, dass nach seiner Auffassung auch für die Kernenergienutzung die Voraussetzungen für eine Aufnahme in die EU-Taxonomie im Hinblick auf die „Do No Significant Harm“ – Kriterien (DNSH) gegeben sind. Die Technical Expert Group (TEG) hatte die Aufnahme der Kernenergienutzung in die EU-Taxonomie zuvor noch nicht empfohlen und der EU-Kommission eine nähere Prüfung der DNSH-Kriterien nahegelegt.

Vorliegende Fachstellungnahme kommt zum Ergebnis, dass im JRC-Bericht Schlussfolgerungen getroffen wurden, deren fachliche Herleitung an zahlreichen Stellen nicht nachvollzogen werden kann. Darüber hinaus wurden Themenbereiche mit hoher Umweltrelevanz im JRC-Bericht nur sehr reduziert dargestellt bzw. ausgespart. So werden die Auswirkungen schwerer Unfälle – die es in den vergangenen Jahrzehnten der Nutzung dieser Energieform bereits mehrfach gegeben hat – auf die Umwelt nicht in die Bewertung der Taxonomie-Fähigkeit der Kernenergienutzung einbezogen. Dadurch stellt sich die Frage, ob das JRC einen zu engen Betrachtungsmaßstab wählt. Der genannte sowie weitere in dieser Fachstellungnahme aufgeführte Aspekte legen diesen Schluss nahe.

Ferner zeigt die vorliegende Fachstellungnahme auf, dass das JRC Themen zwar anreißt, diese dann allerdings nicht weiter berücksichtigt, obwohl sie in die Bewertung der Nachhaltigkeit der Kernenergienutzung einzubeziehen sind. Die Notwendigkeit, diese zu berücksichtigen, ergibt sich teilweise daraus, dass Auswirkungen auf die weiteren Umweltziele der Taxonomie-Verordnung bei einer umfassenderen Betrachtung zu erwarten sind oder zumindest nicht ausgeschlossen werden können. In anderen Fällen ergibt sie sich daraus, dass sich die Taxonomie-Verordnung in ihrem Nachhaltigkeitsverständnis auf den UN-Ansatz der Agenda 2030 bezieht, die etwa auch die Ziele „Berücksichtigung künftiger Generationen“ und „partizipative Entscheidungsfindung“ enthält. Eine Nachhaltigkeit, insbesondere auch für künftige Generationen, kann nur gewährleistet werden, wenn frühzeitig versucht wird, eine Akzeptanz in der Bevölkerung zu erreichen und den adäquaten Umgang künftiger Generationen mit der Kernenergienutzung und deren Hinterlassenschaften bzw. Abfällen zu ermöglichen und einen langfristigen Informations- und Wissenserhalt sicherzustellen. Prinzipiell ist festzustellen, dass das Problem der Entsorgung radioaktiver Abfälle bereits durch frühere Generationen auf heute verschoben wurde und zwangsläufig vielen weiteren Generationen ‚erhalten bleiben‘ wird. Das vom JRC beschriebene Prinzip der (Zitat) „no undue burdens for future generations“ (Seiten 205ff) ist damit bereits (nicht heilbar) verletzt, die DNSH-Hürde „significant[ly] harm“ bereits verletzt. Die Erzeugung großer Mengen gefährlicher Abfälle wird über Jahrzehnte ohne existierende und wirksame Entsorgungslösung fortgesetzt. Das JRC sagt selbst, dass die primäre und

beste Strategie des Waste Management ist, radioaktive Abfälle erst gar nicht zu erzeugen. Diese Bewertung wird jedoch im Bericht nicht konsequent angewendet.

Der JRC-Bericht betrachtet die Folgen und Risiken der Kernenergienutzung für Mensch und Umwelt sowie für nachfolgende Generationen nur unvollständig oder spart diese in seiner Bewertung aus. Soweit er sie behandelt, werden die Grundsätze wissenschaftlichen Arbeitens zum Teil nicht korrekt berücksichtigt. Der JRC-Bericht liefert somit einen unvollständigen Beitrag, mit dem die Nachhaltigkeit der Kernenergienutzung nicht umfassend bewertet werden kann.

1 Anlass und Hintergrund, Ziel, Vorgehensweise und Aufbau der Fachstellungnahme

1.1 Anlass und Hintergrund der Fachstellungnahme

Das Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Union (EU) hat im März 2021 den Bericht „Technical assessment of nuclear energy with respect to the ‘do no significant harm’ criteria of Regulation (EU) 2020/852 (‘Taxonomy Regulation’)“ vorgelegt. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) hat das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) am 20. April 2021 um eine wissenschaftliche Auswertung des JRC-Berichts unter Berücksichtigung der „Do No Significant Harm“- Kriterien der Taxonomie-Verordnung gebeten. Erbeten wurde eine Fachstellungnahme, die prüft, ob das JRC eine vollständige, nachvollziehbare und unabhängige technische Expertise zur möglichen Taxonomie-Fähigkeit von Nuklearenergie für die EU Kommission vorgelegt hat. Die vorliegende Fachstellungnahme fasst das Ergebnis der Auswertung zusammen. Für einzelne Fragestellungen hat das BASE das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hinzugezogen.

Das BMU ist für die Bundesrepublik Deutschland das für Fragen des Klimaschutzes, des Umweltschutzes und der nuklearen Sicherheit zuständige Ministerium. BASE und BfS sind wissenschaftlich-technischer Fachbehörden, die Forschungstätigkeiten im Rahmen ihrer gesetzlichen Aufgaben durchführen. Im Zuständigkeitsbereich des BASE liegen ferner Aufsicht und Genehmigung von Endlagern und die Aufsicht über das derzeit in der Bundesrepublik Deutschland laufende Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Zudem ist es Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren. Darüber hinaus ist das BASE u.a. die Genehmigungsbehörde für Zwischenlager und Transporte von hochradioaktiven Abfällen.

Ausgangspunkt der Fachstellungnahme von BASE und BfS ist die Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zu Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088 (ABl. L 198/13) – kurz: Taxonomie-Verordnung. Die Taxonomie-Verordnung definiert Kriterien, die bestimmen, ob eine Wirtschaftstätigkeit (und damit eine Investition in diese Tätigkeit) als ökologisch nachhaltig gilt. Zu diesen Kriterien gehört, dass eine Wirtschaftstätigkeit einen Beitrag zu einem der in der Taxonomie-Verordnung in Artikel 9 genannten Umweltziele Klimaschutz, Anpassung an den Klimawandel, nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen, Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft, Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung oder Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme leistet, ohne gleichzeitig ein anderes dieser Umweltziele zu beeinträchtigen, vgl. Art. 17 Taxonomie-Verordnung („do no significant harm“, kurz DNSH).

Die Verordnung wird durch delegierte Rechtsakte der Europäischen Kommission (EU-Kommission) konkretisiert. In diesen delegierten Rechtsakten legt die EU-Kommission sog. technische Bewertungskriterien fest, welche die Kriterien der Taxonomie-Verordnung auf einzelne Wirtschaftstätigkeiten herunterbrechen. Nur wenn eine Wirtschaftstätigkeit auch die für sie geltenden technischen Bewertungskriterien erfüllt, gilt sie als ökologisch nachhaltig. Die EU-Kommission hat am 21. April 2021 den Entwurf eines delegierten Rechtsakts vorgelegt, in dem Wirtschaftstätigkeiten aufgelistet sind, die aufgrund ihres Beitrags zum Klimaschutz und zur

Anpassung an den Klimawandel als nachhaltig gelten. Die Kernenergie ist darin bisher nicht als ökologisch nachhaltige Wirtschaftstätigkeit aufgenommen.

Der Entwurf des delegierten Rechtsakts baut auf den Empfehlungen der sog. Technical Expert Group (TEG) auf. Diese hatte die Kommission ins Leben gerufen, um sich bei der Umsetzung des „Action Plan: Financing Sustainable Growth“ vom 8.3.2018 beraten zu lassen - u.a. auch bei der Vorbereitung der Taxonomie-Verordnung. In ihrem Bericht vom 9. März 2020 "Taxonomy: Final report of the TEG on Sustainable Finance“ bzw. in dessen Anhang kommt die TEG zum Ergebnis, dass die Kernenergie zwar einen wesentlichen Beitrag zum Umweltziel Klimaschutz leistet, erhebliche Beeinträchtigungen für andere Umweltziele aber nicht ausgeschlossen werden könnten. Begründet wird das im Wesentlichen mit den offenen Fragen bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, insbesondere dem Mangel an empirischen Daten zu einer sicheren Entsorgung durch Endlagerung. Die TEG hatte die Aufnahme der Kernenergienutzung in die EU-Taxonomie daher zum damaligen Zeitpunkt nicht empfohlen und eine vertiefte Prüfung der DNSH-Kriterien empfohlen (TEG, 2020b).

Vor diesem Hintergrund ist die derzeit auf europäischer Ebene laufende Diskussion zu betrachten, ob die Nutzung der Kernenergie in die Taxonomie aufgenommen werden soll. Unklar ist insbesondere, ob die Kernenergienutzung die DNSH-Kriterien erfüllt. Anknüpfend an die von der TEG offen gelassenen Fragen hat die EU-Kommission die gemeinsame Forschungsstelle der EU, das JRC, um eine Prüfung gebeten, ob die Kernenergie die Voraussetzungen für eine Aufnahme in die Taxonomie erfüllt und welche technischen Bewertungskriterien anzuwenden wären. Das JRC hat seinen Bericht im März 2021 vorgelegt und kommt zum Ergebnis, dass die Voraussetzungen für eine Aufnahme der Kernenergie in die EU-Taxonomie erfüllt seien.

1.2 Ziel der Fachstellungnahme

Ziel der Auswertung des JRC-Berichts durch BASE und BfS ist es festzustellen, ob das JRC die Taxonomie-Fähigkeit der Kernenergienutzung argumentativ vollständig und nachvollziehbar bewertet - insbesondere im Hinblick auf die DNSH-Kriterien der Taxonomie-Verordnung. Des Weiteren hat das BMU um Prüfung der Unabhängigkeit der Expertise des JRC gebeten. Ob das JRC unabhängig gearbeitet hat, ergibt sich im Rahmen dieser Stellungnahme aus der Prüfung der Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit der Argumente des JRC. Der Fokus der Prüfung liegt auf den Themen nukleare Sicherheit, Strahlenschutz sowie nukleare Entsorgungsfragen. Grundlegende Leitfragen waren, ob die Vorgehensweise des JRC der guten wissenschaftlichen Praxis entspricht und ob das JRC der EU-Kommission eine vollständige und nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage vorgelegt hat.

Eine solche Prüfung des JRC-Berichts ist aus mehreren Gründen geboten:

- Voraussetzung für eine tragfähige Klassifizierung ist, dass die Tatsachengrundlage insbesondere zu möglichen erheblichen Beeinträchtigungen von Umweltzielen durch eine Wirtschaftstätigkeit (DNSH-Kriterien) vollständig und nachvollziehbar ermittelt wurde (vgl. auch JRC-Bericht Teil A 1.3.2.3, S. 22 sowie 5.3, S. 192).
- Die Taxonomie-Verordnung selbst fordert gemäß Art. 19 Abs. 1 Buchst. f von der EU-Kommission, technische Bewertungskriterien festzulegen, die sich auf schlüssige wissenschaftliche Erkenntnisse stützen. Aus Erwägungsgrund (40) geht hervor, dass die Risiken einer Wirtschaftstätigkeit anhand einer wissenschaftlichen Bewertung zu bestimmen

sind. Die Kriterien müssen nach Art. 19 Abs. 1 Buchst. g Taxonomie-Verordnung die Umweltauswirkungen des gesamten Lebenszyklus einer Wirtschaftstätigkeit berücksichtigen.

Die vorliegende Fachstellungnahme zur Auswertung des JRC-Berichts bildet somit eine Grundlage für die anstehenden fachlichen Diskussionen mit der EU-Kommission im Hinblick auf das Verfahren zur Taxierung und zum Erlass der delegierten Rechtsakte.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Fachstellungnahme

Die Fachstellungnahme wurde von einer abteilungsübergreifenden Arbeitsgruppe des BASE und BfS erstellt. Das BfS zeichnet dabei verantwortlich für die Aspekte des Strahlenschutzes. Das BASE deckt die Themen nukleare Sicherheit und Entsorgung ab. In der Bearbeitung musste konstatiert werden, dass der JRC-Bericht richtigerweise auch zu einigen Themenfeldern Bezug nimmt, die in der Fachstellungnahme des BASE nicht vertieft betrachtet werden konnten, da die bundesdeutsche Zuständigkeit bei anderen Behörden als BASE und BfS liegt. Es handelt sich hierbei in erster Linie um die folgenden Kapitel des JRC-Berichts:

A 3.2.3 DNSH to the sustainable use and protection of water and marine resources

A 3.2.5 DNSH to pollution prevention and control

A 3.2.6 DNSH to the protection and restoration of biodiversity and ecosystems

Die zuständige Behörde ist in diesem Fall für die Fragestellungen zu den Umweltgütern das Umweltbundesamt (UBA).

Tabellarische Auswertung und Textteil

Der Textteil der Fachstellungnahme gründet auf einer Gegenüberstellung von Aussagen des JRC-Berichts mit der Prüfung dieser Aussagen auf Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit in Tabellenform. Die tabellarische Auswertung der im JRC-Bericht durch BASE und BfS identifizierten Lücken bzw. Schwachstellen wird getrennt von der finalen Fassung dieser Fachstellungnahme auf der BASE-Website zu Vergleichszwecken veröffentlicht werden. Dieser Version ist sie aus redaktionellen Gründen noch nicht beigelegt. Das Literaturverzeichnis umfasst jedoch bereits die in der tabellarischen Auswertung genutzten Quellen.

Die Hauptaussagen zu Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit des JRC-Berichts, die sich aus der gewählten Form der Auswertung ableiten lassen, sind in den folgenden Kapiteln dieser Fachstellungnahme zusammenfassend dargestellt. Die Fachstellungnahme ist als eigenständiges, für sich sprechendes Dokument angelegt. Vorgenannte tabellarische Auswertung wird die Argumentation weiter unterfüttern und das Vorgehen des BASE verdeutlichen.

Hauptaussagen der Auswertung des JRC-Berichts in tabellarischer Form

Festgestellt wurde, dass das JRC umweltrelevante Aspekte der Kernenergienutzung nur knapp behandelt bzw. in der Bewertung nicht berücksichtigt. Dabei legt das JRC nicht explizit dar, ob und inwiefern dieses Vorgehen von der Taxonomie-Verordnung gestützt wird. Letztlich stellt sich die Frage, ob das JRC einen zu engen Betrachtungsmaßstab wählt.

Die Auswertung hat ferner ergeben, dass die fachliche Stringenz und Ausgewogenheit der Vorgehensweise des JRC bei der Prüfung der DNSH-Kriterien zu hinterfragen ist. Einzelne Inhalte bzw.

Stationen des Lebenszyklus der Kernenergienutzung wurden nicht vollständig und ausreichend bewertet.

Gliederung des Textteils der Fachstellungnahme

Entsprechend dieser Prüfergebnisse beginnt der Textteil mit einer kritischen Auseinandersetzung mit den nicht oder nur knapp berücksichtigten Themen im JRC-Bericht. Weitere übergeordnete methodische Fragen zur Prüfung der DNSH-Kriterien durch das JRC werden angesprochen (dazu Kapitel 2 dieser Fachstellungnahme). Es folgt die kritische Würdigung des JRC-Berichts insbesondere in Bezug auf die DNSH-Kriterien – nicht jedoch, ohne kurz die Ausführungen des JRC zum Kriterium des Beitrags zum Klimaschutz zu würdigen (vgl. Kapitel 3). Die Darstellung der DNSH-Kriterien folgt – angelehnt an den JRC-Bericht in Teil A 3.3 und Teil B - den Lebenszyklusphasen der Kernenergienutzung, wobei sich ein Kapitel den Phasen der Energiegewinnung und dem Kraftwerksbetrieb einschließlich Rückbau (vgl. Kapitel 4) und ein Kapitel der Entsorgungsproblematik widmet (vgl. Kapitel 5).

In den Kapiteln 3 bis 5 dieser Fachstellungnahme erfolgt vor allem die Auseinandersetzung mit den vom JRC herangezogenen fachwissenschaftlichen Grundlagen zu den Kriterien der Taxonomie-Verordnung im Hinblick auf Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit. Bei der Prüfung des JRC-Berichts wurden Grundsätze der guten wissenschaftlichen Praxis, wie sie z.B. die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) in ihren „Leitlinien zur guten wissenschaftlichen Praxis“ definiert (DFG, 2019), als Basis der wissenschaftlichen Würdigung herangezogen. Außerdem werden die Folgerungen des JRC aus den fachwissenschaftlichen Grundlagen für die technischen Bewertungskriterien (technical screening criteria – TSC) betrachtet, wo diese als problematisch aufgefallen sind.

Zur Binnengliederung der Unterkapitel wurden Unterüberschriften verwendet. Wo erforderlich, kennzeichnen fette unterstrichene Unterüberschriften jeweils die Ausführungen zu den fachwissenschaftlichen Ausführungen des JRC einerseits und zu den vom JRC entwickelten TSC andererseits. Unterstrichene Überschriften im Normaldruck werden – bereits in diesem Unterkapitel - für einzelne Unterthemen verwendet.

Kapitel 6 gibt schließlich einen Ausblick auf Aspekte der Kernenergienutzung, die zwar nicht im Zuge einer JRC-Prüfung, aber der Mindestziele nach Art. 18 Taxonomie-Verordnung bzw. weiterer (künftig zu definierender) Nachhaltigkeitsziele und damit für eine umfassende Prüfung der Nachhaltigkeit relevant sind.

2 Kritische Betrachtung der Methodik des JRC – DNSH-Kriterien und Nutzung der Kernenergie

Der JRC-Bericht bezieht Aspekte der Kernenergienutzung, die zu erheblichen Beeinträchtigungen von Umweltzielen führen bzw. solche verhindern helfen können, nicht in die Bewertung der Taxonomie-Fähigkeit der Kernenergienutzung ein (dazu nachfolgend Kapitel 2.2 dieser Fachstellungnahme). Der Grund hierfür lässt sich nicht unmittelbar nachvollziehen, weil das JRC den Prüfungs- bzw. Bewertungsrahmen für die Bewertung der DNSH-Kriterien nicht an zentraler Stelle reflektiert. Fraglich ist insofern, ob das JRC einen zu engen Betrachtungsrahmen wählt oder ob die Nichteinbeziehung sonstiger Aspekte von der Taxonomie-Verordnung gestützt wird (dazu 2.1). Die Methodik des JRC entspricht im Übrigen nicht in vollem Umfang den Anforderungen an eine

wissenschaftliche Bewertung, welche die Taxonomie-Verordnung aber fordert. Sie ist z.B. bzgl. fachlicher Stringenz und Quellenauswahl zu hinterfragen (dazu 2.3).

2.1 Prüfungsmaßstab des JRC bei der Bewertung der DNSH-Kriterien

Prüfungsmaßstab des JRC

Das JRC thematisiert einige wesentliche Themen der Kernenergienutzung. Schwere Unfälle beim Kraftwerksbetrieb (dazu JRC-Bericht, Teil A 3.5, S. 175ff) führen zweifelsohne zu erheblichen Umweltauswirkungen. Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (kurz: SEWD; dazu JRC-Bericht, Teil A 3.3.5.1.5, S. 109) können ebenfalls zu Umweltauswirkungen führen. Langfristiger Informations- und Wissenserhalt (dazu JRC-Bericht, Teil B 1.2, S. 205ff) sind erforderlich, um nachfolgende Generationen über die Endlager zu informieren und so auch vor Schäden durch ionisierende Strahlung zu bewahren. Forschung und Entwicklung (dazu JRC-Bericht, Teil B 6) sind angesichts nach wie vor offener Fragen vor allem hinsichtlich der Endlagerung unabdingbar. Der JRC-Bericht erörtert diese Themen zwar, jedoch nicht in der gebotenen fachlichen Tiefe. Außerdem bezieht das JRC die Themen nicht in die Bewertung der DNSH-Kriterien ein bzw. stellt keine Verbindung zur Taxonomie-Verordnung her.

Erforderlich für eine technische-wissenschaftliche Untersuchung der Taxonomiefähigkeit der Kernenergienutzung wäre, auf der Grundlage der Taxonomie-Verordnung einen Untersuchungsrahmen bzw. Prüfungsmaßstab zu entwickeln, welche Aspekte der Kernenergienutzung in die Prüfung der DNSH-Kriterien einzubeziehen sind. Das leistet das JRC nicht in ausreichendem Maße. Die o.g. Themen werden in der Folge nicht ausreichend beleuchtet und ihre Bewertungsrelevanz ist nicht nachvollziehbar:

Das JRC erachtet die DNSH-Kriterien für Tätigkeiten im Bereich der Kernkraft als erfüllt, wenn die regulatorischen Anforderungen - insbesondere an den Safety Case und die Umweltverträglichkeit - eingehalten sind. Das wird im JRC-Bericht an mehreren Stellen deutlich (vgl. nur JRC-Bericht, Executive Summary, S. 7, erster und zweiter Anstrich; S. 8, erster, achter und zehnter Anstrich; Teil A 1.3.2.3, S. 22f sowie Teil A 5.1, S. 190f; Annex 1), ohne dass an zentraler Stelle ein Prüfungsmaßstab entwickelt wird.

Die Herangehensweise des JRC bringt mit sich, dass der Nachweis der ökologischen Nachhaltigkeit letztlich im Rahmen von Genehmigungs- oder Zulassungsverfahren für die jeweilige Aktivität erbracht wird bzw. werden soll. Für die Endlagerung werden Fallbeispiele (Finnland, Schweden, Frankreich) angeführt, nach denen eine sichere Endlagerung unter obigen Voraussetzungen möglich erscheint. Entsprechend basieren dann die TSC darauf, ob diese Regeln und Richtlinien existieren und in Zulassungs- und Genehmigungsverfahren abgearbeitet wurden (vgl. auch JRC-Bericht Teil A 5.2, S. 191). Ist das der Fall, wären dem JRC zufolge die Kernenergienutzung und die Endlagerung als Teil des Kernenergie-Lifecycles vereinbar mit den DNSH-Kriterien.

Vorgaben der Taxonomie-Verordnung und Vorgehensweise der TEG

Das JRC lehnt sich mit dieser Vorgehensweise an die TEG an. Die TEG fordert von einer Wirtschaftstätigkeit, dass sie jedenfalls („at minimum“) mit den umweltrechtlichen Vorschriften der EU vereinbar ist (TEG 2020b, S. 33).

Die Taxonomie-Verordnung selbst stützt zwar dieses Vorgehen der TEG und das daran angelehnte Vorgehen des JRC. Denn aus den Erwägungsgründen (26) bis (30) und (40) der Taxonomie-

Verordnung geht hervor, dass die Umweltziele im Lichte der einschlägigen Rechtsvorschriften des Unionsrechts auszulegen sind und dass die Einhaltung von Unionsrecht die Mindestanforderung für die DNSH-Konformität einer Wirtschaftstätigkeit darstellt. Überdies verweist Erwägungsgrund (40) auf Art. 191 AEUV und formuliert, dass das Vorsorgeprinzip gilt, wenn „sich ein Risiko nicht mit hinreichender Sicherheit anhand einer wissenschaftlichen Bewertung bestimmen“ lässt.

Die Taxonomie-Verordnung legt damit nahe, dass sämtliche Risiken einer Wirtschaftstätigkeit einer gründlichen, wissenschaftlichen Betrachtung bedürfen, Ungewissheiten sauber zu benennen sind und die Nichtberücksichtigung von Risiken bei der Bewertung einer Wirtschaftstätigkeit anhand der DNSH-Kriterien einer vertieften Begründung bedarf – nicht zuletzt, um dem Vorsorgeprinzip Genüge zu tun. Diese Anforderungen reflektiert das JRC nicht. Der Diskussion, ob im Fall der Kernenergienutzung für die Bewertung der DNSH-Kriterien ein über die regulatorischen Anforderungen hinausreichender Prüfungs- und Bewertungsrahmen angezeigt ist, stellt sich das JRC dementsprechend nicht. Folge ist zum einen, dass umweltrelevante Aspekte der Kernenergienutzung nicht in die Bewertung einbezogen werden. Zum anderen erkennt das JRC nicht an, dass der Verweis auf die regulatorischen Anforderungen allein zu kurz greift, um die DNSH-Kriterien im Hinblick auf die Umweltziele bewerten zu können.

Einige der vom JRC adressierten Aspekte wie der Schutz der nachfolgenden Generationen weisen zwar über die Umweltziele der Taxonomie-Verordnung hinaus. Im JRC-Bericht fehlt allerdings eine Reflektion, ob und inwiefern dieser (und weitere) Aspekte in eine Prüfung einer in weiterem Sinne zu verstehenden DNSH-Hürde einzubeziehen wären. Diese Fachstellungnahme betrachtet auch solche Aspekte in Kapitel 6.

Weitere Gründe für einen erweiterten Betrachtungsrahmen

Dass der Betrachtungsrahmen bzw. Prüfungsmaßstab für die DNSH-Kriterien nicht nur von den regulatorischen Anforderungen gesetzt wird, legen auch die gesamtgesellschaftlichen Implikationen und Folgen der Nutzung der Kernenergie nahe:

Bezüglich geplanter Aktivitäten fehlen im JRC-Bericht die indirekten Folgen der Kerntechnik, die sich nicht durch die effektive Dosis oder die Aktivitätskonzentration von Radon-222 (Rn-222) in der Atemluft (oder daraus abgeleitete Größen) quantifizieren lassen. Hierzu zählt insbesondere der Aufwand, der durch mangelnde individuelle und gesellschaftliche Akzeptanz und die damit verbundenen gesellschaftlichen Kosten der Kerntechnik und des Kernbrennstoffkreislaufs entsteht. In Deutschland reicht das Spektrum hier von der Planung und Genehmigung kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen (z. B. Erkundung des Salzstocks Gorleben, Planung der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf) über den Betrieb kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen (z. B. Kernkraftwerken) bis hin zur Entlassung geringfügig radioaktiven Materials, das z. B. beim Abbau von Kernkraftwerken anfällt, aus der atomrechtlichen Überwachung (Freigabe).

Auch in Bezug auf die Schadensfolgen eines schweren nuklearen Unfalls greift die JRC-Studie viel zu kurz, da sie sämtliche nichtradiologische Folgewirkungen ausblendet. Hierbei geht es nicht nur um psychosoziale Folgeerkrankungen, die sehr wohl – sogar auch in Todesfallzahlen – nachweisbar sind (Hayakawa, 2016), sondern auch um gesellschaftliche Folgen wie den massiven Verlust von Lebensqualität, sozialem Zusammenhalt der Gesellschaft und ökonomischer Prosperität sowie um die fehlende Perspektive, in den betroffenen Gebieten in absehbarer Zeit zur Normalität zurückzukehren (Bromet und Havenaar, 2007; Hasegawa et al., 2015; Shigemura et al., 2020).

Insgesamt ergeben sich zum Beispiel in Deutschland aus den heftigen gesellschaftlichen Diskussionen um die Risiken der Kerntechnik und die Risiken verbunden mit der Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Abfälle im Vergleich zu anderen Technologien der Energiegewinnung hohe gesellschaftliche Kosten, auf die der JRC-Bericht nicht eingeht. Diese gesellschaftlichen Kosten entstehen, wenn sich die Kernenergie nicht „reibungsfrei“ in den gesellschaftlichen Kontext einfügt, sondern – wie in Deutschland – jahrzehntelang äußerst kontrovers diskutiert wird, Widerstände hervorruft, Protestaktionen veranlasst, Vertrauen in den Staat allgemein, in die Politik und in die handelnden Behörden zerstört und zu Verzögerungen bei der Planung und Umsetzung von Vorhaben führt.

Oftmals muss großer Aufwand betrieben werden, um die Kernenergie als Hochrisikotechnologie „gesellschaftsfähig“ zu machen, um gesellschaftliches Vertrauen und Akzeptanz zu erhöhen. Dieser Aufwand und die volkswirtschaftlichen Folgekosten sollten als inhärente Kosten bei den Betrachtungen der Vergleiche mit anderen Energiequellen mit einbezogen werden.

Folgen der engen Betrachtungsweise des JRC

Aus dem Umstand, dass das JRC der Frage des Prüfungsmaßstabs zu wenig Aufmerksamkeit widmet, folgt, dass umweltrelevante Aspekte der Kernenergienutzung zwar erörtert, aber nicht in die Bewertung einbezogen werden und dass das JRC nicht reflektiert, ob die Taxonomie-Verordnung dieses Vorgehen stützt (dazu nachfolgend Kapitel 2.2 dieser Fachstellungnahme). Weitere Nachhaltigkeitsaspekte wie die Berücksichtigung künftiger Generationen werden ebenfalls nicht ausreichend gewürdigt, obwohl auch die Taxonomie-Verordnung das nahelegt (dazu Kapitel 6 dieser Fachstellungnahme). Im Folgenden wird auch auf diese Feststellungen Bezug genommen, soweit der Prüfungsmaßstab als problematisch aufgefallen ist.

2.2 Ausgelassene umweltrelevante Aspekte der Kernenergienutzung und der Entsorgung radioaktiver Abfälle bei der Bewertung der DNSH-Kriterien im JRC-Bericht

2.2.1 Unfälle

Schwere Unfälle werden vom JRC zwar erörtert (JRC-Bericht, Teil A 3.5, S. 175ff und 4.3, S. 186f), jedoch nicht in die Bewertung der DNSH-Kriterien einbezogen (vgl. JRC-Bericht, Executive Summary, S. 10, vierter Anstrich).

Die JRC leitet diese Vorgehensweise allenfalls implizit aus der Taxonomie-Verordnung und den Ausarbeitungen der TEG (TEG, 2020a) und deren technischen Bewertungskriterien (TEG, 2020b) ab. Die Ausarbeitungen der TEG und die darauf aufbauenden technischen Bewertungskriterien sehen die Berücksichtigung von schweren Unfällen auch in keiner der sonst bewerteten Wirtschaftstätigkeiten vor. Dies zugrunde gelegt, stellen die Ausführungen des JRC in Bezug zu Unfällen eine Ergänzung zum Gesamtüberblick über die Folgen der Kernenergienutzung dar, sind aber für das JRC nicht bewertungsrelevant.

Es ist jedoch fraglich, ob die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von Energieträgern Aspekte von auslegungsüberschreitenden Ereignissen ausblenden darf. So kann es beim Betrieb von Kernkraftwerken über die im JRC-Bericht dargestellten potenziellen Umweltauswirkungen durch die genehmigte Ableitung von radioaktiven Stoffen oder die Nutzung von Kühlwasser hinaus durch schwere Unfälle zu erheblich größeren Umweltauswirkungen kommen, insbesondere durch unkontrollierte Freisetzungen radioaktiver Stoffe. Die kerntechnischen Regelwerke sehen zwar zur

Vermeidung solcher Freisetzungen durch Störfälle ein gestaffeltes Sicherheitskonzept vor (WENRA, 2014; BMUB, 2015). Unfallbedingte Freisetzungen bleiben jedoch grundsätzlich möglich (dazu Kapitel 4.4 dieser Fachstellungnahme) und haben sich in den vergangenen Jahrzehnten bereits mehrfach ereignet.

Die damit verbundenen Umweltauswirkungen werden infolge des Bewertungsansatzes des JRC im JRC-Bericht nicht näher betrachtet. Das JRC beschränkt sich bei der Darstellung von Unfallfolgen im Wesentlichen auf die Betrachtung von menschlichen Todesopfern. Folgen schwerer Unfälle z.B. im Hinblick auf Gesundheit, Klimaschutz, Biodiversität, Boden- und Gewässerschutz etc. bleiben unberücksichtigt. Die Auslegungsstörfälle überschreitenden Ereignisse werden im Regelwerk mit der sog. 4. Sicherheitsebene zwar berücksichtigt, indem Maßnahmen zur Minderung des Unfallrisikos vorgesehen sind. Wie sich die trotzdem möglichen unfallbedingten Freisetzungen auf die Umweltziele auswirken, prüft das JRC aber nicht.

Bei der Betrachtung der menschlichen Todesopfer fällt auf, dass der Vergleich der Opferzahlen aus kerntechnischen Unfällen mit jenen aus Unfällen anderer Energieträger nur unter Angabe von Punktwerten und ohne Darstellung der Ungewissheiten erfolgt. Wenn man z.B. Kennzahlen wie die durchschnittliche Letalität pro erzeugter TWh für Kernenergie- und fossile Energieerzeugung vergleicht (JRC-Bericht, Teil A, Abb. 3.5-1, S. 176), sollten hierbei die bzgl. Eintrittswahrscheinlichkeiten und zeitlichen Verläufen sehr unterschiedlichen Ausprägungen letaler Auswirkungen der unterschiedlichen Energieträger bei Wahl des Maßstabs bedacht und dargestellt werden. So treten bei fossiler Energieerzeugung die letalen Auswirkungen praktisch kontinuierlich an. Über den Beitrag fossiler Energieerzeugung zum Klimawandel hinaus gibt es dabei eine zusätzliche, in die Zukunft gerichtete Komponente. Hingegen kann es bei der Kernenergienutzung zu seltenen, aber gravierenden Unfallereignissen kommen. Auch geht von der Kernenergienutzung durch die Erzeugung radioaktiver Abfälle ein über die Nutzungsdauer der Anlagen selbst zeitlich weit hinausgehendes Risiko aus. Ausgeblendet werden auch psychosoziale Folgeerkrankungen von Unfällen, die sehr wohl auch in Todesfallzahlen nachweisbar sind (Hayakawa, 2016) (vgl. oben Kapitel 2.1). Unfallfolgen unterscheiden sich also bei den verschiedenen Formen der Energieerzeugung. Im Übrigen ist zu berücksichtigen, dass Ereignisse mit Aktivitätsfreisetzung sich auch in der Phase von Stilllegung und Rückbau von Kernkraftwerken sowie in den weitaus längeren Zeiträumen bei der Einlagerung radioaktiven Materials ereignen können. Das wird im JRC-Bericht nicht näher thematisiert.

Grundlage der Diskussion schwerer Unfälle im JRC-Bericht ist die probabilistische Sicherheitsanalyse Stufe 3, die neben der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Unfalls und der damit verbundenen Freisetzung von Radionukliden auch die Umweltauswirkungen umfasst. Anzumerken ist, dass im Gegensatz zu Schadenshäufigkeiten bei anderen Energieformen für nukleare Unfälle angenommene bzw. abgeschätzte Wahrscheinlichkeiten von den internationalen Notfallschutz-Experten diskutiert werden. Damit werden Wahrscheinlichkeiten mit Häufigkeiten verglichen, was konzeptionell fragwürdig ist. Die Problematik bei der Bewertung des Risikos in der Einheit Todesfälle pro GWh bei schweren nuklearen Unfällen liegt in deren Seltenheit in Verbindung mit den gravierenden Folgen. Der Vergleich in Abbildung 3.5-1 des JRC-Berichts ist insofern irreführend, als hier eine Vergleichszahl als Produkt zweier Zahlen ermittelt wird, die als Grenzfälle des jeweiligen Modells einmal extrem klein und einmal extrem groß sind. Das Produkt einer (unsicheren) extrem kleinen Zahl und einer (unsicheren) extrem großen Zahl ist nur wenig aussagekräftig.

Die Schadenshäufigkeit berücksichtigt nur bekannte Risiken, nicht die unbekanntes („known unknowns“ versus „unknown unknowns“). Nach der Katastrophe von Fukushima ist in Deutschland

eine Begründung für die weitere Nutzung der Kernenergie mit Verweis auf eine geringe Wahrscheinlichkeit („Restrisiko“) nicht konsensfähig bzw. wird von einer breiten Mehrheit in Politik, Gesellschaft und Wissenschaft abgelehnt, da die Risikoabschätzung selbst mit einer nicht quantifizierten Ungewissheit behaftet ist.

Bei der Planung des radiologischen Notfallschutzes in Deutschland wurden folgerichtig z. B. bei der Ausweitung der Planungsradien explizit alle Szenarien eingeschlossen, die physikalisch möglich sind: „Was denkbar ist, darauf muss man sich auch vorbereiten.“ (in Anlehnung an (SSK, 2015)). Entsprechende Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (SSK) folgen auch dieser Logik. Letztlich beruht der beschleunigte Ausstiegsbeschluss der Bundesregierung vom Sommer 2011 genau auf dieser Sichtweise. Diese Argumentationslinie wird im Bericht des JRC ausgeblendet.

Festzuhalten ist: Schwere Unfälle in Kernkraftwerken können unzweifelhaft zu erheblichen Beeinträchtigungen von Umweltzielen führen, wobei die Schadensfolgen von Unfällen im Vergleich zu anderen Wirtschaftstätigkeiten besonders gravierend sein und sich weit über nationale Grenzen hinaus erstrecken können. Überdies herrscht in der politisch-gesellschaftlichen Diskussion nicht nur in den EU-Mitgliedstaaten Uneinigkeit, ob dieses Risiko akzeptabel ist. Vor diesem Hintergrund ist der Verweis auf den regulatorischen Rahmen unbefriedigend, weil dieser schwere Unfälle nicht ausreichend berücksichtigt.

Ob der vom JRC gewählte Betrachtungsrahmen sich aus der Taxonomie-Verordnung ergibt oder ob diese nicht vielmehr einen weiteren Betrachtungsrahmen zulässt bzw. gebietet, geht aus dem JRC-Bericht nicht hervor. Der Verweis der Taxonomie-Verordnung auf das Vorsorgeprinzip und das daraus folgende Erfordernis, sämtliche Umweltrisiken zu betrachten, sprechen eher für einen solchen weiteren Betrachtungsrahmen (vgl. dazu Kapitel 2.1 dieser Fachstellungnahme).

Die geltende Taxonomie-Verordnung gebietet bereits einen weiteren Betrachtungsrahmen, der die Umweltfolgen von Unfällen berücksichtigt. Zugleich ist auf Folgendes hinzuweisen: Diskussionen zur Notwendigkeit der Festlegung von prinzipiell ausgeschlossenen Aktivitäten in der Taxonomie-Verordnung, da sie a priori die DNSH-Kriterien nicht erfüllen, werden bereits in verschiedenen Organisationen geführt; die Diskussionen zeigen die prinzipielle Bedeutung dieser Frage (siehe hierzu z.B. (NABU, 2021)).

Die Taxonomie-Verordnung wäre auch für eine ergänzende regulatorische Entscheidung speziell zum Ausschluss der Kernenergienutzung durchaus offen. So hält sie bereits eine spezifische Ausnahme in Form des Artikels 19 Abs. 3 Taxonomie-Verordnung bereit, wenn auch ohne Bezug zu Schadensereignissen. Die Nutzung fester fossiler Brennstoffe zur Stromerzeugung wird darin ausgeschlossen. Dies könnte aufgrund des spezifischen Unfallrisikos ähnlich für die Kernenergienutzung geregelt werden.

2.2.2 Ungewissheiten

Unberücksichtigt bleiben aufgrund des Prüfungsmaßstabs des JRC Ungewissheiten, die sich auch angesichts spezifizierter regulatorischer Anforderungen – d.h. des gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerks – nicht ausräumen lassen.

Die Thematik Ungewissheiten spielt im Zusammenhang mit der Sicherheitsaussage von Endlagern eine wesentliche Rolle. Allerdings ist dieses Thema im JRC-Bericht z.B. in Teil B 6, S. 277ff nicht ausreichend gewürdigt worden. So gibt es eine Reihe von Ungewissheiten, die nicht weiter reduziert bzw. aufgelöst werden können. Ein Beispiel hierfür sind die Auswirkungen zukünftiger Kaltzeiten,

deren Auftreten in Deutschland innerhalb der nächsten eine Millionen Jahre zwar als gesichert angesehen werden kann, eine ‚exakte‘ zeitliche Vorhersage mit einer genauen Lokalisierung von möglichen Inlandsvergleitungen ist jedoch nicht möglich (GRS, 2018). Neben den Ungewissheiten z. B. zu zukünftigen Klimaentwicklungen sind vor allem auch diejenigen Ungewissheiten verbunden mit dem zukünftigen Handeln von Mensch und Gesellschaft sowie des sozialen Verhaltens zu nennen. Hier zeigt die nicht auszuschließende Möglichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in ein Endlager die Grenzen hinsichtlich einer sicherheitstechnischen Bewertung über lange Zeiträume auf (vgl. hierzu auch unten die Ausführungen zu langfristigem Informations- und Wissenserhalt, vor allem im Hinblick auf Human Intrusion). Ungewissheiten betreffen auch die möglichen Beeinträchtigungen von Umweltzielen z.B. im Rahmen der Endlagerung, wenn es um die Robustheit von Barrieren geht (näher dazu unter Kapitel 5.3 dieser Fachstellungnahme).

Ferner vernachlässigt die Auffassung des JRC, die Sicherheit von Endlagern für die zugrunde gelegten Isolationszeiträume der Abfälle von der Umwelt sei generell uneingeschränkt gegeben (JRC-Bericht, Teil B 5.1, S. 244, S. 246 und S. 247 sowie Teil B 5.2.2, S. 250 und Teil B 5.2.4, S. 260), die Faktenlage, dass innerhalb und außerhalb der Länder, die ein oder mehrere Endlager für radioaktiver Abfälle vorsehen, unterschiedliche Endlagerkonzeptionen, Standorte mit unterschiedlichen topografischen und geologischen Randbedingungen, Sicherheits- und Bewertungskonzepte und nationalen regulatorischen Sicherheitsanforderungen vorliegen (Charlier, 2019).

Im Prinzip ist jedes Endlager ein Unikat, das aufgrund der genannten unterschiedlichen Rahmenbedingungen einer individuellen Sicherheitsbeurteilung bedarf. Die Sicherheitsbeurteilung liegt dabei in der Verantwortung des jeweiligen Landes, in dem das Endlager errichtet wird. Die Grundlage für die Sicherheitsbeurteilung bilden die jeweiligen Gesetze und Verordnungen sowie untergesetzliches Regelwerk. Hierbei bestehen sicherlich Unterschiede zwischen den einzelnen Ländern hinsichtlich des rechtlichen Rahmens (GRS, 2009). Letztendlich wird sich, wenn auch nicht grundlegend, aber im Detail, ein unterschiedliches Sicherheitsniveau ergeben.

Darüber hinaus liegen in den einzelnen Ländern nicht gleiche geologische Voraussetzungen vor (Charlier, 2019; GRS, 2009). So gibt es Länder, die hinsichtlich ihrer Lage eine vielseitige Geologie besitzen und wiederum andere Länder, bei denen die Wahl z. B. für ein Wirtsgestein, das das Endlager aufnehmen soll, mehr oder weniger vorgegeben ist (siehe hierzu auch BASE Infoplattform: https://www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/Radioaktiver-Abfall/Loesungen-anderer-Laender/loesungen-anderer-laender_node.html). Die Auswahl des Wirtsgesteins ist jedoch mitbestimmend für die Ausgestaltung und Konzeption des Endlagers sowie dem unterliegenden Sicherheitskonzept. Hierdurch verschiebt sich möglicherweise auch die Interessenslage von schwerpunktmäßig zu erforschenden Aspekten für eine sichere Endlagerung. Auch wenn zum Schluss alle Aspekte beleuchtet und das Endlagersystem als genehmigungsfähig angesehen wird, verbleiben Ungewissheiten, die sich nicht auflösen lassen.

Aus den genannten Gründen wird ersichtlich, dass die Frage nach der sicheren Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zwar ein gemeinsames europäisches Thema ist, jedoch die Umsetzung und die Wege für eine Umsetzung in den Mitgliedsstaaten sehr vielschichtig sein können. Zudem räumt der Verweis auf regulatorische Anforderungen gewisse Ungewissheiten nicht aus. Daher ist der Ansatz einer allgemeinen Feststellung, dass die Frage nach der sicheren Endlagerung hochradioaktiver Abfälle auch mit Blick auf die Nachhaltigkeit gelöst ist, wenn die jeweiligen zugrunde liegenden nationalen und internationalen regulatorischen Vorgaben bezüglich der

Sicherheit eingehalten werden und für die Zukunft auch unverändert Bestand haben, nicht von der notwendigen wissenschaftlichen Sorgfaltspflicht getragen.

2.2.3 Forschung und Entwicklung

Auch der enorme Aufwand in der Forschung, der in der Vergangenheit, aktuell und auch noch zukünftig betrieben wurde bzw. wird, macht die Komplexität der mit der Sicherheit eines Endlagersystems einhergehenden Fragestellung deutlich. Eine Vielzahl konzeptioneller Fragen und fachlicher Details sind noch zu klären. Möglicherweise lassen sich einige Fragestellungen nicht vollständig auflösen und bleiben mit Ungewissheiten behaftet.

Es fällt auf, dass der JRC-Bericht das Thema Forschung und Entwicklung zwar behandelt, eine explizite Verbindung zur Taxonomie-Verordnung wird jedoch nicht hergestellt. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben haben eine zentrale Bedeutung unklare Zusammenhänge und offene Fragestellungen zu beleuchten. Das betrifft Fragen der Endlagerung in besonderem Maße. Dieser letzte Teil des Lebenszyklus der Kernenergienutzung ist bislang nicht umfassend ausentwickelt, was sich alleine daran zeigt, dass sieben Jahrzehnte nach Beginn der Kernenergienutzung noch kein Endlager für hochradioaktive Abfälle weltweit in Betrieb ist. Im Gegensatz zu anderen Technologien dienen Forschung und Entwicklung hier auch nicht der Verbesserung bereits vorhandener Technologien, sondern der Entwicklung des letzten Abschnitts des Lebenszyklus einer Technologie. Das wird im JRC-Bericht nicht explizit dargestellt. Würde es dargestellt werden, müsste auch konstatiert werden, dass dieser Bestandteil des Lebenszyklus der Kernenergienutzung noch nicht abschließend bekannt und daher auch bislang nicht analysierbar oder evaluierbar ist. Aufgrund dessen ist hier eine DNSH-Analyse mit besonderen Herausforderungen verbunden (vgl. auch TEG 2020b, S. 210). Umso wichtiger wäre es hier, Forschung und Entwicklung in die Bewertung mit einzubeziehen. Forschung und Entwicklung stellen Maßnahmen dar, mit der mögliche erhebliche Beeinträchtigungen von Umweltzielen im Sinne der Taxonomie-Verordnung besser eingeschätzt und ggf. verhindert werden können. Denkbar wäre, technische Bewertungskriterien zu Anforderungen an Forschungsprogramme zur Beantwortung offener Fragen und zur Schließung von Unklarheiten zu entwickeln.

Die Ausführungen des JRC zum Thema Forschung und Entwicklung werden auch in Kapitel 5.5 dieser Fachstellungnahme kritisch gewürdigt.

2.2.4 Sicherung

Auch beim Thema Sicherung greift der Verweis auf die regulatorischen Anforderungen zu kurz. Der vorliegende Bericht des JRC beschränkt sich zum Thema Sicherung (Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter, kurz: SEWD) auf eine sehr stark verkürzte Darstellung, die sich überdies auf wenige Teilaspekte bezieht (z.B. JRC-Bericht, Teil A 3.3.5.1.5, S. 109).

Dies ist vor dem Hintergrund der Bedeutung dieses Themenfeldes für eine Gesamtdarstellung unzureichend. Denn das unbefugte und missbräuchliche Einwirken Dritter auf eine kerntechnische Anlage oder Einrichtung kann zu erheblichen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt und damit der Umweltziele führen.

Festzuhalten ist, dass die Abschätzung des Risikos von SEWD maßgeblich vom Willen Dritter und deren krimineller Energie abhängig ist. Dieses Willenselement führt dazu, dass die Bestimmung eines Risikos der Bevölkerung infolge von SEWD grundlegend anders als im Gebiet der Sicherheit ausgestaltet ist. Während im Bereich der Sicherheit den zu unterstellenden Störfallszenarien

technisch-wissenschaftliche Erkenntnisse zugrunde liegen, entzieht sich im Bereich der Sicherung die Ermittlung von Szenarien, die dem Schutz einer kerntechnischen Anlage oder Einrichtung gegen SEWD zugrunde gelegt sind, einer technisch-naturwissenschaftlichen Deduktion. Die Ermittlung von zu unterstellenden SEWD-Szenarien basiert vielmehr auf fachlichen Wertungen der zuständigen Behörden auf Basis objektiver Erkenntnisse. Die diesbezüglichen Betrachtungen werden in stetig zu aktualisierende Einschätzungen zur aktuellen Gefahrenlage übersetzt (BMU, 2012).

Gerade im Bereich der Zwischenlagerung bedeutet dies aufgrund der in diesem Fall notwendigen langjährigen Lagerung, dass nur in begrenztem Maßstab Aussagen über die zukünftige Wirksamkeit von Sicherungsmaßnahmen und damit zu einem Aspekt des Strahlenschutzes getroffen werden können. Zwar wird durch internationale Vereinbarungen und Anforderungen (CPPNM, IAEA Security Series) aktuell ein Rahmen definiert, jedoch ist davon auszugehen, dass nur bei einer kontinuierlichen sowie anlassbezogenen Überprüfung der Gefahrenlage und einer ggf. daraus resultierenden Anpassung/Optimierung von bestehenden Sicherungsmaßnahmen eine dauerhafte Sicherung garantiert werden kann. Mit absoluter Sicherheit kann auch hier der großflächige Austrag von radioaktiven Stoffen nicht ausgeschlossen werden, die mit den oben genannten weitreichenden Konsequenzen einhergehen würde.

Vor diesem Hintergrund erscheint eine verkürzte Betrachtung wie in dem angegebenen Kapitel des JRC-Berichts als nicht ausreichend, um die vielfältigen und komplexen Szenarien und die damit verbundenen Gefahren durch den Missbrauch radioaktiven Materials in Gänze zu würdigen.

2.2.5 Langfristiger Informations- und Wissenserhalt unter Berücksichtigung von Human Intrusion

Die Bedeutung von langfristigem Informations- und Wissenserhalt wird im JRC-Bericht nicht gewürdigt bzw. nicht erkannt. Wengleich Dokumentenerhalt („preservation of records“) als Zitat aus Artikel 17 der Joint Convention (IAEA, 1997) im JRC-Bericht (Teil B 1.2, S. 206) erwähnt ist, bleibt die Thematik im Übrigen weitgehend unberücksichtigt. Sie fehlt insbesondere in Zusammenhang mit den Grundprinzipien der geologischen Endlagerung - ein Zusammenhang, der von der ICRP (ICRP, 2013) und der OECD/NEA (OECD, 2014) hergestellt wird.

Eine Bewertungsrelevanz ergibt sich jedoch bei näherer Betrachtung. Generell können das zukünftige menschliche Verhalten und Handeln nicht vorhergesagt werden (NAS, 1995; Seitz et al., 2016). Aus diesem Grund ist ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen (Human Intrusion, kurz: HI) in ein Endlager bei Verlust der Kenntnis über den Endlagerstandort auch nicht ausgeschlossen (ICRP, 2013). Im Eintrittsfall des Ereignisses HI kann trotz der Umsetzung technischer Maßnahmen das Risiko der Strahlenexposition des Menschen und einer Kontamination der Umwelt nicht ausgeschlossen werden. Neben HI sind auch weitere, zukünftige menschliche Aktivitäten am Standort mit einzubeziehen. Solche Aktivitäten unterscheiden sich von HI dahingehend, dass kein direktes Eindringen damit verbunden ist, sondern eine mögliche indirekte Einflussnahme durch z. B. Veränderung der Grundwassersituation am Endlagerstandort. Im Rahmen des IAEA Vorhabens HIDRA sind eine Vielzahl von Maßnahmen aufgestellt und thematisiert worden (Seitz et al., 2016).

Daher sind Maßnahmen zum langfristigen Informations- und Wissenserhalt erforderlich. Sie helfen, über möglichst lange Zeiträume Strahlenexposition z.B. durch HI zu verhindern (vgl. ICRP, 2013, S. 6f.; OECD, 2014). Dementsprechend müssten solche Maßnahmen in die technischen Bewertungskriterien – die auch die Vermeidung und Minderung von Umweltauswirkungen sicherstellen sollen (vgl. JRC-

Bericht, Teil A 1.3.2.2, S. 22) – aufgenommen werden. Das ist unterblieben, obwohl das JRC erkannt hat, dass HI vorgebeugt werden muss (JRC-Bericht Teil B 5.1, S. 246, 5.2.1, dort letzter Absatz S. 250).

Selbst wenn man jedoch Maßnahmen zum langfristigen Informations- und Wissenserhalt in die TSC aufnimmt, bleibt ein gewisses, letztlich nur schwer reduzierbares Risiko, bestehen. Letztendlich können keine sicheren Prognosen getroffen werden, ob bei Wissensverlust über das Endlager die vorgesehenen Maßnahmen gegen HI bzw. Botschaften auch entsprechend bemerkt und verstanden werden. So werden etwa Archivierung und Installation von Markern international kontrovers diskutiert. Hierin wird durchaus auch die Gefahr gesehen, dass zukünftige Generationen davon eher angezogen und sich zum weiteren Vordringen ermutigt sehen (NEA, 1995; Seitz et al., 2016). Die verbleibenden Ungewissheiten werden im JRC-Bericht nicht berücksichtigt.

Darüber hinaus unterstreicht die OECD/NEA ein weiteres Ziel von langfristigem Informations- und Wissenserhalt – zukünftigen Generationen die Möglichkeit offen zu halten, informierte Entscheidungen zu treffen – und bezeichnet dies als Bestandteil eines verantwortlichen, ethisch richtigen und nachhaltigen Abfall-Managements (OECD, 2014). Auf das Thema wird in Kapitel 6.2 dieser Fachstellungnahme ausführlicher eingegangen.

2.3 Zur Methodik des JRC

Aufgefallen bei der Prüfung des JRC-Berichts ist ferner, dass die Vorgehensweise des JRC nicht durchweg stringent und nachvollziehbar, zudem in Teilen fachlich unausgewogen ist.

2.3.1 Vorgehensweise und Aufbau des JRC-Berichts

Die in Teil A 1.2, S. 17 und 1.3, S. 18 des JRC-Berichts beschriebene Vorgehensweise umfasst drei Schritte:

- 1) Bewertung des Beitrags zum Klimaschutz (vgl. JRC-Bericht, Teil A 3.2.1, S. 35ff und 3.2.2., S. 39ff)
- 2) Lifecycle Analysis und Ermittlung der Umweltauswirkungen der Kernenergienutzung (vgl. JRC-Bericht, Teil A 2, 3.2.3 bis 3.2.6, sowie, 3.3) verbunden mit einer Gesamtbewertung ob die Nachhaltigkeitsziele gefährdet werden (mit Fokus auf den Umweltzielen, vgl. JRC-Bericht, Teil A 4, S. 181ff und Teil B mit Annex 2, 5 und 6) und
- 3) Entwicklung von TSC, bei deren Erfüllung die Aktivität als nachhaltig gesehen wird (JRC-Bericht, Teil A 5, S. 190ff mit Annex 3 und 4).

Schritt 1 und 2 werden im JRC-Bericht detailliert beschrieben. Das JRC sieht Schritt 2 als Grundlage für die Bewertung der DNSH-Kriterien an. Es formuliert insoweit: „The criteria applied in the DNSH assessment must be based on an adequate and thorough analysis of the potential environmental impacts of the economic activity under investigation, in order to ensure that the conditions for its acceptance/rejection will be defined appropriately.“ (JRC-Bericht, Teil A 1.3.2.3, S. 22; vgl. auch Teil A 5.3, S. 192). Gemessen an diesem Anspruch fällt auf, dass etliche umweltrelevante Aspekte nicht betrachtet wurden (vgl. oben Kapitel 2.2). Auch die vom JRC betrachteten Aspekte halten nicht in vollem Umfang der Prüfung auf Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit stand (dazu Kapitel 3 bis 5).

Die in Schritt 3 entwickelten TSC verbleiben im Stadium des Entwurfs. Angeboten werden nur TSC für ausgewählte Phasen des Lebenszyklus (vgl. JRC-Bericht, Teil A 5.1, S. 190f). Die Methode wurde in Bezug auf die Endlagerung bewusst nicht zu Ende geführt. Die angebotenen TSC sind überdies zu

allgemein gehalten. Das JRC gibt keine Quellen für die TSC an und blendet Ungewissheiten hinsichtlich der Implementierung und Langzeitwirkungen aus (näher dazu in Kapitel 5.3 dieser Fachstellungnahme, dort Unterüberschrift „Technische Bewertungskriterien“). Damit erlaubt das Vorgehen des JRC keine ganzheitliche Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit der nuklearen Energieerzeugung. Soweit TSC entworfen werden, werden die für die tiefengeologische Endlagerung hochradioaktiver Abfälle entwickelten TSC als abdeckend für schwach- und mittelradioaktive Abfälle angesehen. Dabei werden schwachradioaktive Abfälle (im Sinne von very low level waste) und langlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle aber nicht betrachtet und die unterschiedlichen Anforderungen an oberflächennahe und geologische Endlager übergangen (näher dazu Kapitel 5.2 dieser Fachstellungnahme, dort Unterüberschrift „Technische Bewertungskriterien“).

Der Aufbau des JRC-Berichts ist so gestaltet, dass Teil B die Basis für die in Teil A 3.3.8 durchgeführten Auswertungen der Umweltauswirkungen von Zwischen- und Endlagerung liefern soll. Teil B steht jedoch weitgehend für sich und es werden nur wenige tatsächliche Bezüge von Teil A zu Teil B hergestellt. Es ist daher nicht klar, welche Aussagen in Teil A durch welches präsentierte Wissen in Teil B gestützt werden sollen.

Insbesondere fällt auf, dass ein Abschnitt mit Schlussfolgerungen fehlt, insbesondere hinsichtlich der Schlussfolgerungen des Teils B für Teil A des JRC-Berichts. Ein solcher Abschnitt sollte die herausgearbeiteten Hauptpunkte der Untersuchung enthalten, welche offenen Fragen/Themen bestehen und welche Empfehlungen rückblickend auf die identifizierten Hauptpunkte gegeben werden können. Das JRC sollte in diesem Abschnitt auch kritisch bewerten, ob der Bericht den Auftrag („terms of reference“) erfüllt hat bzw. ob der Auftrag erfüllbar war. Folglich erscheint die Untersuchung nicht abgeschlossen.

Die „Key Findings“ der „Executive Summary“ beziehen sich nur punktuell auf die Analysen und Bewertungen in Teil A und die Wissensbasis in Teil B. Sie können so nicht zurückverfolgt werden und erscheinen als eine Sammlung von isolierten Feststellungen, für die nur unzureichende Verknüpfungen zum Bericht geliefert werden.

2.3.2 Ausgewogenheit der Darstellung, Daten- und Quellenauswahl

Die in dem Bericht zusammengetragenen Aspekte sind in der präsentierten Form nur eingeschränkt als adäquate Grundlage für Entscheidungen zur Taxonomie geeignet. Faktisch sind sie in großen Teilen nachvollziehbar, jedoch bevorzugt die Auswahl der einzelnen Fakten eine positive Sichtweise der Nachhaltigkeit der Kernenergienutzung und der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Der Auswahl fehlt fast vollständig eine ausgewogene Gegenüberstellung von kritischen Argumenten und einer Auseinandersetzung mit diesen. Diese Unvollständigkeit und Einseitigkeit zieht sich durch den gesamten Bericht und ist nicht nur in einigen Details zu beobachten. Zum Beispiel findet der JRC-Bericht „Musterbeispiele“ für die Bewältigung problematischer Folgen von Wirtschaftstätigkeiten des Kernenergie-Lebenszyklus, unterschlägt aber, dass diese Folgen nicht umfassend oder nur verzögert bewältigt wurden (zum Uranabbau Kapitel 4.1, zur Asse Kapitel 5.2 dieser Fachstellungnahme).

Darüber hinaus enthält der Bericht an vielen Stellen unbegründete Verallgemeinerungen. So werden Zitate bzw. Quellen oftmals nur summarisch für längere Absätze oder ganze Seiten genannt (vgl. JRC-Bericht, Teil B 6.2, S. 277ff). Hier entsteht der Eindruck, dass für die getätigten Aussagen nicht die Originalquellen zu Rate gezogen wurden. Das widerspricht gängigen Standards guter wissenschaftlicher Praxis (DFG, 2019). Aus einzelnen, ausgewählten Beispielen werden Schlussfolgerungen gezogen und eine globale Gültigkeit unterstellt. Dies wird stillschweigend getan

und ist somit für den Leser schwer erkennbar. Beispielsweise werden im Executive Summary des JRC-Berichts (JRC-Bericht, Executive Summary, S. 8, dritter Anstrich) Parallelen zwischen der Realisierbarkeit der Entsorgung anderer „Abfälle“ (CO₂) in tiefen geologischen Formationen und der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen (HAW) gezogen. Es fehlt aber eine entsprechende fachliche Analyse im Bericht, die Übertragbarkeit wird somit entgegen dem in der Zusammenfassung erweckten Eindruck nicht geprüft. In Annex 1 werden lediglich die rechtlichen Anforderungen an die Entsorgung von CO₂ bzw. radioaktiven Abfällen verglichen. Auf das völlig unterschiedliche Gefährdungspotenzial insbesondere über sehr lange Zeiträume wird nicht eingegangen. Ein weiteres Beispiel ist die Betrachtung von Kraftwerken der neuen Generation. Das sieht darüber hinweg, dass in Europa fast ausschließlich ältere Reaktoren in Betrieb sind und für mindestens die nächsten Jahrzehnte die stromerzeugenden Reaktorflotten weiterhin dominieren werden.

Auch bei der Auswahl der Quellen fällt auf, dass diese nicht immer ausgewogen ist. Der Bericht nutzt eine breite Wissensbasis wie sie in den IAEA und OECD-NEA Dokumenten dargestellt wird. Gesetze, Richtlinien, aber auch Forschungsstrategien (EURAD) werden angeführt. Eine große Anzahl von Berichten von Betreibern oder Vorhabenträgern wird zur Untermauerung und Illustration des Stands von Wissenschaft und Technik genutzt und um Stellungnahmen der Regulatoren und Regierungen ergänzt. Es werden allerdings nur sehr wenige publizierte Beurteilungen aus Fachzeitschriften (peer-reviewed journals) herangezogen. Argumente aus eher kritischen wissenschaftlichen Ausarbeitungen bzw. NGOs werden nicht erwähnt bzw. diskutiert.

Insgesamt erscheint auch die im JRC-Bericht herangezogene Daten- bzw. Bezugsgrundlage als unausgewogen. So wird beispielsweise der Anteil der Kernenergie zur Elektrizitätserzeugung in der EU, der als Ausgangspunkt der Analyse des JRC sowohl zum Taxonomie-Kriterium des Beitrags zum Klimaschutz als auch der DNSH-Kriterien herangezogen wird, zu übermäßig angesetzt (vgl. hierzu Kapitel 3.1.2 dieser Fachstellungnahme). Weiterhin wird als Grundlage für die Bewertung der DNSH-Kriterien im Wesentlichen der Normalbetrieb bei Anlagen und Tätigkeiten im nuklearen Entsorgungsbereich betrachtet. Eine Einbeziehung der Umweltfolgen von auslegungsüberschreitenden Ereignissen in die Analyse erfolgt nicht (vgl. hierzu Kapitel 2.1, 2.2.1, 4.4, 5.3). Außerdem wird bezüglich schwach radioaktiver Abfälle (low level waste, kurz: LLW) die oberflächennahe Endlagerung als üblicher Entsorgungsweg betrachtet. Das eine Reihe von Ländern, für LLW oder auch aller Arten radioaktiver Abfälle, ausschließlich eine geologische Endlagerung vorsehen bleibt unberücksichtigt (vgl. hierzu Kapitel 5.2). Darüber hinaus liegt der Fokus ausschließlich auf Ländern mit groß angelegten Kernenergieprogrammen. Eine Berücksichtigung von wirtschaftlich weniger weit entwickelten Ländern erfolgte nicht (vgl. hierzu Kapitel 5.3).

Die genannten und weitere Beispiele für die hier formulierte Kritik werden im Folgenden aufgegriffen und weiter ausgeführt.

3 Kriterium 1 der Taxonomie-Verordnung – Beitrag zum Klimaschutz

In diesem Kapitel wird der Beitrag der Kernenergienutzung zum Klimaschutz (Ziele 1 und 2 der Taxonomie-Verordnung) betrachtet. Die fachlichen Aussagen des JRC-Berichtes werden hierzu hinsichtlich der Elektrizitätserzeugung in Kernkraftwerken (dazu Kapitel 3.1) und mittels in der Entwicklung sich befindender Technologien wie Small Modular Reactors (dazu Kapitel 3.2) kritisch gewürdigt.

Festzustellen ist u. a., dass der Beitrag der Kernkraftwerke zu Treibhausgasemissionen im JRC-Bericht sehr positiv dargestellt wird. Bezogen auf die im JRC-Bericht dargestellte Prognose der Weiterentwicklung der Kernenergienutzung an der Stromerzeugung in der EU kann festgestellt werden, dass diese ebenfalls deutlich zu optimistisch dargestellt ist.

Bezogen auf den Beitrag sog. Small Modular Reactors (SMR) zum Klimaschutz werden die bislang nicht vorhandene Marktreife und die bislang noch offenen Fragen zu Sicherheit, Transport, Rückbau und Entsorgung in Zusammenhang mit diesem Reaktortyp im JRC-Bericht nicht diskutiert.

3.1 Kernkraftwerke

In Teil A 3.2.1, S. 35ff und 3.2.2, S. 39ff des JRC-Berichts erfolgt eine Bewertung der Kernenergienutzung im Hinblick auf ihren Beitrag zum Klimaschutz gem. Art. 10 Abs. 1 Taxonomie-Verordnung. Diese Bewertung stützt sich auf eine vergleichende Betrachtung des Beitrags zum Klimaschutz der Kernenergieerzeugung im Verhältnis zu anderen Energieerzeugungsoptionen im JRC-Bericht, Teil A 3.2.2, S. 39ff (dazu nachfolgend Kapitel 3.1.1 dieser Fachstellungnahme). Ihr zugrunde liegt eine sehr optimistische Prognose der Kernenergienutzung in der EU in Teil A 3.2.1, S. 35ff des JRC-Berichts (dazu Kapitel 3.1.2).

3.1.1 Beitrag der Kernkraftwerke zum Klimaschutz im JRC-Bericht

In Teil A 3.2.2 des JRC-Berichts erfolgt eine Auswertung der Kernenergienutzung bezüglich ihres Beitrags zum Klimaschutz. Für die angeführten Aussagen zu niedrigen Treibhausgasemissionen durch die Stromerzeugung mittels Kernenergie werden viele spezielle Fälle oder Sonderfälle dargestellt und ein verzerrender Eindruck vermittelt. An zahlreichen Stellen ist der JRC-Bericht ungenau und verkürzt oder unterschlägt Aussagen, die in verwendeten Quellen getroffen werden. Dadurch wird der Beitrag der Kernenergienutzung an den Treibhausgasemissionen sehr positiv dargestellt, insbesondere auch in Relation zum Grenzwert, der von der Technical Expert Group (TEG) im Taxonomy Report Technical Annex aktuell auf 100 g CO₂e / kWh gesetzt wird (TEG, 2020b). Allerdings weist die TEG im Gegensatz zum JRC-Bericht deutlich darauf hin, dass dieser Grenzwert alle fünf Jahre gesenkt werden wird um – im Einklang mit den politischen Zielen – bis 2050 Netto-Null-Emissionen zu erreichen (TEG, 2020b). Der JRC-Bericht vermittelt so den Eindruck, dass der Grenzwert von 100 g CO₂e/kWh die nächsten 50 Jahre bestehen bleibt (JRC-Bericht, Teil A 3.2.2, S. 40).

Ein weiteres Beispiel für verkürzte Aussagen im JRC-Bericht und daraus resultierender optimistischer Darstellung der Lebenszyklus-basierten Treibhausgasemissionen bei Nutzung der Kernenergie ist Abbildung 3.2-6 (JRC-Bericht, Teil A 3.2.2, S. 40). Der JRC-Bericht erwähnt nicht, dass die für die Abbildung herangezogene Literatur (WNA, 2011) viele Faktoren nennt, die zu den beobachteten Abweichungen bei den dargestellten Treibhausgasemissionen beitragen. Ein wichtiger Faktor laut WNA (WNA, 2011) ist u.a. die unterschiedliche Definition für „Lebenszyklus“ in den herangezogenen Publikationen. Einige der Publikationen berücksichtigten beim Lebenszyklus das Abfallmanagement und die Abfallbehandlung, andere nicht (WNA, 2011). Außerdem stammt die zitierte Veröffentlichung der WNA aus dem Jahr 2011 und ist damit schon verhältnismäßig alt. Sie weist z. B. darauf hin, dass die großen Abweichungen bei den Treibhausgasemissionen bei Solarenergie auf den bereits stattgefundenen, schnellen Weiterentwicklungen der Photovoltaikanlagen beruhen und dass mit weiterer Effizienzsteigerung zu rechnen ist.

3.1.2 Prognose der Kernenergienutzung im JRC-Bericht

Teil A 3.2.1, S. 35ff des JRC-Berichtes gibt eine Abschätzung des Anteils der Kernenergienutzung an der globalen und der EU-Stromerzeugung, um mit dieser Abschätzung die auch zukünftig erwartete wesentliche Bedeutung der Kernenergienutzung in Europa zu unterstreichen.

Es ist festzuhalten, dass während bei anderen Themenbereichen (siehe Kapitel 2.1 und 2.2) der Eindruck entsteht, dass das JRC seinen Beobachtungsrahmen unnötig eng gewählt hat, das JRC hier über die für die Bewertung der Taxonomie-Kriterien notwendigen Aspekte deutlich hinaus geht. Eine Prognose zum Nutzungsanteil der Kernenergie in Europa ist zur Bewertung hinsichtlich der Taxonomie-Kriterien nicht erforderlich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Aussagen in Teil A 3.2.1 des JRC-Berichts hinsichtlich der Weiterentwicklung der Kernenergieerzeugung an der Stromerzeugung in der EU deutlich zu optimistisch dargestellt sind. Die Prognose beruft sich im Wesentlichen auf den Artikel von Capros et al. (2018) (Capros et al. 2018), welcher auf einer Modellrechnung basiert. Diese Modellrechnung wird ohne Einordnung und ohne die Angabe von Ungewissheiten übernommen. Die Prognose eines gleichbleibenden Anteils der Kernenergienutzung von 22 % bis zum Jahr 2050 bei gleichzeitig steigender Gesamtstromproduktion setzt einen massiven Ausbau der Kernkraftwerke in Europa voraus. Bei aktuell nur vier in der EU in Bau befindlichen Kernkraftwerken und üblichen Bauzeiten für neue Kernkraftwerke von über 10 Jahren ist dieser erwartete massive Ausbau nicht ableitbar (IAEA, 2020, S. 13).

Des Weiteren betrachtet der Bericht als Datengrundlage noch die EU28, somit inklusive Großbritannien. Großbritannien ist am 31. Januar 2020 aus der Europäischen Union ausgetreten und hatte mit seinen zurzeit 15 in Betrieb befindlichen Reaktoren (8,9 GWe installierte Leistung) wesentlich zur installierten Kapazität in der EU beigetragen.

Die im JRC-Bericht dargestellte Prognose würde neben Neubauten auch umfangreiche Nachrüstmaßnahmen an den alternden Kernkraftwerken in der EU voraussetzen: Die ersten Außerbetriebnahmen von Kernkraftwerken sind in der Abbildung 3.2-4 des JRC-Berichtes erst ab dem Jahr 2040 verzeichnet. Dies würde eine Laufzeit aller in der EU in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke von ca. 60 Jahren voraussetzen, womit aufgrund aktuell bekannter Abschaltungen unter anderem in Deutschland nicht zu rechnen ist. Abbildung 3.2-4, S. 38 des JRC-Berichtes, die die Weiterentwicklung der Kernenergienutzung in der EU basierend auf Neubauten und Laufzeitverlängerungen darstellt, ist in der angegebenen Quelle (Capros, 2018) nicht zu finden.

Die meisten der momentan in der EU betriebenen Kernkraftwerke sind über 30 Jahre alt, 66 der aktuell 106 in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke in der EU sind zwischen 30 und 40 Jahre alt, 26 Anlagen sogar über 40 Jahre. In den letzten 20 Jahren sind nur zwei neue Kernkraftwerke ans Netz gegangen (IAEA, 2021).

Ursprünglich waren die Kernkraftwerke für eine Betriebsdauer von 30 bis 40 Jahren konzipiert. Inwieweit tatsächlich – wie für die Prognose im JRC-Bericht benötigt – eine Laufzeitverlängerung von Altanlagen von nationalen Behörden entsprechend der aktuellen Sicherheitsanforderungen genehmigt werden kann, ist ungewiss und hängt vom jeweiligen Anlagenzustand und dem jeweiligen nationalen Regelwerk ab. Nachrüstungen von zusätzlichen Sicherheitssystemen sind unter anderem aufgrund der baulichen Gegebenheiten nur bis zu einem begrenzten Umfang möglich (INRAG, 2021, S. 181). Zudem stellen sich Fragen der Alterung und Versprödung von Materialien und damit ihres langfristigen Verhaltens über den ursprünglichen Auslegungszeitraum hinaus.

Diese im JRC-Bericht gewählte sehr positive Darstellung der Zukunftsaussichten der Kernenergie ist kritisch zu betrachten. Auch wenn diese Prognosen im engen Sinne keine Rolle für die Bewertung der Kernenergie nach den konkreten Umweltzielen der Taxonomie spielen können, so ist diese Darstellung des JRC aus fachlicher Sicht fragwürdig und deutet ggf. auf eine nicht ausreichende Unabhängigkeit hin. Zudem findet die Kernenergie in weiteren Teilen der Gesellschaft nur schwer Akzeptanz und wird begleitet von langen Entwicklungszeiten (in demokratischen Gesellschaften 10-19 Jahre je Kraftwerk) (BMK, 2020, S. 4). Ein starker Ausbau der Kernenergie würde die Stilllegung von fossil befeuerten Kraftwerken verzögern, da letztere für diese Zeit noch in Betrieb bleiben und damit die Erreichung des Klimaziels erschweren. Man kann sogar argumentieren, dass Kernenergie aufgrund ihrer hohen Kapitalintensität den Einsatz anderer CO₂-emissionsarmer Alternativen insofern behindert, als dieses Kapital für den Ausbau alternativer Energiequellen wie Sonne, Wind und Wasser eingesetzt werden könnte (BMK, 2020, S. 4-5). Während die nukleare Stromerzeugung in der Stromerzeugungsphase historisch gesehen mit relativ geringen Treibhausgasemissionen verbunden war, wird der Großteil der Treibhausgasemissionen im nuklearen Brennstoffkreislauf in den der Anlage vor- und nachgelagerten Verarbeitungsstufen verursacht. Schätzungen zufolge verteilen sich die CO₂-Emissionen auf den Bau von Kernkraftwerken (12%), den Uranabbau und die Urananreicherung (38%), den Betrieb (17%), die Verarbeitung und Lagerung von Kernbrennstoff (15%) und den Stilllegungsaktivitäten des Kraftwerks (18%) (BMK, 2020, S. 6).

3.2 Analyse des Beitrags von Small Modular Reactors zum Klimaschutz im JRC-Bericht

Die Aussage, dass viele Länder wachsendes Interesse an SMRs zeigen, wird im JRC-Bericht (Teil A 3.2.1, S. 38) ohne weitere Einordnung getroffen. Es fehlt insbesondere der Hinweis auf den aktuellen Entwicklungsstand und die nicht vorhandene Marktreife von SMRs.

Meist werden Reaktoren mit einer Leistung von bis zu 300 MWe unter dem Begriff SMR eingeordnet. Größtenteils befinden sich die weltweit unterschiedlichsten SMR-Konzepte auf der Ebene von Konzeptstudien. Bevor SMRs in einem Land der EU überhaupt technisch gebaut und in Betrieb genommen werden können, werden noch viele offene Fragen zu klären sein. Dies reicht von Fragen zu Sicherheit, Transport, Rückbau über Fragen zu Zwischen- und Endlagerung bis hin zu neuen Fragestellungen für die zuständigen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden. Die vielfach und häufig für SMRs postulierten Thesen hinsichtlich des Beitrags zur Bekämpfung der Gefahren des Klimawandels sowie hinsichtlich der niedrigeren Kosten und kürzeren Bauzeiten sind bestimmten wirtschaftlichen Interessenslagen, insbesondere von Herstellern, zuzuordnen und daher durchaus kritisch zu betrachten. Heutige neue Kernkraftwerke weisen elektrische Leistungen im Bereich von 1.000-1.600 MWe auf. SMR-Konzepte sehen dagegen geplante elektrische Leistungen von 1,5-300 MWe vor. Entsprechend wäre zur Bereitstellung derselben elektrischen Leistung eine um den Faktor 3-1000 größere Anzahl an Anlagen erforderlich. Anstelle von heute ca. 400 Reaktoren mit großer Leistung würde dies also den Bau von vielen tausend bis zehntausend SMR-Anlagen bedeuten (BASE, 2021; BMK, 2020). Eine aktuelle Produktionskostenrechnung unter Berücksichtigung von Skalen-, Massen- und Lerneffekten aus der Nuklearindustrie kommt weiterhin zu dem Ergebnis, dass eine vierstellige Zahl an SMR produziert werden müsste bevor sich der Einstieg in die SMR-Produktion wirtschaftlich lohnen würde. Es ist somit nicht zu erwarten, dass auf absehbare Zeit der strukturelle Kostennachteil von Reaktoren mit kleiner Leistung durch Lern- bzw. Masseneffekte kompensiert werden kann (BASE, 2021).

Im JRC-Bericht (Teil A 3.2.1, S. 38) fehlt auch eine Einordnung der vielfach erhobenen Behauptung, dass SMRs sicherer seien als herkömmliche Kernkraftwerke mit großer Leistung, da sie ein geringeres

radioaktives Inventar aufweisen und verstärkt passive Sicherheitssysteme einsetzen. Verschiedene SMR-Konzepte postulieren vor diesem Hintergrund reduzierte Sicherheitsanforderungen, z.B. bezüglich des Redundanzgrads oder der Diversität. Bei einigen SMR-Konzepten wird gar ein Verzicht auf übliche Vorgaben zum anlageninternen und -externen Notfallschutz in Betracht gezogen, wie beispielsweise kleinere Planungsgebiete für den Notfallschutz bis hin zum Wegfall einer anlagenexternen Notfallschutzplanung. Die These des grundsätzlich erhöhten Sicherheitsniveaus eines SMRs ist nicht von vornherein nachgewiesen. Die Sicherheit einer konkreten Reaktoranlage ist von den sicherheitstechnischen Eigenschaften des individuellen Reaktors und deren funktioneller Wirksamkeit abhängig und muss – auch unter Einbeziehung des möglichen Ereignis- bzw. Störfallspektrums – sorgfältig analysiert werden. Im Rahmen einer solchen Analyse werden insbesondere Einwirkungen von außen bei SMRs in abgelegenen Regionen, bei SMRs zur Versorgung von Industrieanlagen oder bei seebasierten SMRs weitergehende Fragen aufwerfen (BASE, 2021). Hinsichtlich der anlagenexternen Notfallschutzplanung hat die Arbeitsgruppe zu den Planungsgebieten des SMR Regulators` Forum u.a. gefordert, dass gegebenenfalls auch für Anlagen zur Handhabung und Lagerung von Brennstoff außerhalb eines SMR-Geländes Planungsgebiete festgelegt werden müssten. Zudem sind besondere Betrachtungen erforderlich, wenn Planungsgebiete von SMRs nahe an dicht besiedelte Zentren heranreichen (SMR Regulators' Forum, 2018). Die Arbeitsgruppe wies auch darauf hin, dass mögliche Quellterme gerade bei neuen technischen Designs schwer prognostizierbar sind und hierfür noch Methoden entwickelt werden müssten. Die Arbeitsgruppe Konstruktions- und Sicherheitsanalyse des SMR Regulators` Forum weist zudem darauf hin, dass Herausforderungen bei einem Unfall in einem SMR an einem Standort mit mehreren Modulen/Einheiten identifiziert und angemessene verfügbare Ressourcen (Personal und Ausrüstung) sowie Notfallstrategien nachgewiesen werden müssen (SMR Regulators` Forum, 2019). Es ist daher davon auszugehen, dass – anders als zum Teil von SMR-Entwicklern angegeben – für den anlagenexternen Notfallschutz bei SMRs Planungsgebiete nötig sind, die über das Anlagengelände hinausreichen. Letztendlich müssen die atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden entscheiden, wie die von SMR-Entwicklern propagierten Notfallschutzmaßnahmen tatsächlich auszugestalten sind (BASE, 2021).

Zuständige Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden, aber auch potentielle SMR-Produzenten und SMR-Betreiber stehen vor neuen Herausforderungen im Falle einer weltweiten Verbreitung von SMRs. Bislang liegen keine SMR-spezifischen nationalen oder internationalen Sicherheitsstandards vor. Internationale Sicherheitsstandards wären insbesondere dann eine Voraussetzung, wenn ein SMR von einem Staat, in dem der SMR hergestellt wird, in einen anderen Staat zur Nutzung geliefert wird. Dies wird besonders wichtig sein, wenn es sich bei dem „Nutzerstaat“ um einen Neueinsteiger handelt. Bei der Erstellung oder Anpassung der Regelwerke ist neben den zentralen Fragen der Auslegung und des sicheren Betriebs eines SMRs auch die regulatorische Herangehensweise zu Herstellung und Transport von SMRs, Zusammenbau von modularen Systemen, Handhabung und Transport von Brennstoffen und anderer Materialien sowie von abgebranntem Brennstoff und nuklearen Abfällen zu beachten. Auch Fragen der Sicherung und Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) müssen geklärt werden. Dies wird vor allem bei transportablen Kernkraftwerken besonders zu beachten sein (BASE, 2021).

Zusätzlich zur Klärung der regulatorischen Fragestellungen ist vor einem weltweiten Einsatz von SMRs auch die Haftung von Betreibern oder Herstellern im Falle von Unfällen zu betrachten. Bei der IAEA beschäftigt sich mit dieser Thematik die International Expert Group on Nuclear Liability – INLEX und gab bereits Stellungnahmen zum Spezialfall eines schwimmenden Kernkraftwerks ab (IAEA,

2020c). International werden Haftungsfragen im Falle von SMRs jedoch weiterhin diskutiert (BASE, 2021).

Nicht zuletzt stellen sich beim Einsatz der SMRs auch Fragen hinsichtlich der Proliferation, d.h. der möglichen Weiterverbreitung von Kernwaffen, sowie der notwendigen nuklearen Technologien oder spaltbaren Materialien für ihre Produktion. Um die Weiterverbreitung von Kernwaffen zu beenden, die Abrüstung voranzutreiben und für mehr globale Sicherheit zu sorgen, verpflichten sich Mitgliedsstaaten des Atomwaffensperrvertrags (Vertrag über die Nichtverbreitung von Atomwaffen) spezielle Überwachungsmaßnahmen (Safeguards der IAEA) zu akzeptieren. Im Hinblick auf die bereits erwähnte theoretisch höhere Anzahl an SMRs an verschiedenen, teilweise sehr abgelegenen Standorten sowie die Verwendung von Brennstoffen mit höherer Anreicherung erhöhen sich auch die Risiken der Proliferation. Gleichzeitig steigt der Aufwand für die Überwachungsmaßnahmen, wenn eine große Anzahl von SMRs, spezielle Designs und regelmäßige Transporte von ganzen Kraftwerken oder austauschbaren Reaktorkernen überprüft werden müssen. Viele der Standardmethoden zur Spaltmaterialüberwachung passen nicht direkt auf die Besonderheiten von SMR-Konzepten (BASE 2021).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass hinsichtlich eines großflächigen Einsatzes von SMRs – der für einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz erforderlich wäre – noch viele Fragen offen sind, die im JRC-Bericht nicht angesprochen werden. Bei diesen Fragen handelt es sich nicht nur um ungeklärte technische Fragestellungen, sondern vor allen Dingen um Fragen der Sicherheit, der Proliferation und der Haftung, die internationale Abstimmung und Regelungen erfordern.

4 Kriterium 2 der Taxonomie-Verordnung - DNSH-Kriterien: Vom Uranabbau bis zum Kraftwerksbetrieb und -rückbau

In diesem Kapitel werden die Produktionsschritte vom Abbau von Uran bis zur Stilllegung und dem Rückbau von Kernkraftwerken betrachtet. Die fachlich-wissenschaftlichen Aussagen des JRC werden im Hinblick auf Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit geprüft. Zur Binnengliederung der jeweiligen Unterkapitel wurden Zwischenüberschriften eingefügt. Unterstrichene Überschriften im Normaldruck gliedern den Text jeweils nach Unterthemen.

Herausgearbeitet werden insbesondere die mit dem Uranabbau verbundenen Probleme für Mensch und Umwelt (dazu nachfolgend Kapitel 4.1 dieser Fachstellungnahme). Darüber hinaus werden die Aussagen des JRC-Berichts zur Urananreicherung, zur Brennelementherstellung und zur Wiederaufbereitung einer kritischen Würdigung unterzogen (dazu Kapitel 4.3). Der JRC-Bericht fokussiert sich auf den Regelbetrieb der Kernkraftwerke und nimmt hier Bezug insbesondere auf neue Kraftwerksgenerationen (dazu Kapitel 4.4). Dabei wird ausgeblendet, dass in Europa nahezu ausschließlich Reaktoren am Netz sind, die das Alter von 30 Jahren bereits überschritten haben und deren Sicherheitseinrichtungen damit nicht denen von Reaktoren der 3. Generation entsprechen. Die Stilllegung und der Rückbau von Kernkraftwerken werden im JRC-Bericht dagegen zu oberflächlich behandelt (dazu Kapitel 4.5).

4.1 Uranabbau und -verarbeitung

Maßnahmen zur Minderung von Umweltfolgen

Der JRC-Bericht ist im Bezug auf die Umweltfolgen der Urangewinnung in sich widersprüchlich: Zwar werden die Umweltrisiken des Uranbergbaus benannt (insbesondere JRC-Bericht, Teil A 3.3.1.2, S. 67ff); aber schließlich wird konstatiert, dass diese mit geeigneten Maßnahmen eingedämmt werden können (insbesondere JRC-Bericht, Teil A 3.3.1.5, S. 77ff). Geeignete Maßnahmen werden allerdings weder in diesem Zusammenhang, noch im Zusammenhang mit der Bewertung der DNSH-Kriterien (JRC-Bericht, Teil A 4.2, S. 182ff) oder der Entwicklung von TSC (JRC-Bericht, Teil A 5.5, S. 195f mit Annex 4.2) in der notwendigen Tiefe diskutiert, noch wird deutlich gemacht, wie sie umgesetzt werden sollen. Es wird ebenfalls nicht aufgezeigt, wie die staatlichen Institutionen und regulierenden Behörden Einfluss auf die Uranbergbauindustrie nehmen könnten, besagte (und nicht näher definierte) geeignete Maßnahmen zur Erreichung der Umweltziele der EU-Taxonomie einzuhalten. Hier spielt eine wichtige Rolle, dass die meisten Uranminen außerhalb der EU liegen - nur noch in der rumänischen Crucea-Mine wird auf EU-Territorium Uranerz abgebaut.

Kohle- und Uranbergbau im Vergleich

Der JRC-Bericht vergleicht den Uranbergbau mit dem Kohlebergbau und kommt zu dem Schluss, dass Uranbergbau deutlich effektiver und „umweltfreundlicher“ sei als Kohlebergbau (JRC-Bericht, Teil A 3.3.1.1, S. 64ff). Während ca. 50.000 t weltweite Jahresproduktion von Uranerz zum Betrieb aller KKW weltweit ausreicht, verbrauche ein einziges 1 GW-Kohlekraftwerk 9.000 t Kohle pro Tag. Dieses Argument ist jedoch sachlich nicht zu Ende gedacht: Ebenso wie die Kohleförderung kann auch der Uranabbau als nicht nachhaltig bezeichnet werden – unabhängig von den jeweiligen Fördermengen. Der JRC-Bericht vermischt hier unzulässig die Vergleichsebenen: Beim Kohlebergbau handelt es sich um den Abbau von Kohlenwasserstoffen, beim Uranbergbau um den Abbau eines Erzes. Die Abbau- und Aufbereitungstechniken für beide Bodenschätze unterscheiden sich stark. Vor allem erzeugt Uranbergbau radioaktiven Abraum und erfordert ein deutlich teureres Abraum-Management als Kohlebergbau – gleich, ob man den Abbau von Steinkohle oder Braunkohle zum Vergleich heranzieht. In der Vergangenheit wurde der Umgang mit Bergbauhinterlassenschaften der Allgemeinheit überlassen. Ein Beispiel hierfür sind die Altstandorte in den thüringischen Uranbergbaugebieten. Darüber hinaus sind die hoffigsten Uranlagerstätten mittlerweile ausgebeutet und das Auffahren neuer Bergwerke wird teurer, da das geförderte Erz immer weniger spaltfähiges Material enthält (vgl. Uranatlas, 2019; OECD/NEA, 2020).

In situ Leaching

Bei den Gewinnungsmethoden von Uran fokussiert sich der JRC-Bericht auf das In situ Leaching (ISL; z.B. JRC-Bericht, Teil A 3.3.1.1, S. 65-66). Hierbei handelt es sich um eine Bergbautechnik, die weniger oberflächliche Umweltschäden hervorruft als der konventionelle Bergbau und die daher scheinbar umweltverträglicher ist. Der Bericht bleibt in Bezug auf ISL allerdings sehr oberflächlich. Die Umweltrisiken, insbesondere die Grundwasserkontamination, werden zwar benannt, aber nicht im Detail und anhand von Fallbeispielen beschrieben. Dies müsste aber der Fall sein, wenn man dem Umweltziel „nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen“ gem. Art. 9 Buchst. c Taxonomie-Verordnung tatsächlich gerecht werden wollte. Negative Fälle mit ernststen Umweltschäden, wie Königstein (Sachsen), Stráz pod Ralskem (Tschechien; Andel & Pribán, 1996) oder Devladovo (Ukraine; Molchanov et al., 1995) werden gar nicht erwähnt.

Dambruch von Church Rock

Ein weiteres Beispiel für die unpräzise und uneindeutige Behandlung von Umweltrisiken setzt sich bei der Beschreibung des Dammbbruchs von Church Rock fort (JRC-Bericht, Teil A 3.3.1.2.2, S. 70, Zeile 1 ff). Hier wird – das einzige Mal im gesamten JRC-Bericht – eine Bergbau-Havarie benannt und auch kurz quantitativ beschrieben. Bei Church Rock, einem Ort in New Mexico, USA (auf dem Land der Navajo Nation) brach am 16. Juli 1979 der Damm eines Bergschlammebeckens (SRIC, 2007). Bei dieser Tailingbecken-Havarie wurden mehr als 1.000 t radioaktiven Bergschlammes und ca. 360.000 m³ radioaktiv kontaminierten Wassers in den Puerco River gespült. Es handelt sich beim Church Rock-Desaster bis heute um den Nuklearunfall in den USA mit den größten radioaktiven Freisetzungen. Das umliegende Land und seine Bewohner leiden bis heute unter den Folgen der Havarie (Knutson, 2021). Die bis heute wirkenden Folgen der Havarie und des intensiven Uranbergbaus rund um Church Rock, nämlich gravierende Umwelt- und Gesundheitsschäden, werden im Report of the Church Rock Uranium Monitoring Project 2003-2007, herausgegeben vom Southwest Research and Information Center (SRIC), beschrieben. Im JRC-Bericht hingegen werden die langfristigen, negativen Konsequenzen des Church Rock Desasters nicht benannt.

Sanierung von Uranbergbaustandorten – Beispiel Wismut

Der JRC-Bericht beschreibt, wie aufgegebenen Uranbergbaustandorte saniert wurden, Abraum- und Aufbereitungshalden abgetragen und Tagebaurestlöcher verfüllt wurden. Als Musterbeispiel wird die Sanierung der Standorte der SDAG Wismut in Sachsen und Thüringen nach dem Ende der DDR 1990 genannt (JRC-Bericht, Teil A 3.3.1.2.1, S. 67, Zeile 7 ff). Die Geschichte der Wismut-Rekultivierung und -Sanierung gestaltet sich allerdings komplizierter. Die Wismut GmbH (als Rechtsnachfolgerin der SDAG Wismut) war nach der Wiedervereinigung verpflichtet, die Bergbauflächen zu sanieren, die sich am 30.05.1990 im Besitz der SDAG Wismut befanden. Altstandorte in Thüringen waren daher bis 2019 zum großen Teil nicht saniert (Uranatlas, 2019). Die Verwahrungsbauwerke von sanierten Gebieten und ihr radioaktiver Inhalt erfordern noch für viele Jahre eine stetige Überwachung. Fließ- und Grundwässer in Ostthüringen sind Kontaminationsgefahren ausgesetzt. Der JRC-Bericht scheint zu suggerieren, dass auch massive Altlasten wie diese, welche jahrzehntelange Sanierungsmaßnahmen nach sich ziehen, nicht dazu führen, dass Umweltziele nicht eingehalten werden.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich zur Beschreibung und Bewertung des Uranbergbaus und der Uranaufbereitung im JRC-Bericht konstatieren: Der Bericht benennt zwar die Risiken, die mit dem Uranbergbau und der Uranaufbereitung verbunden sind, beschreibt aber nur in ungenügender Weise die riskante Realität der Gewinnung von Uranerz und seiner Aufbereitung.

4.2 Umwandlung in Uranhexafluorid

Front-End, Brennelemente-Herstellung

Im Kontext der Herstellung von Brennelementen und der Aufbereitung von Natururan wird stets auf Kontaminationen mit kurzlebigen Radionukliden verwiesen (JRC-Bericht, Teil A 3.3.2.2.2, S. 85f und 3.3.5, S. 105ff). Auf die Bedeutung der in der Uran-Actinium- bzw. Uran-Radium-Zerfallsreihe gebildeten Radionuklide mit langen Halbwertszeiten (Pa-231: Halbwertszeit ~ 32.000 a; Th-230: Halbwertszeit ~ 75.000 a und Ra-226: Halbwertszeit ~ 1.600 a) wird nicht eingegangen. Gerade das Tochternuklid Ra-226 ist durch den Zerfall in die Tochter Rn-222 maßgeblich für alle gasförmigen Radioaktivitätsemissionen aus sämtlichen Uranprozessanlagen verantwortlich.

Radioaktives Inventar

Es wird argumentiert, dass bereits große Mengen des VLLW bzw. LLW geordnet beseitigt worden seien, ohne den konkreten Entsorgungsweg näher zu spezifizieren. Implizit kann damit evtl. auf die Umwidmung des abgereicherten Uranhexafluorids aus der Anreicherung geschlossen werden, welches formal als Edukt zur Synthese von Flusssäure betrachtet wird (vgl. JRC-Bericht, Teil A 3.3.3.3, S. 99), aber im engeren Kreislaufwirtschaftsinne keiner stofflichen Wiederverwertung entspricht, da die zu entsorgende, radioaktive Schwermetallstoffmenge unverändert bleibt. Somit wäre dies lediglich eine "Entsorgung" kraft eigener Definition des JRC-Berichts. Leider lässt der Bericht den Leser hierüber im Unklaren.

Ferner wird argumentiert, dass große Mengen flüssiger radioaktiver Abfälle außerhalb der EU (Russland, USA) aus militärischen Programmen entstammen und im Rahmen der Studie nicht weiter betrachtet werden. Dabei bleibt unerwähnt, dass z. B. die Slowakische Republik in der Vergangenheit abgebrannte Brennelemente aus Leistungsreaktoren zur Wiederaufbereitung in die UdSSR bzw. die Russische Föderation verbracht hat (SLOV, 2017). Solche Exporte schlagen natürlich mit geringeren vorgehaltenen Schwermetallmassen zu Buche (vgl. JRC-Bericht, Teil B 2.3, Abbildung 2.3-2., S. 218), erzeugen aber radioaktive Abwässer außerhalb der EU. Der JRC-Bericht hätte bei Kenntnis des Exportes von Abfällen nach außerhalb der EU ihren „Abfallbilanzraum“ auf die jeweiligen Empfängerländer ausweiten müssen.

4.3 Urananreicherung, Herstellung von Urandioxid-Brennelementen, Wiederaufbereitung, Herstellung von Mischoxid-Brennelementen

Im JRC-Bericht, Teil A 3.3.3 bis 3.3.6 werden die Prozessschritte der Urananreicherung, der Herstellung von Urandioxid-Brennelementen, der Wiederaufbereitung von Brennelementen sowie der Herstellung von Mischoxid-Brennelementen hinsichtlich ihrer Einflüsse auf die DNSH-Kriterien der Taxonomie-Verordnung untersucht. Diese Prozesse werden in den so genannten Ver- und Entsorgungsanlagen vollzogen. Die Prüfung des vorgelegten Berichtes hat ähnliche Anmerkungen zu den benannten Kapiteln ergeben. Folglich wird nachfolgend eine zusammenfassende Betrachtung der Prozessschritte vollzogen.

Allgemeine Prüfergebnisse

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die vier Kapitel eine reine Betrachtung der technischen Prozessschritte darstellen und sicherheitstechnische Aspekte nicht in gebührendem Umfang und gebührender Tiefe betrachtet werden. Hierbei werden die notwendigen technischen Prozesse zur Herstellung und Wiederaufbereitung von Brennelementen beschrieben und die jeweiligen Auswirkungen auf die DNSH-Kriterien untersucht. Eine Berücksichtigung von weiteren Prozessschritten, wie beispielsweise dem Transport (siehe auch Kapitel 5.4) zwischen den Anlagen, erfolgt nicht. Durch Zwischenfälle beim Transport sind trotz der Einhaltung der gültigen Anforderungen des Gefahrgutrechts Freisetzungen radioaktiver Stoffe nicht vollständig auszuschließen. Da schwere Unfälle jenseits der Auslegungsanforderungen in der vom JRC angewendeten Methodik nicht betrachtet werden, hat dies keinen Einfluss auf die Bewertung der DNSH-Kriterien durch das JRC. Die Bedeutung dieser grundsätzlichen Frage wurde oben erläutert (s. Kapitel 2.1 und 2.2.1 dieser Fachstellungnahme).

Ebenfalls erfolgt keine Untersuchung der notwendigen stilllegungsrelevanten Maßnahmen für die Anlagen. Stilllegung und Rückbau stellen nicht nur besondere Anforderungen an das Zusammenspiel

von Mensch, Technik und Organisation, sondern auch an die spätere Zwischenlagerung und Endlagerung der anfallenden radioaktiven Stoffe.

Die Auswirkungen von möglichen auslegungsüberschreitenden Störfällen wurden im Rahmen des JRC-Berichtes nicht betrachtet (siehe hierzu auch Kapitel 2.1 und 2.2.1 dieser Fachstellungnahme). Da die Konsequenzen aus einem schweren Unfall in einer der benannten Anlagentypen weitreichende Folgen für Mensch und Umwelt haben können, sollte dieser Aspekt stärker in die Nachhaltigkeitsbetrachtung einbezogen werden.

Wiederaufbereitung von Brennstoffen

Die Wiederaufbereitung von Brennstoffen (JRC-Bericht, Teil A 3.3.5, S. 105ff) wird im vorliegenden Bericht als Möglichkeit dargestellt, einen sogenannten geschlossenen Brennstoffkreislauf zu realisieren. In Teil A 3.3.5, S. 105ff und, 5.6, S. 196 und sowie in Teil B 6.3, S. 280ff des JRC-Berichts wird diskutiert, inwiefern die Nutzung eines geschlossenen Brennstoffkreislaufs dazu führen könnte, die Größe eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle kleiner zu gestalten.

Beim Twice Through Cycle (im JRC Bericht auch als "Partially closed fuel cycle" bezeichnet) werden Uranoxid-Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren einmalig wiederaufbereitet. Dabei wird das darin enthaltene Plutonium und (teilweise) Uran zur Fertigung von Mischoxid(MOX)-Brennelementen verwendet. Diese werden erneut Leichtwasserreaktoren zugeführt. Nach der einmaligen Nutzung im Leichtwasserreaktor ist eine weitere Wiederaufbereitung der MOX-Brennelemente im Twice Through Cycle aufgrund technischer Problemstellungen (eine ungünstige Verschiebung des Plutonium-Nuklidvektors) nicht vorgesehen. Bei einem "vollständig geschlossenen Brennstoffkreislauf" (im JRC Bericht "fully closed cycle" genannt) könnten Brennelemente, die selbst aus der Wiederaufbereitung stammen, ebenfalls wiederaufbereitet werden (mehrfache Wiederaufbereitung). Ein "vollständig geschlossener Brennstoffkreislauf" erfordert den Einsatz schneller Reaktoren.

Der JRC-Bericht selbst geht nicht näher auf die Art der Implementierung des "vollständig geschlossenen Brennstoffkreislaufs" ein. Es ist zu erwähnen, dass der Brennstoffkreislauf dahingehend nicht vollständig geschlossen ist, da auch hierbei Abfälle anfallen, die aus dem Kreislauf entfernt und einem Endlager zugeführt werden müssen. Ebenfalls muss dem Kreislauf auch neuer Brennstoff hinzugefügt werden (jedoch weniger als in einem offenen oder "teilweise geschlossenen" Brennstoffkreislauf).

Im Bericht werden die einfache Wiederaufbereitung (Twice Through Cycle) und der Verzicht auf eine Wiederaufbereitung (Open Fuel Cycle) miteinander verglichen. Hierbei gibt der Bericht an, dass sich das Endlagervolumen um den Faktor 3,4 reduzieren ließe (JRC-Bericht, Teil A 3.3.5, S. 113). Diese Reduktion lässt sich in der zugrundeliegenden Quelle nur dadurch erreichen, dass größere Teile des Abfalls unberücksichtigt bleiben (der JRC-Bericht stellt dies in einer Fußnote dar).

An einer anderen Stelle (JRC-Bericht, Teil A 3.3.5, S. 107) führt der Bericht aus, dass sich bei einem voll geschlossenen Brennstoffkreislauf die Endlagergröße um 40% reduzieren würde. Gemäß zuvor dargestellter Erläuterung sind jedoch bei einem vollständig geschlossenen Brennstoffkreislauf größere Reduktionen zu erwarten, als bei der einmaligen Wiederaufbereitung. Insofern scheinen diese Aussagen im Widerspruch zu stehen. Inwiefern die Größe eines möglichen Endlagers überhaupt für die Bewertung im Sinne der EU-Taxonomie von Relevanz ist, wäre weiterführend zu prüfen.

4.4 Kernkraftwerksbetrieb

Im JRC-Bericht wird an vielen Stellen lediglich der normale Betrieb betrachtet, Unfallszenarien werden hingegen nur im relativ kurzen Teil A 3.5 behandelt (siehe bereits Kapitel 2.1 und 2.2.1 und dieser Fachstellungnahme). Deren Betrachtung beschränkt sich auf die Letalität und vergleicht diese mit anderen Energieträgern, berücksichtigt dabei aber nicht die weiteren im Hinblick auf die Taxonomie relevanten Aspekte der Unfallrisiken. Aber insbesondere Unfälle beim Betrieb von Kernkraftwerken können zu unkontrollierten Freisetzungen radioaktiver Stoffe und somit zu erheblichen Umweltauswirkungen führen. Eine ganzheitliche Bewertung der Kernenergienutzung muss daher auch eine Risikobewertung hinsichtlich aller im Rahmen der EU-Taxonomie relevanten Umweltziele beinhalten und diese in Bezug zu den von anderen Energieträgern ausgehenden Risiken im Bereich auslegungsüberschreitender Ereignisse setzen.

Nach dem Unfall von Fukushima wurden geltende Regelwerke überarbeitet, insbesondere die EU-Richtlinie 2009/71/EURATOM wurde hinsichtlich der anzustrebenden Sicherheitsziele und insbesondere an neu zu errichtende Kernkraftwerke angelegte Anforderungen durch die Änderungen in 2014/87/EURATOM verschärft. Dies bedeutet jedoch nicht, dass Unfälle mit Freisetzungen in Kernkraftwerken kategorisch ausgeschlossen sind. Die Mitgliedstaaten sind verpflichtet, Kernkraftwerke mit dem Ziel auszuliegen, zu errichten und zu betreiben, Unfälle zu vermeiden und im Fall eines Unfalls dessen Auswirkungen abzumildern. Die prinzipielle existierende Möglichkeit von Unfällen besteht aber weiterhin (EURATOM, 2014).

Der JRC-Bericht zitiert weiter die WENRA Safety Objectives for New Nuclear Power Plants (siehe JRC-Bericht, Teil A 3.3.7, S. 128f). Dies sind an die Auslegung neu zu errichtender Kernkraftwerke anzulegende Sicherheitsziele der WENRA für die Sicherheit neuer Reaktoren. Die veröffentlichten Positionen der WENRA stellen kein verbindliches Regelwerk, sondern eine freiwillige Selbstverpflichtung dar. Im o.g. heißt es als Forderung, dass für neu zu errichtende Kernkraftwerke Unfälle mit Kernschmelze, die zu frühen oder großen Freisetzungen führen, praktisch ausgeschlossen sein sollen. Hierzu sind zwei Dinge festzuhalten:

Auch wenn verschiedene Regelwerke vom „Ausschluss“ oder „praktischem Ausschluss“ bestimmter Ereignisse oder Unfallszenarien sprechen (vgl. EU-Richtlinie, Artikel 8a; WENRA, 2010), bedeutet dieser Terminus technicus nicht, dass diese Ereignisse kategorisch ausgeschlossen sind. Im probabilistischen Sinne bedeutet ein solcher „Ausschluss“, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit des betrachteten Ereignisses aufgrund der getroffenen Maßnahmen hinreichend klein ist. Die Verwendung dieser Regelwerksterminologie im JRC-Bericht suggeriert allerdings, dass der „Ausschluss“ in einem kategorischen Sinne verstanden wird.

Die hier „ausgeschlossenen“ Szenarien zielen auch nicht darauf ab, Unfälle mit Freisetzungen zu vermeiden, sondern einzig darauf, Freisetzungen zu vermeiden, die bestimmten definierten Randbedingungen unterliegen (Ermöglichung von Zeit für die Umsetzung von anlagenexternen Notfallschutzmaßnahmen, bzw. notwendige Schutzmaßnahmen, für die Öffentlichkeit die weder örtlich noch zeitlich begrenzt werden könnten).

Zum anderen ist der Wortlaut nicht in die EU-Richtlinie (EURATOM, 2014) übernommen. Die dort formulierten Sicherheitsziele gelten zudem für bereits existierende Kernkraftwerke nur als Bezugsgröße für die zeitgerechte Umsetzung von vernünftigerweise durchführbaren Sicherheitsverbesserungen (EURATOM, 2014) in den Anlagen.

Der JRC-Bericht betrachtet in Teil A 3.5 sowohl Gen II als auch Gen III Reaktoren hinsichtlich ihrer Unfallrisiken. Dabei wird ein Schwerpunkt auf Kernkraftwerke der Generation III gelegt. Diese sind allerdings derzeit in Europa noch nicht in Betrieb, einzelne Reaktoren befinden sich in der Bauphase. Betrieben werden in Europa fast ausschließlich Reaktoren, die bereits älter als 30 Jahre sind.

Auch wenn europaweit immer wieder Nachrüstungen mit dem Ziel einer Erhöhung des Sicherheitsniveaus durchgeführt wurden – in großem Umfang zuletzt nach dem Unfall von Fukushima, unterscheiden sich die Auslegungsphilosophien der Kernkraftwerksgenerationen insbesondere auch hinsichtlich der Einstufung von Unfällen mit Kernschmelzen. Je nach Anlagendesign sind auch den Möglichkeiten für „vernünftigerweise durchführbare Sicherheitsverbesserungen“ (EURATOM, 2014) Grenzen gesetzt.

4.5 Rückbau der Kernkraftwerke

Generell ist zu bemerken, dass dem Thema Stilllegung und Rückbau im JRC- Bericht vergleichsweise wenig Platz eingeräumt wird. Dabei handelt es sich hier um einen sehr komplexen, herausfordernden und lange andauernden Prozess; dies gilt sowohl für den Rückbau von Kernkraftwerken als auch für Anlagen der Kernbrennstoffversorgung. Hier wäre eine ausführlichere und differenziertere Betrachtung angezeigt.

Bisher wurden weltweit einige Kernkraftwerke vollständig abgebaut und aus der atomrechtlichen Überwachung entlassen (der Bericht spricht von „green field“, JRC-Bericht, Teil A 3.3.7.1.4, S. 129). Es wird im Bericht korrekterweise angegeben, dass sich bei der Wahl der Rückbaustrategie weltweit eine Favorisierung der Strategie des sofortigen Rückbaus nach der Abschaltung (*Immediate Dismantling*) zeigt (IAEA, 2014). Die zweite mögliche Strategie Rückbau nach (zeitlich begrenztem) sicheren Einschluss (*Deferred Dismantling*) tritt wegen verschiedener Unabwägbarkeiten in den Hintergrund (IAEA, 2018). Dagegen wird der im Bericht als dritte Strategie angegebene dauerhafte Einschluss (*Entombment*) von der IAEA nicht als Rückbaustrategie betrachtet und ist nur im Falle außergewöhnlicher Umstände (z.B. schwere Unfälle) akzeptierbar (IAEA, 2014). De facto handelt es sich bei Entombment um eine dauerhafte Vor-Ort-Endlagerung von radioaktivem Abfall.

Der Lebenszyklus von Kernkraftwerken kann in mehrere Phasen unterteilt werden: Design- und Errichtungsphase, Betrieb, Stilllegung und Rückbau. Dies wird auch im JRC-Bericht generell so gehandhabt, allerdings treten dabei auch Unstimmigkeiten auf, bei denen die Stilllegung der Betriebsphase zugeordnet wird. Die Zuordnung der Stilllegung zu einer übergeordneten Phase der Energieerzeugung (power generation phase) ist sachlich nicht nachvollziehbar, da ein Kernkraftwerk in Stilllegung Energie verbraucht. Die fehlerhafte Zuordnung führt zu Unklarheiten bei der Interpretation der nachfolgenden Ergebnisse:

Ein wesentlicher Punkt beim Rückbau eines Kernkraftwerks ist die Abfallbilanz, besonders mit Blick auf die Menge des radioaktiven Abfalls. Hierzu übernimmt der JRC-Bericht in Teil B 2.1, S. 210 eine Tabelle (Tabelle 2.1-1) mit typischen jährlichen Abfallproduktionsraten, die aus dem IAEA-Dokument TECDOC 1817 (IAEA, 2017) entstammt. Die Zahlenangabe für *Decommissioning of Power Plant* ist im JRC-Bericht mit einer Fußnote versehen, die in der IAEA-Quelle nicht vorhanden ist. Die Fußnote im JRC-Bericht besagt, dass es sich um die Einheit [m^3 per plant (1 GW)] handele, in der IAEA-Quelle hingegen gilt die Angabe [$\text{m}^3/\text{GW}\cdot\text{year}$], also eine jährliche Abfallproduktionsrate. Während im JRC-Bericht also in Teil B 2.1 ein Abfallaufkommen aus der Stilllegung eines Kernkraftwerks von „375 m^3 per plant (1 GW)“ angegeben wird, bezieht sich die zugehörige IAEA-Quelle auf eine jährliche

Abfallproduktionsrate. Das Abfallaufkommen aus der Stilllegung eines KW wäre also je nach Abbaudauer deutlich höher anzusetzen als im JRC-Bericht in Teil B 2.1 angegeben.

Eine weitere Ungenauigkeit ergibt sich bei der späteren Darstellung über die Endlagerung der radioaktiven Abfälle mit geringer Radioaktivität. Entgegen der im Bericht erwähnten Praxis in anderen Ländern betreibt z.B. Deutschland kein oberflächennahes Endlager. Auch schwach- und mittelradioaktiver Abfall, der nicht der Freigabe unterliegt, soll in Deutschland dauerhaft in ein tiefes geologisches Endlager verbracht werden (dazu auch Kapitel 5.2 dieser Fachstellungnahme).

Aufgrund der Bedeutung des Rückbauprozesses im Lebenszyklus von Kernkraftanlagen und aufgrund des absehbar zunehmenden Informationsbedarfs über seine Herausforderungen und Risiken sollte der Phase der Stilllegung und des Rückbaus auch im Rahmen der Überprüfung der DNSH-Kriterien ein höherer Stellenwert beigemessen werden.

4.6 Ionisierende Strahlung und ihre Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt während aller Lebenszyklusphasen (bis auf Entsorgung und Transporte)

Der JRC-Bericht beschränkt sich in Teil A 3.4 („Impact of ionizing radiation on human health and the environment“) im Wesentlichen auf die Folgen ionisierender Strahlung auf Mensch (JRC-Bericht, Teil A 3.4.1, S. 167ff) und Umwelt (JRC-Bericht, Teil A 3.4.2, S. 173ff). Die Folgen der Emissionen nicht-radioaktiver Stoffe werden nur an einer Stelle (Veröffentlichung [3.4-1]) betrachtet.

Die Größen, mit denen in Teil A 3.4 des JRC-Berichts die Wirkung ionisierender Strahlung auf den Menschen quantifiziert wird, reichen von „Disability Adjusted Life Years“ (DALY) über Gesamtemissionen in Becquerel (Bq) bis hin zur effektiven Dosis in Millisievert (mSv) oder Mikrosievert (μ Sv). Aus wissenschaftlicher Sicht kann die Wirkung von Radionukliden auf den Menschen bei geringen Strahlenexpositionen nur durch die effektive Dosis oder bei Radon-222 (Rn-222) und seinen Folgeprodukten durch die Aktivitätskonzentration von Rn-222 in der Atemluft (oder durch daraus abgeleitete Größen) quantifiziert werden. Die pauschale Angabe, welche Aktivität insgesamt in die Umwelt freigesetzt wird, ist kein geeignetes Maß für die Wirkung auf den Menschen, da die Dynamik in der Umwelt sowie die Dosiskoeffizienten bei innerer Exposition und die Dosisleistungskoeffizienten bei äußerer Exposition vom jeweiligen Radionuklid abhängen.

Im Hinblick auf die Strahlenexposition des Menschen sind die in Teil A 3.4.1 des JRC-Berichts angegebenen Zahlenwerte plausibel. Es ist korrekt, dass die Strahlenexposition des Menschen infolge der zivilisatorischen Nutzung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung im Vergleich zur Strahlenexposition aus natürlichen Quellen und deren Schwankungsbreite gering ist. Es entspricht jedoch nicht dem aktuellen Stand im Strahlenschutz, bei kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen mittlere effektive Dosen pro Kopf der Bevölkerung anzugeben. Gemäß den aktuellen Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) ist die sogenannte „repräsentative Person“ im Sinne der ICRP zu betrachten, eine Einzelperson der Bevölkerung, die aufgrund ihrer Lebensgewohnheiten einer erhöhten Strahlenexposition ausgesetzt ist.

5 Kriterium 2 der Taxonomie-Verordnung – DNSH-Kriterien: Entsorgung, Transporte, Forschung und Entwicklung

In diesem Kapitel wird der Themenkomplex Entsorgung von radioaktiven Abfällen betrachtet. Die fachlich-wissenschaftlichen Aussagen im JRC-Bericht werden hierbei für die Themenfelder Zwischenlagerung (Kapitel 5.1 dieser Fachstellungnahme), Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle (Kapitel 5.2), Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Kapitel 5.3), Transport (Kapitel 5.4) und Forschung und Entwicklung (Kapitel 5.5) fachlich gewürdigt. Zur Binnengliederung der jeweiligen Unterkapitel wurden Zwischenüberschriften eingefügt.

Herausgearbeitet wird u. a. die Problematik, dass als Grundlage für die Bewertung der DNSH-Kriterien vielfach nur der Normalbetrieb bei Anlagen und Tätigkeiten im nuklearen Entsorgungsbereich diskutiert wird. Die nach einschlägigen Gesetzen und Regelwerken zu berücksichtigenden Störfälle und auslegungsüberschreitende Ereignisse und deren möglicher Einfluss auf die DNSH-Kriterien werden jedoch nicht in die Bewertung des JRC-Berichts mit einbezogen. Auch nimmt der JRC-Bericht die Endlagerung von LLW in oberflächennahen Endlagern als die Standardoption an, berücksichtigt aber nicht, dass eine Reihe von Ländern für LLW oder auch alle Arten radioaktiver Abfälle ausschließlich eine geologische Endlagerung vorgesehen haben. Ob eine mögliche Freisetzung von Radionukliden am Ende des Betrachtungszeitraumes von Endlagern unterhalb einer (nationalen) gesetzlichen Geringfügigkeitsschwelle auch mit den DNSH-Kriterien konform ist, wird im JRC-Bericht nicht erörtert.

Auch geht der JRC-Bericht nicht ausreichend auf den Umstand ein, dass eine erfolgreiche tiefengeologische Endlagerung hochradioaktiver Abfälle inklusive des dauerhaften Verschlusses bisher weltweit noch nicht gelungen ist.

5.1 Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle

Grundsätzlich fehlt im JRC-Bericht eine Ableitung der Erkenntnisse, die in der Executive Summary des JRC-Berichtes in Bezug auf die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle aufgeführt sind. Hierdurch ist die Nachvollziehbarkeit der getätigten Schlussfolgerungen fraglich.

Die Darstellung des JRC-Berichts in Bezug auf die Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle beschränkt sich auf eine kurze Darstellung der üblichsten Zwischenlagerungsformen. Allerdings wird in Teil A 3.3.8.3, S. 156ff des JRC-Berichts de facto nur die Zwischenlagerung hochradioaktiver Stoffe angesprochen und zudem der Eindruck erweckt, dass zur Bewertung der Zwischenlagerung lediglich der Normalbetrieb ausschlaggebend sei.

Erst unter Berücksichtigung der durch das JRC entwickelten technischen Bewertungskriterien, dargestellt im JRC-Bericht, Teil A, Annex 4, Ziffer 4, S. 366ff wird (implizit) deutlich, dass auch die nach den einschlägigen Gesetzen und Regelwerken zu berücksichtigenden Störfälle und auslegungsüberschreitende Ereignisse in die Bewertung der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle einzubeziehen sind.

Damit wird die Bewertung der Zwischenlagerung konsistent zu dem durch das JRC angesetzten Maßstab vorgenommen, was jedoch insgesamt aus fachlicher Sicht nicht ausreichend ist. Im Sinne des Restrisikos kann nicht ausgeschlossen werden, dass es durch Stör- und Unfälle bzw. durch sonstige Einwirkung Dritter (z.B. terroristische Angriffe) beim Betrieb von Zwischenlagern zu unkontrollierten Freisetzungen radioaktiver Stoffe und somit zu erheblichen Umweltauswirkungen

kommen kann. Eine ganzheitliche Bewertung der Kernenergienutzung muss daher auch eine Risikobewertung hinsichtlich dieser Ereignisse umfassen (dazu Kapitel 2.1 und 2.2.1 dieser Fachstellungnahme).

Hinsichtlich der Lagervarianten für hochradioaktiven Abfälle geht der JRC-Bericht kurz auf die trockene und nasse Zwischenlagerung ein. Während in Deutschland zum Zwecke der Aufbewahrung bis zur Endlagerung ausschließlich die trockene Zwischenlagerung verwendet wird, wird ein großer Teil des weltweit vorliegenden abgebrannten Brennstoffs in Nasslagern aufbewahrt (IAEA, 1999). Es fehlt jedoch eine fachlich detaillierte Auseinandersetzung mit den spezifischen Sicherheitseigenschaften dieser Technologien. So sind Nasslager auf aktive Systeme zur Kühlung angewiesen. Im Falle von Einwirkungen von außen auf die Gebäudestrukturen fehlt bei den externen Nasslagern im Vergleich zur trockenen Zwischenlagerung die Sicherheitsebene der Behälterbarriere. Dies gilt nicht zuletzt für die durch den JRC-Bericht genannte nasse Lagerung von abgebrannten MOX-Brennelementen, die auf weiterentwickelte Reaktorsysteme, eine Implementierung des sogenannten geschlossenen Brennstoffkreislaufs und Transmutation warten würden. Da die erfolgreiche Einführung dieser Technologien jedoch ungewiss ist (vgl. Kapitel 3.1.1 und 5.5.), muss auch die dauerhafte Zwischenlagerung dieser hochradioaktiven Stoffe hinterfragt werden.

Die detaillierteren Darstellungen in Teil B 4.1, S. 181f und 4.2, S. 182ff des JRC-Berichts geben einen guten Überblick über die verschiedenen Zwischenlagerungstypen von schwach-, mittel- und hochradioaktiven Abfällen und den spezifischen Anforderungen, ohne jedoch ins Detail zu gehen. Umfangreichere Darstellungen – insbesondere zu den zu berücksichtigenden Ereignissen und den aus diesen resultierenden Auswirkungen – wären an dieser Stelle wünschenswert gewesen. Die implizite Schlussfolgerung des JRC, dass die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle im Vergleich zu anderen Aktivitäten der Nutzung der Kerntechnik nicht die bestimmende Aktivität im Hinblick auf die DNSH-Kriterien ist, bleibt insoweit unklar abgeleitet (siehe JRC-Bericht, Teil A 4.2).

Die längerfristige bzw. verlängerte Zwischenlagerung thematisiert der JRC-Bericht, ohne jedoch zu erörtern, ob die DNSH-Kriterien nach dem im JRC-Bericht zugrunde gelegten Maßstab erfüllt sind (dazu Kapitel 2.1). Auch wenn es derzeit – insbesondere in Bezug auf die trockene Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle in Transport- und Lagerbehältern – keine Hinweise darauf gibt, dass eine verlängerte Zwischenlagerung sicherheitstechnisch nicht möglich ist, so ist die Berücksichtigung dieser Fragestellung von erheblichem Einfluss für den Entsorgungspfad, da die Zwischenlagerung die Überbrückung des Zeitraumes bis zur Endlagerung sicherstellen muss.

Aus der genehmigungsrechtlichen wie faktischen Tatsache, dass Zwischenlager nur für einen begrenzten Zeitraum in der zunächst genehmigten Form bestehen können, ergeben sich Implikationen für weitere Maßnahmen, die ggf. analog zu denen sind, die bei einer Konditionierung für eine Endlagerung nötig werden. In welchen Zeiträumen dies relevant wird, ist eine wichtige Frage der Forschung und Entwicklung. Auch dieses bleibt eine fachliche Leerstelle im JRC-Bericht.

5.2 Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle

Hinsichtlich der Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle sind nicht nachvollziehbare oder unvollständige fachliche Aussagen des JRC aufgefallen. Gleiches gilt für die vom JRC entwickelten technischen Bewertungskriterien. Zur Untergliederung des Kapitels werden daher fette, unterstrichene Überschriften für die Prüfung der fachwissenschaftlichen Ausführungen des JRC

einerseits und der Folgerungen für die TSC andererseits verwendet. Unterstrichene Überschriften im Normaldruck gliedern den Text innerhalb dieser Teile jeweils nach Unterthemen.

Fachliche Würdigung

Hinsichtlich der Endlagerung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle werden eine Reihe von Aussagen im JRC-Bericht ausgeführt, die fachlich nicht oder nur schwer nachzuvollziehen sind. Auf diese Aussagen wird im Folgenden Bezug genommen:

Fokus auf Endlagerung von schwachradioaktiven Abfällen in oberflächennahen Endlagern

An verschiedenen Stellen im JRC-Bericht wird dargestellt (z. B. Teil B 5, S. 242), dass die Verbringung von schwachradioaktiven Abfällen (LLW – Low Level Waste) in oberflächennahen Endlagern erfolgt.

Diese Darstellung erweckt den Eindruck, dass die Endlagerung von LLW in Einrichtungen an der Oberfläche oder nahe der Oberfläche der übliche Entsorgungsweg ist. Es gibt durchaus eine Reihe von Ländern, die für LLW oder auch alle Arten radioaktiver Abfälle ausschließlich eine geologische Endlagerung vorgesehen haben (z. B. Schweiz, Finnland, Schweden und Deutschland) (KOM, 2015).

Zeitspanne und Materialverhalten

In Bezug auf den Isolationszeitraum wird dargelegt (JRC-Bericht, Teil B 5.1, S. 244), dass die typische Zeitspanne für die Isolation von LLW in oberflächennahen Endlagern 300 Jahre beträgt. Weiterhin wird ausgeführt, dass bei dieser Zeitspanne das Materialverhalten der technischen Barrieren bekannt ist und prognostiziert werden kann und demzufolge die Barrieren als ausreichend verlässlich zu betrachten sind. Der JRC-Bericht stellt nachvollziehbar dar, dass die oberflächennahen Endlager eine Reihe von unterschiedlichen Einlagerungskonzepten und unterschiedliche technische Einrichtungen und Komponenten umfassen. Die an die einzusetzenden Materialien zu stellenden Anforderungen sind unter Berücksichtigung z. B. der spezifischen Standortbedingungen, des einzulagernden Abfallspektrums, der klimatischen Bedingungen und weiterer allgemeiner Rahmenbedingungen anzupassen.

Die Aussage zum Isolationszeitraum von 300 Jahren wird allerdings nicht weiter ausgeführt und/oder mit Referenzen belegt. Insgesamt sind die Angaben zu den genannten Aspekten als eine Verallgemeinerung anzusehen. Denn der erforderliche Isolationszeitraum hängt vom jeweiligen Einlagerungskonzept, technischen Einrichtungen und den verwendeten Komponenten ab.

Zur Notwendigkeit von geologischen Endlagern für LLW und institutionelle Kontrolle

Die Aussage (JRC-Bericht, Teil B 5.1, S. 244), dass keine Notwendigkeit besteht, den LLW in geologische Endlager zu verbringen, ist nicht nachvollziehbar. Oberflächennahe Endlager werden im Vergleich zu geologischen Endlagern als anfälliger eingeschätzt gegenüber menschlichem Eindringen (IAEA, 2012). Aspekte wie Robustheit, Zugänglichkeit, Sicherung, Wissensverlust etc. sind auch hier bei der Sicherheitsbeurteilung zu berücksichtigen. Auch die für oberflächennahe Endlager üblicherweise vorgesehene institutionelle Kontrolle für einen Zeitraum von 300 Jahren kann nicht generell garantiert werden. Grund hierfür ist, dass für eine Prognose des menschlichen Verhaltens und des sozialen Handelns die wissenschaftliche Basis fehlt (NAS, 1995; AKS, 2008; Seitz et al., 2016).

Zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle hat die Kommission „Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe“ geschlussfolgert, dass aufgrund der unsicheren Prognose hinsichtlich gesellschaftlicher und politischer Entwicklungen, der Gefahr von Unfällen (zum Beispiel durch mangelnde Wartung) und Angriffen durch Krieg oder Terrorismus, der Proliferationsgefahr, des großen organisatorischen

und finanziellen Aufwandes für zukünftige Generationen und klimatischer Unwägbarkeiten, die langfristige Zwischenlagerung an oder nahe der Oberfläche keine annehmbare Option für den nachweisbar sicheren, langzeitigen Umgang mit radioaktiven Abfällen darstellt (KOM, 2016). Diese Schlussfolgerung zur langfristigen Zwischenlagerung vom hochradioaktiven Abfällen an oder nahe der Oberfläche kann bzgl. der Vorhersagbarkeit der Entwicklung einer Anlage im Prinzip auch auf oberflächennahe Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle übertragen werden.

Handlungsbedarf bei Komplikationen

Im Rahmen der Ausführungen zu den Inhalten periodischer Sicherheitsüberprüfungen, ihrer Zuverlässigkeit und ihrem Beitrag zur Sicherheit oberflächennaher Anlagen erwähnt der JRC-Bericht die in der Bundesrepublik Deutschland gelegene Schachtanlage Asse II (JRC-Bericht, Teil B 5.1, S. 249). Die Schachtanlage wurde auf Grundlage des deutschen Bergrechts betrieben und sollte ursprünglich auch auf dessen Basis stillgelegt werden. Eine Langzeitsicherheitsanalyse oder ein Safety Case im atomrechtlichen Sinne wurde für die Asse II nicht durchgeführt. Der JRC-Bericht führt das zwischen 1967 und 1978 für die Verbringung von schwach- und mittelradioaktiven Abfälle genutzte Salzbergwerk als Beispiel dafür an, dass eine erneute Sicherheitseinschätzung auf Grundlage des seit 2009 anzuwendenden Atomrechts zu der Entscheidung geführt hat, die eingelagerten Abfälle zurückzuholen, neu zu konditionieren und in einer anderen Anlage zu beseitigen.

Die Schachtanlage Asse II kann in der Tat als Beispiel für die zweifelhafte Robustheit sicherheitstechnischer Mechanismen und Prozesse – hier allerdings für ein tiefengeologisches Endlager – gesehen werden. In diesem Zusammenhang erscheint es wichtig darauf hinzuweisen, dass es keinen engen zeitlichen Zusammenhang zwischen dem Erkennen der Sicherheitsprobleme und der Entscheidung zur Rückholung gab. Es lässt sich vielmehr feststellen, dass die Schwächen des alten Gewinnungsbergwerks bereits in den 1960er Jahren erkannt und Ende der 1970er / Anfang der 1980er Jahre einem breiteren Kreis staatlicher und nichtstaatlicher Akteure deutlich wurden (Möller, 2016). Insbesondere hydrogeologische Wirkungszusammenhänge und Fragen, die die längerfristige Standsicherheit betrafen, wurden anfänglich nur abschätzungsweise und mit eher geringer Intensität begleitend bearbeitet (Möller, 2016). Das Beispiel Asse II kann insofern auch für einen heute nicht mehr zulässigen Umgang mit Unsicherheiten und Ungewissheiten stehen (vgl. dazu auch Kapitel 2.2.2 dieser Fachstellungnahme). Die tiefere Analyse der Entscheidungsprozesse, die zur Nutzung der Schachtanlage Asse II als Endlager für schwach- und mittelradioaktiven Abfällen führten, zeigt, dass anfänglich mehrere, nicht unbedingt sicherheitsgerichtete Gründe für die Einbeziehung des Bergwerks in die nukleare Entsorgung sprachen. Es waren vielmehr der niedrige Preis, die sofortige Verfügbarkeit, die Möglichkeit zur Erfüllung bestehender Einlagerungswünsche, die Durchführbarkeit verschiedener Versuche und die Möglichkeit, Zeit für die weiteren Planungen zu gewinnen. Es zeigt sich darüber hinaus, dass schließlich in dem Bestreben, der Kernenergie zum wirtschaftlichen Durchbruch zu verhelfen, Wirtschaftlichkeitsaspekte höher als Sicherheitsaspekte gewichtet wurden (Möller, 2009). In späteren Jahren trugen entsorgungs- und haushaltspolitische Erwägungen sowie die Konfliktrichtigkeit des Handlungsfeldes dazu bei, dass staatliche Akteure mit den sicherheitstechnischen Defiziten der Schachtanlage eher zurückhaltend umgingen. In dieser Perspektive ist Asse II möglicherweise kein deutscher Spezialfall, sondern ggf. auf andere Anlagen übertragbar, die in Zeiten vornehmlich wirtschaftlicher Nutzung angelegt und genehmigt wurden.

Letztlich unterstreicht das Beispiel Asse II die Wichtigkeit einer regelmäßigen, kritischen Sicherheitsüberprüfung nuklearer Entsorgungsanlagen und die Notwendigkeit, der Sicherheit Vorrang vor wirtschaftlichen Erwägungen einzuräumen. Das Beispiel zeigt darüber die enormen finanziellen und gesellschaftlichen Folgekosten von Fehlentscheidungen in der nuklearen Entsorgung

auf. Die Tatsache, dass Anforderungen in Hinblick auf Rückholbarkeit und Bergbarkeit radioaktiver Abfälle inzwischen dem Stand von Wissenschaft und Technik in der nuklearen Endlagerung entsprechen, macht deutlich, dass solche Fehlentwicklungen oder -entscheidungen als Risikobestandteil der Kernenergienutzung angesehen werden müssen.

Maßnahmen gegen menschliches Eindringen (HI)

Den Ausführungen des JRC-Berichts zu den Maßnahmen gegen menschliches Eindringen in ein verschlossenes Endlager (HI) (JRC-Bericht, Teil B 5.1, S. 246) wird im Wesentlichen gefolgt. Allerdings wird das Thema insgesamt nicht hinreichend im Hinblick auf die DNSH-Kriterien gewürdigt. Auf Kapitel 2.2.5 wird verwiesen.

Technischen Bewertungskriterien

Lücke für VLLW und langlebige LLW und ILW

Im JRC-Bericht (Teil A 5.7, S. 197) wird ausgeführt, dass die Endlagerung von LLW und kurzlebigen Intermediate Level Waste (ILW) im Vergleich zu High Level Waste (HLW) weniger anspruchsvoll sei und daher die entwickelten TSC für die Zwischenlagerung und Endlagerung von HLW und bestrahlten Brennelementen die Endlagerung von LLW und kurzlebigen ILW abdecken.

Der kurzlebige LLW und ILW enthält nur geringe Mengen an langlebigen Radionukliden. Um als kurzlebig zu gelten, muss der Abfall die folgenden drei Kriterien erfüllen (IAEA, 2009; GRS, 2004):

- Halbwertszeit des Abfalls ist geringer als 30 Jahre,
- spezifische Aktivität der α -Strahler des Abfalls im gesamten Endlager ist geringer als 400 Bq/g und
- spezifische Aktivität der α -Strahler in Einzelgebinden ist geringer als 4.000 Bq/g.

Zu den langlebigen LLW und ILW gehören Abfälle, die die o. g. Kriterien überschreiten und keine signifikante Wärmeproduktion haben. Diese Abfälle sind im JRC-Bericht nicht explizit behandelt worden. Dabei handelt es sich um Abfälle, welche nicht aus der Energieerzeugung (also Industrie, Forschung, Medizin) stammen. Ein großer Anteil nuklearmedizinisch relevanter Isotope weist teils sehr lange Halbwertszeiten auf (z. B. Tc-99, Se-79). Durch das Ausblenden der Fragestellung für längerfristig aktiven Abfall aus dem LLW- oder ILW-Bereich wird hier ein wesentlicher Teil des potenziellen negativen Einflusses auf die Umgebung nicht behandelt. Dies führt wiederum zu einem systematischen Unterschätzen der negativen Einflüsse der Kernenergienutzung auf die DNSH-Kriterien im direkten Vergleich mit anderen Energieerzeugungsformen.

Es drängt sich die Frage auf, welche TSC für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, die nicht unter die o. g. Abfallklassen fallen, gelten bzw. heranzuziehen sind. Dies sind beispielsweise Very Low Level Waste (VLLW) und langlebiger LLW und ILW. Im JRC-Bericht besteht für diese Abfallklassen hinsichtlich der TSC eine Lücke.

Unterschiede zwischen geologischen und oberflächennahen Endlagern

Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Ausführung und Konzeption bei geologischen Endlagern im Sinne der Robustheit von einer anderen Qualität sein wird als die bei oberflächennahen Endlagern, die gemäß dem JRC-Bericht für LLW üblich sind (siehe JRC-Bericht, Teil B 5.1, S. 244). So werden Einrichtungen für LLW, die oberflächennah angelegt sind, als anfälliger eingeschätzt gegenüber extremen externen Ereignissen und Prozessen (LLW, 2011), z. B. Naturphänomenen, Unfällen und

anthropogenen Einwirkungen, inklusive des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens (HI) (IAEA, 2012).

Ein weiterer Unterschied bezieht sich auf den allgemein geringeren Abstand oberflächennaher Endlager zu grundwasserleitenden Schichten gegenüber geologischen Endlagern. Dies kann bei oberflächennahen Endlagern im Falle einer Leckage im Vergleich zu einem geologischen Endlager ungünstigere Auswirkungen auf die Umwelt haben.

Weitere Unterschiede bestehen in Bezug auf das Ereignis HI, dass sowohl für oberflächennahe als auch geologische Endlager nicht ausgeschlossen werden kann. Allerdings sind die technischen Möglichkeiten von HI bei oberflächennahen Endlagern gegenüber geologischen Endlagern als technisch einfacher einzuschätzen, unter der Berücksichtigung, dass die vorgesehene institutionelle Kontrolle nicht über den gesamten vorgesehenen Isolationszeitraum gewährleistet werden kann (s. o.). Im Prinzip stellen daher die Möglichkeiten für ein Vordringen in Teufen, in denen geologische Endlager errichtet werden eine Teilmenge der Möglichkeiten dar, die die Erfüllung der DNSH-Kriterien bei einer oberflächennahe Endlagereinrichtung beeinträchtigen können.

Eine separate Berücksichtigung von jeweils spezifischen TSC für die oberflächennahe Endlagerung und die geologische Endlagerung von radioaktiven Abfällen erscheint demnach fachlich geboten, wurde durch den JRC-Bericht aber nicht vorgenommen.

Übertragbarkeit der TSC für HAW auf LLW

Im JRC-Bericht (Teil A 3.3.8.9, S. 165ff) wird ausgeführt, dass Tätigkeiten, u. a. bezogen auf die Endlagerung von radioaktiven Abfällen, keine bedeutenden Schäden der menschlichen Gesundheit oder der Umwelt hervorrufen. Voraussetzung dafür ist, dass die damit verbundenen industriellen Aktivitäten die TSC erfüllen.

Die TSC für die Zwischenlagerung und Endlagerung von HLW und bestrahlten Brennelementen sind im JRC-Bericht unter dem Annex 4 dargestellt. In den TSC wird unter den DNSH u. a. ausgeführt, dass die Endlagereinrichtung den Einschluss der Abfälle und Isolierung von der Biosphäre sicherstellen muss. Das gilt auch für das Auftreten extremer Naturphänomene wie z. B. Erdbeben, Tornados, Flutung und den Verlust von technischen Barrieren.

Der JRC-Bericht weist keine gesonderten TSC für LLW und ILW aus und stellt dar, dass die entwickelten TSC für HLW und bestrahlte Brennelemente als abdeckend zu betrachten sind (vgl. JRC-Bericht, Teil A 5.7, S. 196f). Die Argumentation, die zu dieser Schlussfolgerung führt, ist im JRC-Bericht nicht vorhanden und die Aussage ist allgemein falsch. Legt man die TSC für HAW auch für LLW an, so bestehen Zweifel, ob die o. g. Voraussetzung der Einhaltung der TSC, z. B. unter der Berücksichtigung von extremen Naturphänomenen, umfassend gegeben ist. Der Grund hierfür besteht in möglichen Unterschieden bezüglich der Robustheit der für HAW und LLW jeweils vorgesehenen Endlagerung in geologischen bzw. oberflächennahen Endlagern.

Die im JRC-Bericht getroffene dezidierte Schlussfolgerung für die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in oberflächennahen Endlagern, dass hierdurch keine signifikanten Schäden der menschlichen Gesundheit oder der Umwelt auftreten können, kann daher nicht nachvollzogen werden.

5.3 Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Hinsichtlich der Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle sind nicht nachvollziehbare oder unvollständige fachliche Aussagen des JRC aufgefallen. Gleiches gilt für die vom JRC entwickelten technischen Bewertungskriterien. Zur Untergliederung des Kapitels werden daher fette, unterstrichene Überschriften für die Prüfung der fachwissenschaftlichen Ausführungen des JRC einerseits und der Folgerungen für die TSC andererseits verwendet. Unterstrichene Überschriften im Normaldruck gliedern den Text innerhalb dieser Teile jeweils nach Unterthemen.

Vorangestellt ist die Tatsache festzuhalten, dass die Kernenergie schon seit einigen Jahrzehnten genutzt wird, weltweit aber immer noch kein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betrieb ist, Lasten damit fortgesetzt auf nachfolgende Generationen abgewälzt und diese in ihrer Entscheidungsfreiheit eingeschränkt werden. Darauf wird in Kapitel 6 dieser Fachstellungnahme näher eingegangen.

Fachliche Würdigung

Allgemeine Prüfergebnisse

Der JRC-Bericht enthält an vielen Stellen unbegründete Verallgemeinerungen. Aus einzelnen, ausgewählten Beispielen werden Schlussfolgerungen gezogen und eine globale Gültigkeit unterstellt. Für fachlich nicht im Detail befasste Leser:innen dürfte dies nur schwer oder gar nicht erkennbar sein. Beispielsweise wird in dem Bericht die Realisierbarkeit der Entsorgung anderer „Abfälle“ (CO₂) in tiefen geologischen Formationen auf die Endlagerung von HAW übertragen. Auf das völlig unterschiedliche Gefährdungspotenzial insbesondere über sehr lange Zeiträume wird jedoch nicht eingegangen (näher dazu unten).

Die Schlussfolgerungen in Teil A 3.3.8.9, S. 165 des JRC-Berichts, z. B. „The disposal (...) does not contribute (the results are zero or negligible) to those indicators representative of the impacts to the Taxonomy Regulation objectives“, werden durch die dargestellten Analysen und Diskussionen nur unzureichend gestützt. Basierend auf den Informationen in Teil A 3 des JRC-Berichts ist diese Aussage verfrüht und nicht ausreichend begründet. Die Ergebnisse der in Teil A 3 des JRC-Berichts beschriebenen Analysen werden nur im folgenden Kapitel (JRC-Bericht, Teil A 4) gegenüber den Grundprinzipien und Zielen der Taxonomie erörtert (näher dazu unten).

Hinsichtlich der Quellenangaben fallen teilweise unvollständig beschriebene Referenzen für vorgestellte Angaben auf - zum Beispiel im Text auf Seite 217, Teil B 2.3 des JRC-Berichts zum Inventar abgebrannter Brennelemente in der EU, auf Seite 244, Teil B 5.1, Bild 5.1-1 zum erwähnten Zeitraum von 300 Jahren Isolation von schwach radioaktiven Abfällen von der Biosphäre und der Öffentlichkeit und auf Seite 161, Teil A 3.3.8, Bild 3.3.8-9 zu den Details der Konstruktion des finnischen Endlagers.

Das JRC stellt die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle am Beispiel der Endlagerprojekte in Finnland und Frankreich als gelöstes Problem dar. Dabei wird weitgehend ausgeblendet, dass das finnische Endlager gerade erst im Bau ist und sich in Frankreich der Genehmigungsantrag der Betreibergesellschaft bereits mehrfach verzögerte. Von einer Betriebsaufnahme ist man in beiden Ländern noch einige Jahre entfernt. Erfolgreiche Betriebserfahrungen aus einem Endlager für hochradioaktive Abfälle gibt es faktisch nicht. Vielmehr haben viele Länder Erfahrungen mit gescheiterten Endlagerprojekten machen müssen.

Bewertung der Endlagersicherheit

Auf der Grundlage selektiver Ergebnisse von Endlagersicherheitsbewertungen aus Finnland, Schweden und Frankreich dokumentiert das JRC in Teil B 5.2, S. 249ff seines Berichts eine fragmentarische Bewertung der radiologischen Sicherheit geologischer Endlager. Diese Länder verfügen über die technischen und finanziellen Mittel, um eine Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle in geologischen Endlagern durchzuführen. Die Fähigkeiten und die Bedürfnisse kleinerer Staaten, die möglicherweise auf externe Hilfe angewiesen sind, um ihre Endlagerfrage zu lösen, werden nicht erwähnt. Weiterhin beschränkt sich der Bericht auf nur zwei potenzielle Wirtsgesteine (Kristallin - Finnland und Schweden und Tongestein - Frankreich). Andere mögliche Wirtsgesteine wie Salz fehlen. Unvollständig ist der Bericht auch dahingehend, dass, im Gegensatz zur Zwischenlagerung, nur die Zeit nach dem Verschluss des Endlagers betrachtet wird, d. h. die Bewertung der radiologischen Sicherheit für die Betriebsphase wird nicht erörtert. Darüber hinaus umfassen die diskutierten Sicherheitskriterien nur eine Auswahl der in der Regel notwendigen Anforderungen. Andere potenziell anwendbare Anforderungen werden nicht diskutiert.

Mangel an empirischen Daten

Auf Seite 243, Teil B 5 stellt der JRC-Bericht richtigerweise fest: „...there is no empirical evidence generated by a radioactive waste disposal facility that has gone through all the three stages (pre-operational, operational, and post-closure) for the entire timeframe foreseen (up to a hundred thousand years for a deep geological repository)“. Darüber hinaus ist noch anzumerken, dass sich für HAW z. Z. weltweit nur ein Endlager in der Bauphase befindet.

Der JRC-Bericht zeichnet in Teil B 5.2.3 ein vereinfachtes und sehr optimistisches Bild vom Prozess der Implementierung eines nationalen DGR (Deep Geological Repository). Die Beispiele für gescheiterte/gestoppte Programme der Vergangenheit (z.B. in Großbritannien, Deutschland, der Schweiz und den USA) werden nicht erwähnt. Idealerweise sollte in einem solchen Bericht zudem erörtert werden, dass es inhärente Risiken gibt, dass ein Entsorgungsprogramm aufgrund sozialer, technologischer, politischer oder wirtschaftlicher Probleme vollständig scheitern oder sich erheblich verzögern kann.

In Teil B 5 des JRC-Berichts, heißt es: „...the safety of disposal during the post-closure phase is demonstrated by a robust and reliable process which confirms that dose or risk to the public are kept under all circumstances below the required limits“. Da es für HAW noch kein genehmigtes Endlager mit einer Betriebsgenehmigung gibt, ist die Formulierung “is” hier nicht korrekt. Die entsprechenden Bewertungen im Kontext eines Safety Case befinden sich derzeit bei den weiter voran geschrittenen HAW-Endlagerprojekten (Finnland, Schweden und Frankreich) noch in verschiedenen Genehmigungsprozessen, abhängig vom nationalen Regelwerk.

Fokus auf Normalbetrieb bei der Endlagerung und Ausblendung von Ungewissheiten

Die Rolle unerwarteter Ereignisse wird im JRC-Bericht eingeschränkt und unvollständig diskutiert. Insbesondere für die Betriebsphase der geologischen Entsorgung zeigt der Bericht keine Konsequenzenanalyse potenzieller Unfälle. Dies ist insofern überraschend, als das bei der Bewertung des Lebenszyklus ein Hauptaspekt ist, ob eine Aktivität Bedrohungen erzeugt, die verhindert / gemindert werden können. Diese Auslassung wird als wichtiges Manko angesehen, da unerwartete Ereignisse per definitionem nicht vermeidbar sind und im Falle ihres Auftretens Unfälle oder Zwischenfälle erhebliche radioaktive Kontaminationen verursachen können (vgl. dazu auch Kapitel 2.1 und 2.2.1).

In Tabelle 3.3.8.3, S. 166 des JRC-Berichts wird die Bedeutung der Auswirkungen der Entsorgung radioaktiver Abfälle auf die Umweltziele gem. der TEG qualitativ bewertet. Dabei wird allen drei radiologischen Auswirkungen (Erzeugung fester radioaktiver Abfälle, Freisetzung gasförmiger Radionuklide und Freisetzung flüssiger Radionuklide) die niedrigste mögliche Bedeutung zugewiesen. Insbesondere in Bezug auf die radioaktive Freisetzung wird angegeben, dass die berechneten Freisetzungen während der Verschlussphase weit unter den zulässigen Grenzwerten liegen („Calculated releases during the closure phase well below authorised limits“). Dies ist eine Aussage, für die im vorliegenden Bericht keine ausreichenden Argumente vorliegen. Die Aussage lässt sowohl den Einfluss der großen inhärenten Ungewissheiten bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit als auch die potenziellen Risiken im Zusammenhang mit Betriebsunfällen außer Acht.

Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen

Ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen wird im JRC-Bericht nicht angemessen thematisiert. So wurde die nicht auszuschließende Möglichkeit eines solchen Ereignisses und damit verbundene radiologische Konsequenzen vor dem Hintergrund der langen erforderlichen Isolationszeiträume der radioaktiven Abfälle weder behandelt, noch bei der Beurteilung der TSC und DNSH-Kriterien entsprechend berücksichtigt. Auf Kapitel 2.2.2 und 2.2.5 dieser Fachstellungnahme wird verwiesen.

Nicht radiologische Auswirkungen

Die Erörterung potenziell schädlicher, nicht radiologischer Auswirkungen der geologischen Endlagerung abgebrannter Brennelemente und HAW (JRC-Bericht, Teil A 3.3.8.6, S. 162f) erfolgt auf der Grundlage einer Auswahl von Ergebnissen aus der schwedischen Umweltverträglichkeitsprüfung. Dabei wird implizit davon ausgegangen, dass dieses Dokument eine Bewertung enthält, die im Allgemeinen und für jede Art von Endlager an jedem Ort (z. B. Klima, Geographie, Biosphäre usw.) repräsentativ ist. Eine Begründung dieser Annahme wird nicht gegeben. Beispielsweise hängen die möglichen Auswirkungen auf die Wasserressourcen auch von den spezifischen Klima-, Landnutzungs- und hydrologischen Bedingungen ab (Öko, 2015). Dies steht im Zusammenhang mit dem bereits weiter oben beschriebenen Problem begrenzter praktischer Erfahrungen in Bezug auf den Betrieb eines geologischen Endlagers.

In Teil B 5, S. 336ff. des JRC-Berichts stellt das JRC einen irreführenden Vergleich zwischen Carbon (Dioxide) Capture and Storage (CCS) und Entsorgung radioaktiver Abfälle an. Der Vergleich zwischen CCS mit der Endlagerung von radioaktivem Material ist jedoch nur bedingt möglich, da von der Tiefenlagerung von CO₂ eine andere Gefährdung ausgeht. Im Übrigen sind die technischen Konzepte beider Entsorgungsformen vollkommen unterschiedlich und gehen jeweils mit sehr spezifischen Anforderungen und Risiken einher. Daher sind Sicherheitsbestimmungen für die beiden Entsorgungen auch unterschiedlich (s. JRC-Bericht, Executive Summary, S. 8, dritter Anstrich).

Barriersystem

Der JRC-Bericht enthält stark vereinfachte Aussagen zur Zuverlässigkeit des Barriersystems, die zu grundlegenden Missverständnissen führen können, da zu ihrer Einordnung ein komplexes Fachwissen notwendig ist. Zum Beispiel heißt es in Teil B 5.2.2, S. 250 des JRC-Berichts lediglich: „Chemical and mechanical interactions between natural and engineered barriers will occur“, während nicht weiter ausgeführt wird, wie diese Wechselwirkungen aussehen werden. In ähnlicher Weise findet sich in der Executive Summary eine vereinfachte und maßgebliche Aussage: „The multi-barrier configuration of the repository prevents radioactive species from reaching the biosphere over the time span required. In the absence of releases of radioactive species to the accessible biosphere,

there is neither radiological pollution nor degradation of healthy ecosystems, including water and marine environments.” Dies ist eine stark vereinfachte und pauschalisierende Beschreibung. Die maximale Ausbreitung von Radionukliden muss auf ein vorher bestimmtes erwartbares Maß begrenzt werden (vgl. § 26 Abs. 2 StandAG). Eine potenzielle Freisetzung, die dieses regulatorische Maß unterschreitet, ist jedoch nicht auszuschließen („Geringfügigkeitskriterium“, § 4 EndlSiAnfV), sondern ist mit Blick auf die zu erwartenden Auswirkungen auf Mensch und Umwelt nach heutigen Maßstäben zu bewerten. Umso wichtiger ist es, dass im Safety Case des Endlagers überzeugend gezeigt wird, dass solche möglichen Freisetzungen unter den gesetzlichen Grenzwerten liegen und damit kein inakzeptables Risiko für zukünftige Generationen darstellen. Ob diese (nationalen) gesetzlichen Grenzwerte auch mit den DNSH-Kriterienkonform sind, wird im JRC-Bericht nicht erörtert.

In Teil A, 3.3.8.5, S. 162 des JRC-Berichts wird eine zu vereinfachende und endgültige Aussage zur langfristigen Zuverlässigkeit des Barrierensystems gemacht: „Long term post-closure safety will be achieved by means of a system of passive barriers...“. Hier werden Aussagen zur Langzeitsicherheit in der Nachverschlussphase ausgeführt, ohne mögliche relevante Entwicklungen, die einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit eines Endlagers haben, zu beschreiben bzw. zu hinterfragen. Hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines Endlagers ist zu bemerken, dass entsprechende Aussagen immer relativ zu den jeweiligen zugrunde gelegten regulatorischen Anforderungen und Rahmenbedingungen zu betrachten sind. Dabei ist zu beachten, dass selbst bei sehr günstigen geologischen Verhältnissen, Ungewissheiten bestehen, die sich nicht ausräumen lassen (NEA, 1995 und 2012).

Radionuklidfreisetzungen

In Bezug auf mögliche Radionuklidfreisetzungen aus dem Endlager in die Biosphäre werden ungenaue Aussagen gemacht. Zum Beispiel: „No radiologically relevant release or impact to the public is expected...“ (JRC-Bericht, Teil A 3.3.8.5, S. 161 - Betriebsphase) oder „and [radionuclides] will never exceed the limit below which they can cause no harm“ (JRC-Bericht, Teil B 5, S. 241 - Phase nach dem Verschluss des Endlagers). In Bezug auf Ersteres ist die Aussage unvollständig und stark vereinfacht - die Risiken, die mit potenziellen Unfällen (z. B. Behälterabsturz, Feuer, Kritikalität) oder Missbrauch des spaltbaren Materials (z. B. Terroranschlag, Diebstahl usw.) verbunden sind, werden nicht bewertet, jedoch als abschließend bewertet dargestellt.. Zudem scheint die Risikobewertung hier aus dem Zusammenhang gerissen, die Schlussfolgerungen fließen jedoch in die Gesamtbewertung ein. Die Argumentation wird zudem auch nicht durch Quellenangaben untermauert.

In Bezug auf Zweiteres gehen die in dem Bericht zitierten nationalen und internationalen Regelwerke bezüglich der Rückwirkungen der Endlagerungstätigkeit durch Endlagerung von HAW nicht von einem „Nullkriterium“ sondern einem „Geringfügigkeitskriterium“ aus. Auch geringere Dosiswerte als die 0,3 mS/y (vgl. z. B. § 99 Abs. 1 StrSchV) können gesundheitliche Schäden hervorrufen. Die Aussage im JRC-Bericht „and will never exceed the limit below which they can cause no harm“ ist daher widersprüchlich. Die Wirkung geringer Strahlendosen wird immer noch diskutiert. Die Argumentation sollte daher etwas vorsichtiger geführt werden. Eine gesundheitliche Schädigung ist so absolut nicht auszuschließen (ICRP, 2013; DoReMi, 2016).

In Teil A, 3.3.8, S. 165 des JRC-Berichts wird eine ungenaue und falsche Aussage gemacht: “The deep geological disposal facility aims at isolating and containing the radioactive waste until its radioactivity decays to harmless levels.” Nach dem regulatorisch relevanten Zeitraum in Schweden (100.000

Jahre) ist der Abfall nach wie vor schädlich (JRC-Bericht, Abbildung 2.4-1). Hier widerspricht der Bericht sich selbst.

Entsorgung radioaktiver Abfälle durch Verdünnung und Ableitung

In Teil B 3, S. 224 des JRC-Berichts heißt es: "For certain types of waste with a low concentration of activity, typically gaseous and liquid effluents the management strategy is its dilution and release to the environment". Der JRC-Bericht befasst sich nicht weiter mit der Thematik und begründet dies wie folgt: „This is carried out under regulatory control following strict procedures ensuring that releases are below authorised limits, and it is outside the scope of this section.“ (JRC-Bericht, Teil B 3, S. 224). Das JRC übersieht, dass dieser Entsorgungsweg z.B. in Deutschland verboten ist. § 61 Abs. 3 StrSchG untersagt die gezielte Verdünnung von radioaktiven Abfällen.

Nachverschlussphase

In Teil A 3.3.8.9, S. 167 des JRC-Berichts heißt es zusammenfassend: "In the light of the above analysis it can be concluded that activities related to the storage & disposal of technological & radioactive waste, as well as spent nuclear fuel do not pose significant harm to human health or to the environment." Diese Aussage wird von den in Teil A 3 des JRC-Berichts (und den folgenden Kapiteln) vorgestellten Diskussionen nicht unterstützt. Die Ergebnisse der in Teil A 3 beschriebenen Analysen werden im folgenden Kapitel (Teil A 4) anhand der Grundprinzipien und Ziele der Taxonomie erörtert. Es wird ausgeführt, dass vor dem Hintergrund einer Analyse der Schluss gezogen werden kann, dass Aktivitäten bezüglich der Lagerung und Endlagerung von konventionellen und radioaktiven Abfällen sowie bestrahlter Brennelemente keine signifikante Gefährdung der menschlichen Gesundheit oder der Umwelt implizieren. Die in der Begründung angesprochene Analyse ist für die Nachverschlussphase von Endlagern nicht erkennbar. Die beispielhafte Ausführung von Vorgehensweisen in verschiedenen Ländern und die Darstellung von allgemeinen Ergebnissen ist hierfür nicht ausreichend, u. a. aufgrund der unterschiedlichen Standortsituationen, spezifischen Rahmenbedingungen wie Abfallspektrum, Endlagerkonzept, Sicherheitskonzept, sowie regulatorischen Anforderungen.

Die genannte Schlussfolgerung lässt sich daher nicht eindeutig nachvollziehen. Darüber hinaus lassen die Anmerkungen zu der nicht auszuschließenden Möglichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens und den damit verbundenen möglichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt sowie weitere Ungewissheiten hinsichtlich der Entwicklung von Endlagern in der Nachverschlussphase eine derart dezidierte Schlussfolgerung nicht zu.

Technische Bewertungskriterien

Die Entwicklung der technischen Bewertungskriterien (TSC) ist nicht abgeschlossen. Im JRC-Bericht wird in Teil A 5.1, S. 190f jedoch argumentiert, als wären diese vollständig, aber die entsprechenden Quellen, auch in Bezug auf internationale Erfahrungen fehlen. Daher ist eine Anwendung der TSC für eine abschließende Bewertung der Taxonomie nicht möglich, zumindest aber problematisch.

Zur Bewertung der Langzeitfolgen der Endlagerung von HAW werden modellhafte Argumentationen und Nachweise aus projektspezifischen Safety Cases verwendet, was soweit dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht. Jedoch werden die damit verbundenen Annahmen und Anforderungen an das System stillschweigend als erfüllt angenommen, obwohl in der Implementierung wie auch in der Langzeitwirkung Ungewissheiten bestehen.

Die TSC werden trotz ihrer zentralen Bedeutung für die Methode nur sehr allgemein gehalten und erfordern weitere Spezifizierung (Beispiel: Dosiskriterien für radiologische Bewertung). Annex 1, Appendix E, Seite 369f. des JRC-Berichts benennt noch weitere Anforderungen an die DNSH-Kriterien, insbesondere Aspekte der Finanzierung. Diese werden im Bericht gar nicht angesprochen. Das ist in der Binnenlogik des JRC-Berichtes stimmig, fehlt jedoch bei einer übergeordneten Diskussion der Nachhaltigkeit.

5.4 Transporte

Der JRC-Bericht geht in seiner Darstellung der Lifecycle-Analysis nicht auf den Aspekt der Transporte ein. Dies wäre für eine abschließende Gesamtdarstellung aller Aspekte der Kernkraft notwendig gewesen.

Alle Transporte radioaktiver Stoffe werden auf Basis international abgestimmter Regelwerke und unter Notwendigkeit einer entsprechenden Genehmigung durchgeführt. Nach dem vom JRC für die DNSH-Kriterien zugrunde gelegten Prüfungsmaßstab (vgl. kritisch dazu Kapitel 2.1 und 2.2 dieser Fachstellungnahme) dürften die DNSH-Kriterien auch insofern unproblematisch sein. Jedoch greift diese verengte Analyse, wie oben bereits mehrfach dargestellt, zu kurz. Beim Transport von radioaktiven Abfällen sind auslegungsüberschreitende Unfälle oder auslegungsüberschreitende sonstige Einwirkungen Dritter zwar sehr unwahrscheinlich, aber nicht vollständig auszuschließen; deswegen können die damit verbundenen Risiken auch durch eine Einhaltung internationaler Regelwerke nicht ausgeschlossen werden.

Hinsichtlich der Forschung und Entwicklung werden eine Reihe von Aussagen und Sachständen im JRC-Bericht ausgeführt, die fachlich nicht nachvollziehbar sind bzw. deren Ableitungen fachlich nicht geteilt werden können. Allerdings lassen sich aus dem Text allgemeine Hinweise ableiten, die durchaus in einem Zusammenhang von Forschung und Entwicklung und der Taxonomie stehen. Auf diese allgemeinen Hinweise sowie die o. g. Aussagen wird im Folgenden Bezug genommen.

Allgemeine Prüfergebnisse

Es gibt im JRC-Bericht nur wenige Querverweise zu Teil B 6 „Forschung und Entwicklung“ und umgekehrt von Teil B 6 zu den anderen Kapiteln des JRC-Berichts (siehe auch Kapitel 2.3.1 dieser Fachstellungnahme). Insbesondere der Bezug zu Teil A ist nicht dargestellt. Eine explizite Verbindung zu der Taxonomie wurde nicht hergestellt bzw. aufgezeigt (vgl. Kapitel 2.1). Ferner reflektiert das JRC nicht, dass der enorme Forschungsaufwand im Bereich Endlagerung die damit verbundenen Ungewissheiten unterstreicht und die Taxonomie-Fähigkeit der Kernenergienutzung in Frage stellt (siehe dazu Kapitel 2.2.3).

Zusammenhang zwischen Zwischenlagerung, Betriebsphase und Nachverschlussphase

Der JRC-Bericht versäumt es auf einen Aspekt einzugehen, der in der Forschung aktuell eine wichtige Rolle spielt: Der Zusammenhang zwischen Zwischenlagerung, Betriebsphase und Nachverschlussphase („Integrated Safety Case“) und die Relevanz des Zusammenhangs für die jeweilige Sicherheit auf der betreffenden Zeitskala (IAEA, 2016a; IAEA 2016b; IGSC, 2008; NEA, 2016; GRS, 2020).

Übertragbarkeit der Funktionalität der Barrieren auf lange Zeiträume

Für die Endlagerung wird in den meisten Sicherheitskonzepten ein Multibarrierenkonzept zugrunde gelegt. Dieses Konzept baut auf eine mehr oder weniger ineinander verschachtelte Anzahl von technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren auf. Die Funktionalität der einzelnen Barrieren muss demonstriert und für die jeweiligen vorgesehenen Zeiträume nachgewiesen werden. Insgesamt ist die Wirksamkeit des Gesamtsystems auch bei Ausfall einer oder mehrerer Einzelbarrieren zu belegen. Insbesondere der Nachweis der Funktionalität der technischen (z. B. Behälter) und geotechnischen Barrieren (z. B. Schachtverschluss) und die Übertragbarkeit auf lange Zeiträume stellt eine enorme Herausforderung dar. Allerdings wird dieser Aspekt bei technischen Barrieren im Vergleich zu geologischen Barrieren, bei denen teilweise Verknüpfungen zu natürlichen Analoga bestehen, die die Barrierenwirksamkeit über sehr lange Zeiträume untermauern, zum Teil kritisch gesehen (AkEnd, 2002; vgl. dazu KOM, 2015).

Umfang des Forschungsprogrammes und Grundlagenforschung

Der im JRC-Bericht ausgewiesene Umfang an Grundlagenforschung benennt ausschließlich Beispiele, die sich auf das Inventar beziehen. Der Aspekt der Grundlagenforschung, der sich mit Wirtsgesteinen beschäftigt, fehlt an dieser Stelle vollständig. Natürlich können hier nicht alle Aspekte der Grundlagenforschung genannt werden. Durch die kurze Darstellung werden deshalb wesentliche Themen nicht oder nur am Rande genannt (wie z. B. zu Ungewissheiten, menschliche Aktivitäten inklusive Human Intrusion und Langzeitdokumentation).

Generell stellt sich die Frage, warum im Teil B 6 des JRC-Berichts zu „Forschung und Entwicklung“ ausschließlich Forschungsprogramme mit Fokus auf Europa behandelt werden. Wenigstens unter Teil B 6.1, S. 277 Einführung hätte man auch eine ausführlichere kritische Würdigung diesbezüglicher außereuropäischer Aktivitäten mit den dortigen Schwerpunktsetzungen erwarten dürfen. Die alleinige namentliche Erwähnung einiger Länder (z. B. JRC-Bericht, Teil B 6.4.2, S. 286 „*Such global partnerships with, e.g. with USA and Japan have been in existence for a long time.*“) ohne jegliche Angabe weiterführender Quellen erscheint nicht ausreichend.

Ungewissheiten

Es werden in Bezug auf den gegenwärtigen Forschungs- und Entwicklungsfokus u. a. Ungewissheiten angesprochen. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass es eine Reihe von Ungewissheiten geben wird, die nicht weiter reduziert bzw. aufgelöst werden können (GRS, 2018). Hier muss frühzeitig Forschung und Entwicklung angesetzt werden, wie man mit diesen Ungewissheiten umgehen will bzw. wie diesen Ungewissheiten Rechnung getragen werden soll (vgl. auch Kapitel 2.2.2 und 2.2.3 dieser Fachstellungnahme).

Forschung und Entwicklung, Stand von Wissenschaft und Technik

An verschiedenen Textpassagen im JRC-Bericht wird deutlich (z. B. JRC-Bericht, Teil B 6.2, S. 278 und Teil B 6.4.1, S. 283), dass nicht konsequent zwischen

- Forschung und Entwicklung
- Stand von Wissenschaft und Technik

unterschieden wird.

Der Stand von W & T ist für die Endlagerung entscheidend, z. B. § 19 Abs. 1 Satz 3 StandAG. Forschung und Entwicklung kann diesen Stand vorantreiben.

P&T und der sogenannte geschlossene Brennstoffkreislauf

Seit langem wird an der Frage geforscht, wie man durch geeignete Verfahren den vorhandenen und entstehenden radioaktiven Abfall in verschiedene Abfallströme auftrennen und durch kernphysikalische Umwandlungen in weniger langlebige Radionuklide überführt. Dieser Ansatz, der als Partitionierung und Transmutation (P&T) bezeichnet wird, bietet nach Auffassung des JRC-Berichts eine Reihe von Vorteilen. Jedoch sind die zugrundeliegenden Technologien nicht vorhanden. Ob und wann eine großtechnische Anwendungsreife vorliegen könnte, ist vollkommen offen. Die Rückstellung der Endlagerung und die Verbringung der Abfälle in oberflächennahe Langzeitlager, solange bis die P&T Technologie eine für die großtechnische Umsetzung entsprechende Entwicklung erfahren hat, wäre eine Voraussetzung hierfür.

Die Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ hat dieses Thema eingehend fachlich diskutiert und kam insgesamt hinsichtlich des Themas Langzeitlagerung an oder nahe der Erdoberfläche zu dem folgenden Schluss (siehe auch Kapitel 5.2 dieser Fachstellungnahme):

„Die Kommission sieht in einer überwachten Dauerlagerung keine realistische Option für den nachweisbar sicheren, langzeitigen Umgang mit radioaktiven Abfällen. Eine aktive Verfolgung einer derartigen Strategie wird von der Kommission daher abgelehnt.“ (KOM, 2016).

Aus jüngster Zeit liegen Ergebnisse zu einem Untersuchungsvorhaben vor, dass sich mit unterschiedlichen Konzepten zur Partitionierung und Transmutation (P&T) von hochradioaktiven Abfällen beschäftigt hat. Das Ergebnis aus dieser Untersuchung zeigt eine Reihe von kritischen Aspekten gegenüber P&T auf, von denen einige im Folgenden beispielhaft aufgeführt werden (Frieß et al., 2021):

- Nach dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik erscheinen P&T-Programme nur für die Behandlung abgebrannter Brennstäbe aus Leistungsreaktoren, aber nicht für bereits verglaste Abfälle praktikabel.
- Ein P&T-Konzept verlangt nach einer Vielzahl von kerntechnischen Anlagen und ihrem langfristigen Betrieb. Sicherheitsrisiken durch den langfristigen Betrieb von kerntechnischen Anlagen in einem P&T-Programm müssten in Kauf genommen werden.
- Die für P&T notwendigen kerntechnischen Anlagen stehen im großtechnischen Maßstab nicht zur Verfügung.
- Viele Jahrzehnte an Forschungs- und Entwicklungsarbeit wären vor der Realisierung eines P&T-Programms notwendig.
- Es ist noch offen, ob der erforderliche technische Entwicklungsstand für eine großtechnische Umsetzung eines P&T-Programms erreicht werden kann.
- Es würde in jedem Fall ein Endlager für hochradioaktive Abfälle gebraucht.
- Es entstünden Proliferationsrisiken durch den langfristigen Betrieb von kerntechnischen Anlagen in einem P&T-Programm.

Aus der Liste an kritischen Merkmalen wird deutlich, dass mit der Forschung zu P&T auch die Möglichkeit verbunden ist, mit der originären Intention bzw. Zielsetzung dieses Ansatzes zu scheitern. Aber auch wenn diese Technologie in Zukunft einmal einsatzfähig wäre, dann resultieren

durchaus andere Risiken, die gegen die Risiken einer Endlagerung ohne Berücksichtigung von P&T abzuwägen wären.

In Bezug auf die Ausnutzung des Brennstoffes wird im JRC-Bericht, Teil 6.3, S. 280, sowie ‚Executive Summary‘, ‚Main Findings‘, S. 12-13, ausgeführt, dass „schnelle Reaktoren“ eine mehrfache Rezyklierung erlauben und am Ende der komplette Brennstoff ausgenutzt wird und ein zunehmend reduzierter Anteil langlebiger Nuklide (meist in Form von Minore Aktinide) im bestrahlten Brennstoff verbleibt. Hierzu ist anzumerken, dass bisher noch keine Minore Aktinide dem Brennstoff zugegeben werden. Insofern handelt es sich hier lediglich um eine Prognose. Unklar ist, bis zu welchem Umfang man Minore Aktinide dem Brennstoff zugeben können wird, da sich diese negativ auf die Sicherheitseigenschaften des Brennstoffs (Kirchner et al., 2015) auswirken können.

Darüber hinaus wird im JRC-Bericht in der Abbildung 6.3-1, S. 281 des JRC-Berichts der Beitrag von Minoren Aktiniden zur langfristigen Radiotoxizität bestrahlter Brennelemente dargestellt. Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Transmutation von Plutonium und Americium zu einer deutlichen Reduktion der Dosis führen würde. Nicht in dem Diagramm dargestellt sind die Spaltprodukte, die zumindest bei thermischen Reaktoren anfangs die Strahlung dominieren (Schwenk-Ferrero, 2013). Überdies zeigten Untersuchungen aus der Schweiz im Tongestein, dass langlebige Spaltprodukte im Tongestein eine recht hohe Mobilität im Erdreich haben und daher den größten Teil der in die Biosphäre freigesetzten Dosis ausmachen (NAGRA, 2002, S. 203).

Weiterhin wird im JRC-Bericht aufgeführt, dass ein geschlossener Kernbrennstoffkreislauf den Vorteil einer erheblichen Reduzierung des Platzbedarfs für ein geologisches Endlager für HLW bietet. Hier ist zu ergänzen, dass neben dem Volumen die Nachzerfallswärme zum Zeitpunkt der Einlagerung relevant für die Größe des Endlagers wäre (KOM, 2016, S. 227). Auch würden zusätzliche schwach- und mittelradioaktive Abfälle erzeugt werden, die das Endlagervolumen erhöhen würden.

6 Künftige und weitere Kriterien der Taxonomie-Verordnung – weitere Nachhaltigkeitsziele und Mindeststandards

Der JRC-Bericht thematisiert im Zusammenhang mit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle neben den ökologischen Kriterien weitere für eine nachhaltige Entwicklung wichtige Aspekte. Insbesondere hebt der JRC-Bericht die Berücksichtigung künftiger Generationen (JRC-Bericht, Teil B 5.2.3.3, S. 258) und die Bedeutung partizipativer Entscheidungsfindung (JRC-Bericht, Teil B 5.2.3.1, S. 254) bei der Endlagersuche hervor. Der JRC-Bericht formuliert beide Aspekte als wichtige Anforderungen an die Endlagersuche. Die beiden Anforderungen „Berücksichtigung künftiger Generationen“ und „partizipative Entscheidungsfindung“ werden im JRC-Bericht aber nicht tiefer bezüglich z.B. der mit diesen Anforderungen verbundenen Herausforderungen bei der Suche nach einem Endlager für radioaktive Abfälle betrachtet. Der Bericht betont, dass es weltweit bisher kein Endlager für hochradioaktive Abfälle gibt (JRC-Bericht, Teil A 1.1.1, S.17), lässt aber offen ob es dabei einen Zusammenhang zu den Herausforderungen „Berücksichtigung zukünftiger Generationen“ und „partizipative Entscheidungsfindung“ gibt.

Das JRC hatte möglicherweise nicht den Auftrag, über die Prüfung der DNSH-Kriterien in Bezug auf die Umweltziele hinaus eine Prüfung der Nachhaltigkeit vorzunehmen. Hinzuweisen ist jedoch darauf, dass die TEG durchaus die Möglichkeit sieht, den Aspekt intergenerationelle Risiken in die Entwicklung von TSC bzgl. des DNSH-Kriterien zu den Umweltzielen einzubeziehen (TEG 2020b, S. 33). Auf die Vorgehensweise der TEG nimmt der JRC-Bericht auch Bezug (JRC-Bericht, Teil A 1.3.2.4, S.

23). Eine vertiefte Betrachtung der beiden Aspekte „Berücksichtigung künftiger Generationen“ und „partizipative Entscheidungsfindung“ erfolgt im JRC-Bericht aber nicht. Diese Betrachtung beider Aspekte ist jedoch wichtig, um die Nachhaltigkeit der Endlagerung radioaktiver Abfälle zu bewerten. Beide Aspekte stellen nach der Agenda 2030 der Vereinten Nationen eigenständige Nachhaltigkeitsziele dar (UN, 2015). Die Taxonomie-Verordnung, auf dessen Basis das JRC seine Analyse durchführt, betrachtet die Agenda 2030 der Vereinten Nationen als Ziel der Europäischen Union dieses Verständnisses von Nachhaltigkeit umzusetzen und will zukünftig auch über die ökologischen Kriterien hinaus weitere Kriterien für Nachhaltigkeit aus der Agenda 2030 in die Taxonomie Verordnung einbeziehen (näher dazu Kapitel 6.1 dieser Fachstellungnahme). Die Notwendigkeit, technologische Risiken auch mit Blick auf künftige Generationen zu bewerten, zeigt auch der aktuelle Beschluss des Bundesverfassungsgerichts zum Klimaschutz (BVerfG, Beschluss vom 24.3.2021, Az. 1 BvR 2656/18, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20, 1 BvR 288/20, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20).

Auch das in diesem Kapitel fokussierte Thema des über Generationen andauernden langfristigen Informations- und Wissenserhalts zur Endlagerung berührt die Belange nachfolgender Generationen und muss aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten betrachtet werden (dazu Kapitel 6.2).

Unabhängig von der Endlagerung fordern das Problem der Proliferation (dazu Kapitel 6.3), welches im JRC-Bericht nur sehr rudimentär in Bezug auf die Wiederaufarbeitung benannt ist, und der Uranabbau (dazu Kapitel 6.4) eine eigene Betrachtung der Themen intergenerationelle Gerechtigkeit und Beteiligung im Hinblick auf die Nachhaltigkeit der Kernenergienutzung.

Auch bei schweren Kernkraftwerksunfällen, bei denen große Mengen radioaktiver Stoffe in die Umwelt freigesetzt werden, ist die Generationengerechtigkeit ein wesentlicher Aspekt der Nachhaltigkeit. Das Beispiel Tschernobyl zeigt, dass die Bewältigung der Unfallfolgen auch zulasten künftiger Generationen geht – von den eingeschränkten oder fehlenden Nutzungsmöglichkeiten in den betroffenen Gebieten bis hin zum geplanten Rückbau des havarierten Reaktorblocks und der Endlagerung des geborgenen Kernbrennstoffs.

6.1 „Berücksichtigung künftiger Generationen“ und „partizipative Entscheidungsfindung“ bei der Endlagerung

Die Taxonomie-Verordnung (Erwägungsgrund 2) bezieht sich in ihrem Nachhaltigkeitsverständnis auf den UN-Ansatz der Agenda 2030. Die beiden genannten Nachhaltigkeitsziele „Berücksichtigung künftiger Generationen“ und „partizipative Entscheidungsfindung“ sind zwar nicht in der EU Taxonomie aufgeführt. Art. 26 Abs. 2 Buchst. b Taxonomie-Verordnung nimmt jedoch bereits in den Blick, dass der Anwendungsbereich der Taxonomie-Verordnung künftig ausgedehnt wird. So sollen künftig weitere Nachhaltigkeitsziele mit einbezogen werden.

Die Berücksichtigung künftiger Generationen und eine partizipative Entscheidungsfindung in einer Gesellschaft stellen in der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (UN, 2015) eigene Nachhaltigkeitsziele dar.

- Das Ziel Nr. 7 der Agenda 2030 formuliert auf Basis ihres Ziels von sozialer Nachhaltigkeit den Zugang für alle (d.h. auch zukünftiger Generationen) u.a. zu bezahlbarer Energieversorgung und setzt dabei auf erneuerbare Energien und Energieeffizienz.
- Das Ziel Nr. 16 der Agenda 2030 formuliert die Bedeutung einer friedlichen und inklusiven Gesellschaft für eine nachhaltige Entwicklung. Dazu gehören u.a. leistungsfähige,

rechenschaftspflichtige und transparente Institutionen und die Notwendigkeit, wie es in einem Unterziel formuliert ist, dafür zu sorgen, dass Entscheidungsfindung auf allen Ebenen bedarfsorientiert, inklusiv, partizipatorisch und repräsentativ erfolgt.

Diese beiden Nachhaltigkeitsziele werden im JRC-Bericht nicht ausreichend im Hinblick auf die nukleare Entsorgung betrachtet, sind für die Bewertung der grundsätzlichen Fragestellung von Nachhaltigkeit, die auch in der Taxonomie-Verordnung angelegt ist, von Bedeutung.

Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten und zukünftiger Generationen im JRC-Bericht

Die Entwicklung und Umsetzung eines geologischen Entsorgungsprogramms/ Endlagersystems dauert Jahrzehnte und ist mit nur schwer kalkulierbaren Kosten verbunden. Die Überwachung nach der Schließung des Endlagers wird zusätzlich für mindestens weitere 100 Jahre fortgesetzt. Beispielsweise rechnet Frankreich alleine mit einer Betriebszeit des Endlagers von > 100 Jahren. In dieser langen Zeit müssen sich nachfolgende Generationen mit Problemen befassen, die von ihren Vorgänger-Generationen verursacht wurden.

Das Risiko der langfristigen und schlecht kalkulierbaren finanziellen Belastungen und Risiken (wie das Beispiel Schachtanlage Asse II zeigt), welche die geologische Entsorgung für mehrere Generationen mit sich bringt, wird im JRC-Bericht nicht ausreichend berücksichtigt. Der JRC-Bericht formuliert selbst die Anforderung, dass die unangemessene Belastung zukünftiger Generationen zu vermeiden ist (z. B. JRC-Bericht, Teil B 1.1, S. 201). Die geologische Endlagerung bleibt jedoch über einen langen Zeitraum von den Fragen abhängig, ob diese für das Problem nicht verantwortlichen Generationen z.B. im Fall von Kostenrisiken und damit verbundenen zusätzlichen Finanzierungsbedarfen bereit sein werden, sich an den Kosten zu beteiligen, und was z. B. passiert, wenn die Bereitschaft oder auch die Möglichkeit dazu nicht mehr besteht. Wie sollten Ausgaben in Krisenzeiten (z. B. einer globalen Gesundheits- oder Umweltkrise) priorisiert werden? Was ist, wenn die Finanzierung unterbrochen wird? In Anbetracht der Anforderung, die z.B. § 1 Abs. 2 S. 3 StandAG formuliert („Minimierung des Ressourcenbedarfs, der Kosten und der Risikobelastung, die an zukünftige Generationen weitergegeben werden“), kann davon ausgegangen werden, dass die mit der geologischen Endlagerung verbundenen Herausforderungen bereits jetzt gegen das Prinzip der Gleichheit zwischen den Generationen verstoßen haben. Insbesondere auch die Entwicklungs- und Implementierungskosten eines geologischen Endlagers sind im Allgemeinen über lange Zeiträume schwer vorhersehbar (BMU, 2015).

Der Bericht lässt eine vertiefte Analyse dieses Aspekts vermissen und zeichnet unter Ausblendung negativer Konsequenzen der Atomenergienutzung ein verzerrtes Bild insbesondere mit Blick auf den Aspekt Nachhaltigkeit und Generationengerechtigkeit.

Berücksichtigung der partizipativen Entscheidungsfindung in Gesellschaften im JRC-Bericht

Die Einbeziehung von Stakeholdern wird im JRC-Bericht sehr stark vereinfacht und sehr optimistisch beschrieben. Beispielsweise werden NGOs bei der Beschreibung der Interessengruppen und ihrer Rolle bei der Entwicklung eines geologischen Endlagerprogramms nicht berücksichtigt (JRC-Bericht, Teil B 5.2.3.1, S. 253-254). In Teil B 5.2.3.1, S. 254 des JRC-Berichts wird ausgeblendet, dass es möglich sein kann, dass es keinen Konsens der Stakeholder gibt. Die Problematik der Standortsuche wird dadurch ebenfalls vereinfacht und einseitig dargestellt. Auch steht an keiner Stelle zur Diskussion, dass – wo kein gesellschaftlicher Konsens zur Nutzung der Kernenergie besteht – diese Nutzung selbst bereits ein Blockadefaktor für die Lösung der Endlagerfrage darstellen kann - so zeigt es jedenfalls die Erfahrung in Deutschland. Der Atomausstieg und damit die Befriedung eines

jahrzehntelangen gesellschaftspolitischen Konfliktfeldes, war ein zentraler Faktor dafür, dass die Diskussion nach einem Standortauswahlverfahren wieder aufgenommen wurde und in einem breiten Konsens mündete.

In Bezug auf den Anspruch partizipativer Entscheidungsfindung in einer Gesellschaft benennt der Bericht verschiedene Anforderungen an die Endlagersuche (Rollenklarheit der Akteure d.h. insbesondere Politik, Aufsicht und Betreiber, transparente und vertrauensvolle Einbindung aller relevanten Stakeholder durch offenen Dialog, breiter Konsens aller Stakeholder und der Öffentlichkeit etc.). Im Bericht werden diese Anforderungen an einen partizipativen Prozess jedoch an keiner Stelle weiter konkretisiert und in Hinblick auf die Endlagerung analysiert.

Auch in vorgeschalteten Prozessschritten wie dem Uranabbau und der hiermit zusammenhängenden Betroffenheit indigener Völker (vgl. hierzu Kapitel 6.4 dieser Fachstellungnahme) wären partizipative Prozesse notwendig. Auch Artikel 18 der Taxonomie-Verordnung zum Mindestschutz (in diesem Fall der Menschenrechte) müsste in Bezug auf den Uranabbau stärker fokussiert werden.

Auch zu den drei Länderbeispielen Finnland, Schweden und Frankreich, die im Verfahren der Endlagersuche nach Darstellung des Berichts weit fortgeschritten sind, gibt es keine Bewertung/Einschätzung, ob die hier formulierten Anforderungen an die partizipative Entscheidungsfindung bei der Endlagersuche von diesen drei Ländern erfüllt werden. Dies wäre aber wichtig, um den Fortschritt dieser drei Länder auch in Hinblick auf die Frage der partizipativen Entscheidungsfindung bewerten zu können.

Diese Lücke im Bericht wird insbesondere dadurch unterstrichen, dass die wissenschaftlich-technischen Anforderungen an ein Endlager durchaus im Detail dargestellt und bewertet werden.

Fazit

Insgesamt kann konstatiert werden, dass im JRC-Bericht die Betrachtung der Nachhaltigkeit nicht vollständig ist, sondern im Hinblick auf die Mindestziele und weitere Nachhaltigkeitsziele zu vervollständigen wäre. Der breite Nachhaltigkeitsansatz der Vereinten Nationen wird nicht aufgegriffen.

Diesen breiten Ansatz legt die Taxonomie-Verordnung zugrunde. Es ist deshalb sinnvoll, die Kernenergienutzung insgesamt und die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Konkreten auch in Hinblick auf andere Nachhaltigkeitsziele wie die Berücksichtigung zukünftiger Generationen und die partizipative Einbindung in Gesellschaften bereits jetzt zu analysieren.

6.2 Langfristiger Informations- und Wissenserhalt zur Endlagerung

Langzeitdokumentation bzw. langfristiger Informations- und Wissenserhalt wird im JRC-Bericht nur einmal als Zitat aus Artikel 17 der Joint Convention (JRC-Bericht, Teil B 1.2, S. 206) genannt sowie einmal rudimentär in Teil B 5.2.3.3, S. 259f erwähnt. Dies wird seiner Bedeutung im Hinblick auf künftige Generationen nicht gerecht (siehe dazu auch Kapitel 2.1 und 6.1 dieser Fachstellungnahme).

Bis in die 1970er Jahre ist der Ansatz verfolgt worden, mit technischen Mitteln passiv zu verhindern, dass unbeabsichtigt in ein Endlager radioaktiver Abfälle nach Verschluss eingedrungen und damit dessen Integrität und Schutzwirkung beschädigt wird. In den vergangenen Jahrzehnten hat sich die Ansicht aber mehr und mehr weiterentwickelt, und heute lässt sich der internationale Diskussionsstand so zusammenfassen, dass durch langfristigen Informations- und Wissenserhalt über

das Endlager (in ganz unterschiedlichen Formaten und Detailtiefen) nachfolgenden Generationen die Grundvoraussetzungen mitgegeben werden sollen, das Risiko eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens (Inadvertent Human Intrusion) zu reduzieren sowie eigenständig über den weiteren Umgang mit den radioaktiven Abfällen zu entscheiden. Zum Informations- und Wissenserhalt gehört auch die seit den 1980er Jahren vor allem in Deutschland unter dem Begriff „Atomsemiotik“ beforschte Frage der Nutzung von Zeichen und Symbolen zur Übermittlung von Informationen über sehr lange Zeiträume. Ebenso zu dieser Thematik gehören die international diskutierte Möglichkeiten der Markierung von Endlagern und das Für und Wider der verschiedenen diskutierten Speichermedien.

Langfristiger Informations- und Wissenserhalt ist ein wichtiger Ergänzungsbaustein im Hinblick auf die langfristige Sicherheit eines Endlagers (ICRP, 2013) und erfordert bereits in der Bau- und der Betriebsphase ein profundes Informationsmanagement. In der sog. RK&M-Initiative („Records, Knowledge and Memory“) der OECD/NEA wurde ein internationales Verständnis dafür entwickelt, wie im Hinblick auf zukünftige Generationen ein langfristiger Informations- und Wissenserhalt aussehen und bewerkstelligt werden könnte. Im Abschlussbericht der Initiative (OECD, 2019) wird u.a. ein Werkzeugkasten von 35 „Mechanismen“ zum Informationserhalt vorgestellt – darunter bekannte Konzepte wie Markierungen und Archive, aber auch neue Konzepte wie der SER (Set of Essential Records) und das KIF (Key Information File) – mit deren Hilfe im nationalen und Standort-spezifischen Kontext eine umfassende Strategie entwickelt werden kann. Die OECD/NEA empfiehlt, Vorbereitungen für die Aufbewahrung von Informationen und Aufzeichnungen sowie für den langfristigen Wissenserhalt vorzunehmen, solange die Wichtigkeit des langfristigen Umgangs mit den erzeugten radioaktiven Abfällen anerkannt ist und damit auch die für diesen Zweck notwendigen Finanzmittel verfügbar sind (OECD, 2014). Anforderungen wie diese werden im JRC-Bericht nicht reflektiert.

6.3 Proliferation

Der JRC-Bericht thematisiert das Risiko der Proliferation - also der Weiterverbreitung bzw. die Weitergabe von spaltbarem Material, Massenvernichtungswaffen, ihren Bauplänen oder Trägersystemen - im Zusammenhang mit der zivilen Nutzung der Kernkraft nur sehr verkürzt. Diese Analyse reicht nicht aus, um Proliferation im Hinblick auf die DNSH-Kriterien bzgl. der Umweltziele zu würdigen, da sie ein erhebliches Risiko für praktisch alle Nachhaltigkeitsziele darstellt.

Die militärische und zivile Anwendung der Kernenergie sind historisch eng miteinander verknüpft. Die Technologien zu ihrer jeweiligen Nutzung sind oftmals Dual-Use-Güter, können also im Prinzip sowohl für zivile als auch militärische Zwecke eingesetzt werden. Im Zuge der Nutzung der Kernenergie und mit ihr verbundenen Brennstoffver- und Entsorgung ist daher ein aufwendiges Netz internationaler Kontrollen geschaffen worden, um das Risiko des militärischen Missbrauchs durch staatliche oder nicht-staatliche Akteure zu minimieren. Dies gilt insbesondere für spaltbares Material wie Uran-235 und Plutonium-239, das Anwendung in der Kernenergieerzeugung findet bzw. in Leistungsreaktoren erzeugt wird. Daneben gehen auch von anderen radioaktiven Stoffen durch Entwendung und missbräuchlichen Einsatz erhebliche Gefahren aus („schmutzige Bombe“).

Insbesondere die Kernbrennstoffherstellung (Urananreicherung) und die Wiederaufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe sind Prozesse, die für die Proliferation von besonderer Bedeutung sind: Die Technologien zur Urananreicherung können mit Modifikationen zur Erzeugung von hochangereichertem Uran zum Bau einer Nuklearwaffe verwendet werden. Bei der

Wiederaufarbeitung wird Plutonium separiert, das für Kernwaffen eingesetzt werden kann. Auch wenn der Plutoniumvektor, der in Leistungsreaktoren erzeugt wird, aus physikalischer Sicht nicht die optimalen Eigenschaften für eine militärische Nutzung aufweist, ist es grundsätzlich zum Waffenbau geeignet (Mark, 1993; US DoE, 1994).

Die Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung geht daher mit spezifischen Risiken der Proliferation einher. Da Nuklearwaffen ein in vielerlei Hinsicht singuläres Zerstörungspotential haben (Eisenbart, 2012), sollte die Frage der Nachhaltigkeit dieser Energieerzeugungsform diesen Aspekt nicht außer Acht lassen.

Die Ethikkommission „Sichere Energieversorgung“ der Bundesregierung hat hierzu 2011 festgehalten: „Die Proliferation [...], ist ein weitgehend ungelöstes Problem der Nutzung der Kernenergie. Durch die Vielzahl von Reaktoren und die Menge des spaltbaren Materials hat sich die Gefahr des kriminellen oder gar terroristischen Missbrauches vervielfacht. Völkerrechtliche Versuche, die Proliferation einzudämmen und zu kontrollieren, waren bisher nur begrenzt wirksam. Die Proliferation hat sich bisher als nicht wirksam zu regeln erwiesen. Es ist davon auszugehen, dass eine erfolgreiche und vollständige Vermeidung der Verbreitung von spaltbarem Material nur dann gelingen kann, wenn die Quellen letztlich selbst geschlossen werden und durch andere Energieträger ersetzt werden.“ (Ethik-Kommission, 2011).

6.4 Uranabbau - bergbauspezifischen Anforderungen an nachhaltigen Bergbau

Der Begriff der Nachhaltigkeit, der eigentlich aus der Forstwirtschaft kommt und sich daher auf den nachwachsenden Rohstoff Holz bezieht, wird mittlerweile auch im Bergbau diskutiert, obwohl hier Bodenschätze abgebaut werden, die nicht nachwachsen können. Angesichts dieser Tatsache muss Nachhaltigkeit im Bergbau anders definiert werden. Die Diskussion darüber, was nachhaltiger oder grüner Bergbau ist, wird aktuell noch geführt (z.B. Gorman & Dzombak, 2018; Lahiry, 2017; Tyson, 2020). Gorman & Dzombak (2018) fokussieren sich auf die Notwendigkeit, die Nachhaltigkeit über den gesamten Nutzungskreislauf einer Bergbauoperation zu betrachten und bereits existierende Umweltregeln für Nachhaltigkeit anzuwenden. Das Taxonomie-Umweltziel Nr. 4 „Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft, Abfallvermeidung und Recycling“ klingt hier an. Lahiry (2017) fordert eine starke Aufsicht durch Regierungsbehörden, um Nachhaltigkeit und verlässliche Umweltstandards durchzusetzen. Tyson (2020) betont, dass eine bergbauspezifische Form von Nachhaltigkeit erreicht werden kann, wenn alle Stakeholder gleichberechtigt und fair in den Definitionsprozess von Nachhaltigkeit (und ihrer Umsetzung) einbezogen werden.

Eine echte Auseinandersetzung mit dem Begriff „nachhaltiger Bergbau“ findet im JRC-Bericht nicht statt (vgl. insbesondere JRC-Bericht Teil A 3.3.1.4, S. 76 unten). Ob die Diskussion über nachhaltigen Bergbau Rückwirkungen auf die Prüfung der Umweltauswirkungen des Uranabbaus hat, wird nicht geprüft. Jedenfalls hat sie Bedeutung in Bezug auf andere Nachhaltigkeitsziele bzw. die Mindeststandards nach Art. 18 Taxonomie-VO (vgl. auch BMK, 2020, S. 22).

Im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit müssten auch alle Akteure im Abbau- und Aufbereitungsprozess des Uranerzes benannt werden. Nicht erwähnt wird im Bericht beispielsweise der Einfluss auf die indigenen Völker, auf deren Land sich die meisten Uranminen befinden. Die Rechte dieser Menschen auf gerechte Teilhabe an allen Ressourcen (von sauberem Wasser über eine vernünftige Gesundheitsversorgung bis hin zur Eigentumsfrage am Rohstoff Uran) sind nicht

berücksichtigt, müssten aber aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten in einem umfassenden Sinn bez. der Taxonomie ebenfalls berücksichtigt werden.

Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
AkEnd	Arbeitskreis Endlagerung
ALARA	As low as reasonably achievable
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUB	Bundesministerium für Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CCPNM	Convention on the Physical Protection of Nuclear Material
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSS	Carbon Capture & Storage
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGR	Deep Geological Repository
DNSH	Do not significant harm
EU	Europäische Union
EURAD	European Joint Programme on Radioactive Waste Management
Gen I, II, III	Generationen der Kernkraftwerke
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
HI	Human Intrusion
HLW	High-level waste
HAW	High Active Waste
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ILW	Intermediate-level waste
INRAG	International Risk Assessment Group

ISL	In situ leaching
JRC	Joint Research Centre
KKW	Kernkraftwerke
KOM	EU-Kommission
kWh	Kilowattstunde
LCA	Life Cycle Analysis
LLW	Low-level waste
MTO	Mensch-Technik-Organisation
MWe	Megawatt elektrisch
NEA	Nuclear Energy Agency
NGO	Non-Governmental Organisation
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OECD-NEA	Organisation for Economic Co-operation and Development – Nuclear Energy Agency
P&T	Partitioning und Transmutation
SDAG Wismut	Sowjetisch-Deutsche Aktiengesellschaft Wismut
SEWD	Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter
SMA	schwach- und mittelradioaktive Abfälle
SMR	Small Modular Reactors
StandAG	Standortauswahlgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TEG	Technical Expert Group on Sustainable Finance
TSC	Technical Screening Criteria
TWh	Terrawattstunde
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung

VLLW	Very low level waste
W&T	Wissenschaft und Technik
WAA	Wiederaufarbeitungsanlage
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association

Literatur/ Quellen

- Abdelouas (2006) Abdelouas, A. (2006): Uranium mill tailings: geochemistry, mineralogy, and environmental impact. *Elements* 2.6 (2006): pp. 335-341.
- AkEnd (2002) Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd, Köln, 2002.
- Akleyev et al. (2017) Akleyev, A.V., Krestiniana, L.Yu., Degteva, M.O. und Tolstykh, E.I. (2017): Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957 (the 'Kyshtym Accident'), *Journal of Radiological Protection*, 37, S. R19-R42, URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6498/aa7f8d/pdf>, letzter Zugriff: 06.05.2021.
- Andel, Pribán (1996) Andel, P., Pribán, V. (1996): Environmental restoration of uranium mines and mills in the Czech Republic. In: *Planning for environmental restoration of radioactively contaminated sites in central and eastern Europe, Vol.1: Identification and characterization of contaminated sites*, IAEA- TECDOC-865, S. 113-135.
- Arnold (2014) Arnold, C. (2014): Once Upon a Mine: The Legacy of Uranium on the Navajo Nation. *Environ Health Perspective*, 122 (2): A44–A49. doi: 10.1289/ehp.122-A44.
- ASN (2020) Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) (2020): Rapport de L'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2019, Mai 2020; URL: <https://www.asn.fr/Informer/Publications/Rapports-de-l-ASN/La-surete-nucleaire-et-la-radioprotection-en-France-en-2019>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Ashley et al. (2017) Ashley, S. F., Vaughan, G. J., Nuttall, W. J., Thomas, P. J. und Higgins, N. A. (2017): Predicting the cost of the consequences of a large nuclear accident in the UK. *Process Safety and Environmental Protection*, 112, pp. 96-113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.032>.
- BASE (2019a) Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) (2019): *Unsere Forschungsstrategie*, Berlin.

- BASE (2019b) Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) (2019): Unsere Forschungsagenda, Berlin.
- BASE (2021) Pistner, C., Englert, M., Küppers, C., von Hirschhausen, C., Wealer, B., Steigerwald, B. und Donderer, R. (2021): Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors), Wissenschaftliches Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), März 2021, urn:nbn:de:0221-2021030826028; URL: <https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/berichte/kt/gutachten-small-modular-reactors.html>, letzter Zugriff: 25.05.2021.
- BfS (2005) Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2005): Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Salzgitter, August 2005.
- BfS (2012) Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2012): Endbericht zum Vorhaben FKZ: 3609S50002; Vergleichende Betrachtung der probabilistischen / stochastischen und deterministischen Modellierung von Expositionen im Hinblick auf die Belastbarkeit des Modellergebnisses und die Anforderungen an die Qualität der Eingangsdaten; BS-Projekt-Nr. 0903-01 (2012), Salzgitter.
- BfS (2021): Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2021): Grenzwerte im Strahlenschutz, URL: https://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/grenzwerte/grenzwerte_node.html, letzter Zugriff: 30.04.21.
- BMK (2020) Stagl, S. (2020): Die Taxonomie-Verordnung und Kernenergie unter Berücksichtigung der DNSH-Kriterien: eine Literaturstudie, im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), 2020, GZ 2020-0.417.529
- BMU (2012) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2012): Grundsatzpapier zum Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter nach § 7 Abs. 2 Nr. 5 bzw. § 6 Abs. 2 Nr. 4 AtG, August 2012.
- BMU (2015) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2015): Report on the cost and financing of the disposal of spent fuel and radioactive waste, August 2015.
- BMU (2020) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020): Report of the Federal Government for

the Seventh Review Meeting in May 2021 on the fulfilment of the obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), August 2020.

- BMUB (2015) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2015): Änderung der Bekanntmachung der Interpretation zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerken vom 22. November 2012 vom 03. März 2015. In: BAnz, AT 30.03.2015 B3.
- Bockisch et al. (2009) Bockisch, A., Gründwald, F., Kotzerke, J. (2009): Radionuklidengpass: Ursachen und Lehren, Nuklearmedizin 2009; 48:55-57.
- BOKU (2021) Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien (2021): Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle, Vorhaben 4720F50501, Wissenschaftliches Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), urn:nbn:de:0221-2021030826033, März 2021.
- Bromet et al. (2007) Bromet EJ, Havenaar JM. (2007): Psychological and perceived health effects of the Chernobyl disaster: a 20-year review. Health Phys. 2007; 93:516-521.
- Brugge et al. (2007) Brugge, D.; de Lemos, J.L.; Bui, C. (2007): The Sequoyah Corporation Fuels Release and the Church Rock Spill: Unpublicized Nuclear Releases in American Indian Communities. American Journal of Public Health. 97 (9): 1595–1600. doi:10.2105/AJPH.2006.103044.
- BSU (2015) Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung (BSU) (2015): Schwere Seeunfall, Brand auf dem ConRo-Frachtschiff ATLANTIC CARTIER am 1. Mai 2013 im Hamburger Hafen, Untersuchungsbericht 99/13, URL: http://www.bsu-bund.de/SharedDocs/pdf/DE/Unfallberichte/2015/UBericht_99_13.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff: 06.05.2021.
- BUND (2020) BUND (2020): Aktuelle Probleme und Gefahren bei deutschen Zwischenlagern für hoch-radioaktive Abfälle, Studie von Diplom-Physikerin Oda Becker im Auftrag des BUND, September 2020.
- Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg (2013) Schriftliche Kleine Anfrage, Betr.: Auch Hexafluorid und Munition unter den Gefahrstoffen auf der brennenden Atlantic Cartier.

- Bürgerschaft der Freien und Hansestadt Hamburg, 20. Wahlperiode, Drucksache 20/8078 vom 28.05.2013, URL: https://www.buergerschaft-hh.de/parldok/dokument/40796/brand_auf_der_atlantic_cartier.pdf, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Capros et al. (2018) Capros, P., Kannavou, M., Evangelopoulou, S., Petropoulos, A., Siskos P., Tasios, N., Zazias, G. und DeVita, A. (2018): Outlook of the EU energy system up to 2050: The case of scenarios prepared for European Commission's "clean energy for all Europeans" package using the PRIMES model, Energy Strategy Reviews, Volume 22, S. 255-263, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211467X18300907>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Charlier (2019) Chalier, F. (2019): Internationale Endlagerprojekte im Vergleich, Nukleare Entsorgung und Techniktransfer (NET)In: Mining Report Glückauf 155 (2019) No. 5, 2019, Aachen.
- CLEW (2021) Clean Energy Wire (2021): Journalism for the energy transition. URL: www.cleanenergywire.org, letzter Zugriff: 04.05.2021.
- DAEF (2016) Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF) (2016): Kurzstellungnahme zur Veröffentlichung „Deformation-assisted fluid percolation in rock salt“ (2016). In: Science, 30. November 2015.
- Deutscher Bundestag (1990) Deutscher Bundestag (1990): 11. Wahlperiode, Drucksache 11/7537, Wiederaufbereitung deutscher atomarer Abfälle im Ausland, Antwort der Bundesregierung auf die Große Anfrage des Abgeordneten Dr. Daniels (Regensburg) und der Fraktion DIE GRÜNEN, 04.07.1990. URL: <http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/11/075/1107537.pdf>, letzter Zugriff: 06.05.2021.
- Deutscher Bundestag (2017) Deutscher Bundestag (2017): 18. Wahlperiode, Drucksache 18/11398, Gesetzesentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, 07.03.2017. URL: <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/113/1811398.pdf>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- DFG (2019) Deutsche Forschungsgemeinschaft (2019): Guidelines for Safeguarding Good Research Practice. Code of Conduct.

- September 2019. URL: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3923602>, ,
 letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Diehl (2010) Diehl, P. (2010): Atomtransporte: Vom Yellow Cake bis zum Brennelement. URL: <https://www.wise-uranium.org/pdf/etpd10.pdf>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- DIIS (2021) Danish Institute for International Studies (DIIS); Global Governance. URL: <https://www.diis.dk/en/projects/governing-uranium>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- DIIS (2015) Danish Institute for International Studies (DIIS) (2015) (Vestergaard, C., 2015): Governing uranium globally. DIIS Report 2015:09.
- DoReMi (2016) DoReMi (2016): Low Dose Research towards Multidisciplinary Integration. Final Publishable Summary Report (1 January 2010 – 31 December 2015), März 2016.
- DTU (2009) Danmarks Tekniske Universitet (2009): Acceptance criteria in Denmark and the EU; Nijs Jan Duijm; Danmarks Tekniske Universitet Institut for Planlægning Innovation og Ledelse; Environmental Project No. 1269 (2009).
- Eisenbart (2012) Eisenbart, C. (2012): Die Singuläre Waffe. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- ESCIS (1996) Einführung in die Risikoanalyse Systematik und Methoden; Expertenkommission für Sicherheit in der Chemischen Industrie der Schweiz (ESCIS) (1996-03). URL:<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000354635>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Ethikkommission (2011) Ethikkommission (2011): Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft. Ethikkommission Sichere Energieversorgung im Auftrag der Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel, Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 30.05.2011.
- EU (2008) Special Eurobarometer 297: Attitudes towards radioactive waste. URL: https://data.europa.eu/data/datasets/s681_69_1_ebs297?locale=en, letzter Zugriff: 18.05.2021.
- EU (2019) Europeans' attitudes on EU energy policy. URL: <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/2238>, letzter Zugriff: 18.05.2021.

- EC (2019) Europäische Kommission (2019): Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Energy prices and costs in Europe, COM(2019) 1, URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/epc_report_final_1.pdf, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Frieß et al. (2021) Frieß, F., Arnold, N., Liebert, W., Müllner, N., Tweer, I. und Gufler, K. (2021): Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung von Konzepten zu Partitionierungs- und Transmutationsanlagen für hochradioaktive Abfälle. Wissenschaftliches Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), März 2021, urn:nbn:de:0221-2021030826028; URL: <https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/berichte/kt/gutachten-partitionierung-und-transmutation.html>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Ghanbarzadeh et al. (2015) Ghanbarzadeh, S.; Hesse, M.; Prodanović, M.; Gardner, J. (2015): Deformation-assisted fluid percolation in rock salt, Science, Vol. 350, Issue 6264, pp. 1069-1072, DOI: 10.1126/science.aac8747.
- Gorman et al. (2018) Gorman M.R., Dzombak, D.A. (2018): A review of sustainable mining and resource management: Transitioning from the life cycle of the mine to the life cycle of the mineral. Resources, Conservation and Recycling, 137, 281-291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.001>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- GRS (2004) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (2004): Die Klassifizierung radioaktiver Abfälle hinsichtlich der Endlagerung, GRS – 203, 2004.
- GRS (2018) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (2018): Entwicklungen im Bereich von Regeln und Richtlinien im Hinblick auf Sicherheitsanforderungen bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen, GRS - A – 3471, August 2009.
- GRS (2018) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (2018): Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen, Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA, GRS – 495, 2018.
- GRS (2020) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (2020): Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und der

Langzeitsicherheit. Synthese der Ergebnisse aus dem Vorhaben BASEL. GRS-617. 2020

- Hasegawa et al. (2015) Hasegawa A, Tanigawa K, Ohtsuru A, Yabe H, Maeda M, et al. From Hiroshima and Nagasaki to Fukushima - Health effects of radiation and other health problems in the aftermath of nuclear accidents, with an emphasis on Fukushima. *The Lancet*. 2015;9992:479-488. [Cited: 17 11, 2020.] [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(15\)61106-0/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(15)61106-0/fulltext)
- Hayakawa (2016) Hayakawa, M. (2016): Increase in disaster-related deaths: risks and social impacts of evacuation. *Ann ICRP*. 2016 Dec;45(2_suppl):123-128. doi: 10.1177/0146645316666707. Epub 2016 Oct 4. PMID: 27703057.
- Hirschberg et al. (2016) Hirschberg, S., Bauer, Ch., Burgherr, P., Cazzoli, E., Heck, T., Spada, M., Treyer, K. (2016): Health effects of technologies for power generation: Contributions from normal operation, severe accidents and terrorist threat; *Reliability Engineering and System Safety* 145 (2016) 373–387.
- Hoth et al. (2007) Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P., Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.
- IAEA (1996) International Atomic Energy Agency (IAEA) (1996): Andel, P., Pribán, V. : Environmental restoration of uranium mines and mills in the Czech Republic. In: *Planning for environmental restoration of radioactively contaminated sites in central and eastern Europe, Vol.1: Identification and characterization of contaminated sites*, IAEA- TECDOC-865, 113-135, Vienna.
- IAEA (1997) International Atomic Energy Agency (IAEA) (1997): *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*, Vienna.
- IAEA (1999) International Atomic Energy Agency (IAEA) (1999): *Survey of wet and dry spent fuel storage*. IAEA-TECDOC-1100, Vienna.
- IAEA (2001) International Atomic Energy Agency (IAEA) (2001): *Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive*, Vienna.

IAEA (2009)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2009): Classification Of Radioactive Waste, General Safety Guide, IAEA Safety Standards Series No. GSG-1, Vienna.
IAEA (2012)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2012): The Safety Case And Safety Assessment For The Disposal Of Radioactive Waste, Specific Safety Guide, IAEA Safety Standards Series, SSG-23. IAEA, Vienna.
IAEA (2014)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2014): Decommissioning of Facilities, General Safety Requirements Part 6 (GSR Part 6), Vienna.
IAEA (2016a)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2016): Managing integration of post-closure safety and pre-closure activities in the Safety Case for Geological Disposal. Draft TECDOC, IAEA, Vienna.
IAEA (2016b)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2016): GEOSAF II: Task Group on Operational Safety. Progress Report. IAEA, Vienna, 2016.
IAEA (2017)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017): Selection of Technical Solutions for the Management of Radioactive Waste. TECDOC-1817. Vienna.
IAEA (2018)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2018): Lessons Learned from the Deferred Dismantling of Nuclear Facilities, IAEA Nuclear Energy Series, NW-T-2.11, Vienna.
IAEA (2019)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2019): ARTEMIS peer-review report - Germany, URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/review-missions/final_artemis_report-germany.pdf , letzter Zugriff: 27.05.2021.
IAEA (2020a)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2020): Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050; Reference Data Series No. 1, 2020 Edition.
IAEA (2020b)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2020): Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No 2, 2020 Edition; URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-40_web.pdf , letzter Zugriff: 21.05.2021.
IAEA (2020c)	International Atomic Energy Agency (IAEA) (2020): Nuclear safety Review 2020, GC(64)/INF/3, September 2020. URL:

- <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc64-inf3.pdf>, letzter Zugriff: 21.06.2021
- IAEA (2021) International Atomic Energy Agency (IAEA) (2021): Power Reactor Information System (PRIS), The Database on Nuclear Power Reactors; URL: <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx> , letzter Zugriff: 07.05.2021
- IAEA (2017) International Atomic Energy Agency (IAEA) (2017): HIDRA - The International Project On Inadvertant Human Intrusion in the context of Disposal of RadioActive Waste, 137p.
- IAEA/HIDRA (Phase I 2013 – 2015) International Atomic Energy Agency (IAEA) (2013-2015): Human Intrusion in the Context of Disposal of Radioactive Waste (HIDRA). URL: <https://www.iaea.org/topics/disposal/human-intrusion-in-the-context-of-disposal-of-radioactive-waste-hidra>, letzter Zugriff: 21.05.2021.
- IAEA/HIDRA (Phase II 2016 – 2018) International Atomic Energy Agency (IAEA) (2016-2018): Intrusion in the Context of Disposal of Radioactive Waste (HIDRA). URL: <https://www.iaea.org/topics/disposal/human-intrusion-in-the-context-of-disposal-of-radioactive-waste-hidra>, letzter Zugriff: 21.05.2021.
- ICEM (1995) Fifth International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM'95) (1995): Vol.2 - Management of Low-Level Waste and Remediation of Contaminated Sites and Facilities, ASME, pp. 1507-1510.
- ICRP (2006) International Commission on Radiological Protection (ICRP) (2006): Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public. ICRP Publication 101a. Ann. ICRP 36 (3).
- ICRP (2007) International Commission on Radiological Protection (ICRP) (2007): The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- ICRP (2013) International Commission on Radiological Protection (ICRP) (2013): Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3), 2013.
- IGSC (2008) Integration Group for the Safety Case (IGSC) (2008): Summary record of the topical session of 10th Meeting of the IGSC:

- Balancing Operational and Long-Term Safety Considerations. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 2008.
- IGD-TP (2020) Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform (IGD-TP) (2020): Vision 2040 - Strategic Research Agenda, IGD-TP 2020; DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4059860>. Letzter Zugriff: 27.05.2021
- INRAG (2021) International Nuclear Risk Assessment Group (INRAG) (2021): Risiken von Laufzeitverlängerungen alter Atomkraftwerke, April 2021, Revision 4.
- JRC (2014) European commission - Joint Research Centre - PSC/Communication (2014): Management of spent nuclear fuel and its waste. Luxembourg, Halle (Saale): Publications Office of the European Union; EASAC Secretariat Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (JRC reference report, no. 23). URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-63689>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Kirchner et al. (2015) Kirchner, G., Englert, M., Pistner, C., Kallenbach-Herbert, B.; Neles, J. (2015): Gutachten "Transmutation". Hg. v. Öko-Institut e.V. URL: <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/gutachten-transmutation>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Knutson (2021) Knutson, J.: Church Rock Uranium Mine Disaster. 21st Century Skills Library: Unnatural Disasters: Human Error, Design Flaws, and Bad Decisions.
- KOM (2015) Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2015), Arbeitsgruppe 3: Unterlage der Niedersächsischen Landesregierung zum Themenkomplex „Naturwissenschaftliche Kriterien“ vom 11. Mai 2015, K-Drs./AG3-22, 2015.
- KOM (2016) Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 Standortauswahlgesetz (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. URL: https://www.bundestag.de/resource/blob/434430/bb37b21b8e1e7e049ace5db6b2f949b2/drs_268-data.pdf, letzter Zugriff: 27.05.2021
- KTA (2017a) Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2017): Alterungsmanagement in Kernkraftwerken. Sicherheitstechnische Regel des KTA. KTA 1403. Fassung: 2017-11.

- KTA (2017b) Kerntechnischer Ausschuss (KTA) (2017): Integriertes Managementsystem zum sicheren Betrieb von Kernkraftwerken. Sicherheitstechnische Regel des KTA. KTA 1402. Fassung: 2017-11.
- Lahiry (2017) Lahiry, S. (2017): Can mining be sustainable? Two main pre-conditions for achieving sustainability are good governance and self-regulating mining enterprises. URL: <https://www.downtoearth.org.in/blog/mining/can-mining-be-sustainable--57683>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Lahode et al. (2011) Lahoda, E. J.,F. Franceschini (2011): Advanced Fuels for Future Light Water Reactors. Pittsburgh, PA Westinghouse Electric Company LLC, 2011.
- Landesregierung Schleswig-Holstein (2021a) Landesregierung Schleswig-Holstein (2021): Deponierung von freigegebenen Abfällen aus Kernkraftwerken. Land will Abfälle des KKW Brunsbüttel den Deponien Lübeck-Niemark und Johannistal zuweisen. URL: https://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/V/Presse/PI/2021/0121/210113_freigemessenerAbfall.html, letzter Zugriff: 05.05.2021.
- Landesregierung Schleswig-Holstein (2021b) Landesregierung Schleswig-Holstein (2021): Nächste Etappe beim Atomkraft-Rückbau. URL: https://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/V/_startseite/Artikel2021/I/210113_Deponien.html. Letzter Zugriff: 05.05.2021.
- Lavrova et al. (2013) Lavrova, T., Voitsekhovych, O. (2013): Radioecological assessment and remediation planning at the former uranium milling facilities at the Pridnieprovsy Chemical Plant in Ukraine, Journal of Environmental Radioactivity, Volume 115, 2013, pp. 118-123, URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.06.011>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Lenzen (2008) Lenzen, M. (2008): Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review, Energy Conversion and Management 49, 2008, pp. 2178–2199.
- LLW (2011) LLW Repository Limited: The 2011 Environmental Safety Case – Assessment of Long-term radiological Impacts. <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20170412104738/http://llwrsite.com/wp-content/uploads/2016/03/L2-LLWR-ESC-R-11-10028-Assessment-of-Long-Term-Radiological-Impacts-MASTER-April-2011.pdf>, letzter Zugriff: 18.05.2021.

- Maeda et al. (2017) Maeda, M., Oe, M. (2017): Mental Health Consequences and Social Issues After the Fukushima Disaster. *Asia Pacific J Public Health* 2017;29(2s): 36S-46S.
- Mark (1993) Mark, J.C. (1993): Explosive Properties of Reactor Grade Plutonium. *Science and Global Security*, 4:111-128.
- Molchanov et al. (1995) Molchanov, A., Soroka, Y., Isayeva, N., Mordberg, E. (1995): The State of Environment on Former Site of In-Situ Leaching of Uranium. In: Slate, S., Baker, R., Benda, G. (Eds.): *Proceedings of the Fifth International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM '95, Vol. 2 - Management of Low-Level Waste and Remediation of Contaminated Sites and Facilities, ASME*, pp. 1507-1510.
- Möller (2009) Möller, D. (2009): *Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland : Administrativ-politische Entscheidungsprozesse zwischen Wirtschaftlichkeit und Sicherheit, zwischen nationaler und internationaler Lösung, Frankfurt a. M. u. a.*
- Möller (2016) Möller, D. (2016): Zur Geschichte des Endlagers Asse II (1964 - 2009) und ihrer heutigen Relevanz. In: Hocke, P.; Bechthold, E.; Kuppler, S. (Hg.) (2016): *Rückholung der Nuklearabfälle aus dem früheren Forschungsbergwerk Asse II. Dokumentation einer Vortragsreihe am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) (mit Beiträgen von Detlev Möller, Beate Kallenbach-Herbert, Silvia Stumpf, Volker Metz). Karlsruhe, S. 9-24. KIT Scientific Working Papers Nr. 47.*
- NABU (2021) Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V. (2021): *Sustainable Finance Introduction to the EU Taxonomy on Biodiversity and Ecosystems; Report on Behalf of Naturschutzbund Deutschland e.V., April 2021.*
- NAGRA (2002) NAGRA - National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Hg.) (2002): *Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). NAGRA - National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (TECHNICAL REPORT, 02-05).*
- NAS (1995) National Academy of Sciences (1995): *Technical bases for Yucca Mountain standards. Committee on technical bases for Yucca Mountain standards, board on radioactive waste management, commission on geosciences, environment, and resources,*

national research council. National Academy Press. Washington D.C., 1995.

- NEA (1995) Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA) (1995): The Environmental and Ethical Basis of the Geological Disposal of Long-lived Radioactive Waste, Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee, OECD, 1995.
- NEA (2012) Nuclear Energy Agency (NEA) (2012): Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste“. NEA no. 6923.
- NEA (2014) Nuclear Energy Agency (NEA) (2014): Foundations and Guiding Principles for the Preservation of Records, Knowledge and Memory Across Generations: A Focus on the Post-closure Phase of Geological Repositories – A Collective Statement of the NEA Radioactive Waste Management Committee (RWMC). URL: www.oecd-nea.org/rwm/rkm/documents/flyer-A4-rkm-collective-statement-en-2014.pdf, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- NEA (2016) Nuclear Energy Agency (NEA) (2016): Joint NEA/IAEA workshop on operational safety of geological repositories. Synopsis. NEA draft document, Paris 29.06.-01.07.2016.
- NEA (2019) Nuclear Energy Agency (NEA) (2019): Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations - Final Report of the RK&M Initiative, NEA No. 7421. URL: <https://www.oecd.org/publications/preservation-of-records-knowledge-and-memory-rk-m-across-generations-50292bbb-en.htm>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- NEA (2020) Nuclear Energy Agency (NEA) (2020): World's uranium resources enough for the foreseeable future, say NEA and IAEA in new report. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52716/world-s-uranium-resources-enough-for-the-foreseeable-future-say-nea-and-iaea-in-new-report; letzter Zugriff: 18.05.2021.
- NUREG (1997) Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts; NUREG/CR-6372 UCRL-ID—122160 Vol. 1; (1997).
- OECD (2011) Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2011): The Supply of Medical Radioisotopes: The Path to Reliability, OECD 2011.
- OECD (2011) Radioactive Waste Management Programmes in OECD/NEW Member Countries (United States 2011); URL: <https://www.oecd->

nea.org/jcms/pl_33786/radioactive-waste-management-programmes-in-oecd/nea-member-countries-united-states, letzter Zugriff: 27.05.2021.

- Öko (2015) Öko-Institut und Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (2015): Strategische Umweltprüfung zum Nationalen Entsorgungsprogramm, Umweltbericht für die Öffentlichkeitsbeteiligung, Darmstadt / Köln, 2015.
- Pistner et. al (2021) Pistner, C., Englert, M., Küppers, C., von Hirschhausen, C., Wealer, B., Steigerwald, B. und Donderer, R. (2021): Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors), Wissenschaftliches Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), März 2021, urn:nbn:de:0221-2021030826028; URL: <https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/berichte/kt/gutachten-small-modular-reactors.html>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Poinssot et al. (2014) Poinssot, C., Bourg, S., Ouvrier, N., Combernoux, N., Rostaing, C., Vargas-Gonzalez, M., Bruno, J.: Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems [4-2]. Comparison between closed and open fuel cycles, Energy 69 (2014) 199-211, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.069>.
- Rosa-Luxemburg-Stiftung (2019) Rosa-Luxemburg-Stiftung (2019): Uranatlas – Daten und Fakten über den Rohstoff des Atomzeitalters. URL: www.rosalux.de/uranatlas, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- RSH (1979) Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz (RSH) (1979): Genehmigungsvoraussetzungen für die Zwischenlagerung von abgereichertem bzw. natürlichem und angereichertem Uran in Form von Uranhexafluorid (UF₆), vom 15.02.1979, Kap 3-18, URL: https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_11.html, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- RSH (1997) Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz (RSH) (1997) Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen, Teil II Sicherheitsanforderungen für die Herstellung von Leichtwasserreaktorbrennelementen mit niedrig angereichertem Uran, April 1997, Kap. 3-11, S.25, URL: https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_11.html, letzter Zugriff: 27.05.2021.

- RSH (1997) Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz (RSH) (1997): Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen, Teil III, Sicherheitsanforderungen für die Herstellung von Uran/Plutonium-Mischoxidbrennelementen, April 1997, Kap. 3-11 S.36, URL: https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_11.html, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- RSH (2004) Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz (RSH) (2004): Sicherheitsanforderungen für Kernbrennstoffversorgungsanlagen, Teil I Sicherheitsanforderungen für Urananreicherungsanlagen nach dem Gasultrazentrifugenprinzip, Revision Juni 2004, Kap. 3-11, URL: https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_11.html, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Rübel (2019) Rübel, A. (2019): Projekt Konrad –Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers Konrad nach dem Stand von Wissenschaft und Technik (ÜsiKo), Überprüfung der sicherheitsrelevanten Anforderungen zur Langzeitsicherheit, Kritikalität in der Nachbetriebsphase und thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins, Abschlussbericht zur Phase 1: Ermittlung des Überprüfungsbedarfs. Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS), AF-Consult Switzerland Ltd. und DMT GmbH & Co. KG.
- Schwenk-Ferrero (2013) Schwenk-Ferrero, A. (2013): German Spent Nuclear Fuel Legacy: Characteristics and High-Level Waste Management Issues. In: Science and Technology of Nuclear Installations 2013 (1), S. 1–11. DOI: 10.1155/2013/293792
- Schweriner Volkszeitung (2013) Schweriner Volkszeitung (2013): „Atomfrachter kollidiert auf der Ostsee“, vom 26.10.2013. URL: <https://www.svz.de/regionales/mecklenburg-vorpommern/atomfrachter-kollidiert-auf-der-ostsee-id5106816.html>, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Seitz et al. (2016) Seitz, R., Kumano, Y., Bailey, L., Markley, C., Andersson, E., Beuth, T. (2016): Role of Human Intrusion in Decision-Making for Radioactive Waste Disposal - Results of the IAEA HIDRA Project - 16287. WM2016: 42 Annual Waste Management Symposium, March 6-10, 2016, Phoenix, Arizona USA, 2016.
- Shigemura et al. (2020) Shigemura J., Terayama T., Kurosawa M., Kobayashi Y., Toda H., Nagamine M., Yoshino A. (2020): Mental health consequences for

- survivors of the 2011 Fukushima nuclear disaster: a systematic review. Part 1: psychological consequences. *CNS Spectr.* 2021 Feb;26(1):14-29. doi: 10.1017/S1092852920000164, Epub 2020 März 2020. PMID: 32192553
- SKB (2011) Svensk Kärnbränslehantering (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, Volume I, Svensk Kärnbränslehantering AB, März 2011
- SRIC (2007) Southwest Research and Information Center (2007): Report of the Church Rock uranium monitoring project 2003-2007, URL: www.sric.org/uranium/docs/CRUMPRReportSummary.pdf, letzter Zugriff: 27.05.2021.
- Sovacool et al. (2015) Sovacool, B. K., Kryman, M. und Laine, E. (2015): Profiling technological failure and disaster in the energy sector: A comparative analysis of historical energy accidents. *Energy*, 90, pp. 2016-2027.
- SLOV (2017) Slovakische Republik (SLOV) (2017): National Report of the Slovak Republic compiled in Terms of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radwaste Management.
- SMR Regulators' Forum (2018) SMR Regulators' Forum (2018): SMR Regulators' Forum Pilot Project Report: Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors, Januar 2018. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/01/smr-rf-report-no-appendixes-150118.pdf>, letzter Zugriff: 21.06.2021
- SMR Regulators' Forum (2019) SMR Regulators' Forum (2019). Small Modular Reactors Regulators' Forum: Design and Safety Analysis Working Group, Report on Multi-unit/Multi-module aspects specific to SMRs, Interim Report, 15 December 2019. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/19/12/smr_rf_dsa_interim_report.pdf, letzter Zugriff: 21.06.2021
- Sovacool et al. (2016) Sovacool, B. K., Andersen, R., Sorensen, S., Sorensen, K., Tienda, V., Vainorius, A., Schirach, O. M. and Bjørn-Thygesen, F.: Balancing safety with sustainability: assessing the risk of accidents for modern low-carbon energy systems; *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 3952-3965 (2016).
- SSK (2015) SSK-Empfehlung „Weiterentwicklung des Notfallschutzes durch Umsetzen der Erfahrungen aus Fukushima“, Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 274. Sitzung der

Strahlenschutzkommission am 19./20.02.2015.
https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2015/Weiterentwicklung_Notfallschutz_nachFukushima.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff: 21.05.2021

SSM (2009) Swedish Radiation Safety Authority (SSM) (2009): Regulatory Code, SSMFS 2008:37, The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations and General Advice Concerning the Protection of Human Health and the Environment in Connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste, 2009.

Stagl (2020) Stagl, S. (2020): Die Taxonomie-Verordnung und Kernenergie unter Berücksichtigung der DNSH-Kriterien: eine Literaturstudie. Österreichisches Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. GZ 2020-0.417.529.

Stamford et al. (2012) Stamford, L. und Azapagic, A. (2012): Life cycle sustainability assessment of electricity options for the UK. Int. J. Energy Res. 2012, 36, 1263-1290.

STUK (2014) Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) (2014):, Guide YVL D.5, Disposal of Nuclear Waste, 2014.

TEG – Report (2019) Taxonomy Technical Report, EU Technical Expert Group on Sustainable Finance, Juni 2019.

TEG (2020a) Technical Expert Group on Sustainable Finance; technical report: Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance, März2020.

TEG (2020b) Technical Expert Group on sustainable Finance; Taxonomie report: Technical Annex, Updated methodology & Updated Technical Screening criteria, März 2020.

Tyson (2020) Tyson, R. (2020): Sustainable mining – do we have consensus on what it really means?
 URL: <https://www.mining.com/sustainable-mining-do-we-have-consensus-on-what-it-really-means/>, letzter Zugriff: 27.05.2021.

UN (2015) United Nations (2015): Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations. 2015. New York.

Uranium Mining Industry Info (2021) Uranium Mining Industry Info (2021): Uranium Deposit, Mine, and Mill Site Info. URL: <https://www.wise-uranium.org/indexu.html#UMMSTAT>, letzter Zugriff: 27.05.2021.

URENCO (2021)	URENCO (2021): The Energy to Succeed, URL: https://www.urengo.com/ , letzter Zugriff: 03.05.2021.
US DoE (1994)	US DoE (1994): Additional Information concerning underground nuclear weapon test of reactor-grade plutonium. US Department of Energy, Office of the Press Secretary.
WENRA (2010)	Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA) (2010): Safety objectives for new nuclear power plants.
WENRA (2014)	Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA) (2014): Reactor Harmonisation Working Group Report: WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors, Update in relation to lessons learned from TEPCO Fukushima Daiichi accident, September 2014.
WISE (2015)	Word Information Service on Energy Uranium Project (WISE) (2015): Impact of Uranium In-Situ Leaching. URL: https://www.wise-uranium.org/uisl.html#IMPACTS , letzter Zugriff: 11.05.2021.
WNA (2011)	World Nuclear Association (WNA) (2011): Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources, Juli 2011, URL: http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/comparison_of_lifecycle.pdf , letzter Zugriff: 27.05.2021.
WNI (2019)	World Nuclear Industry (WNI) (2020): Status Report. Edition 2019.
WNI (2020)	World Nuclear Industry (WNI) (2020): Status Report. Edition 2020.