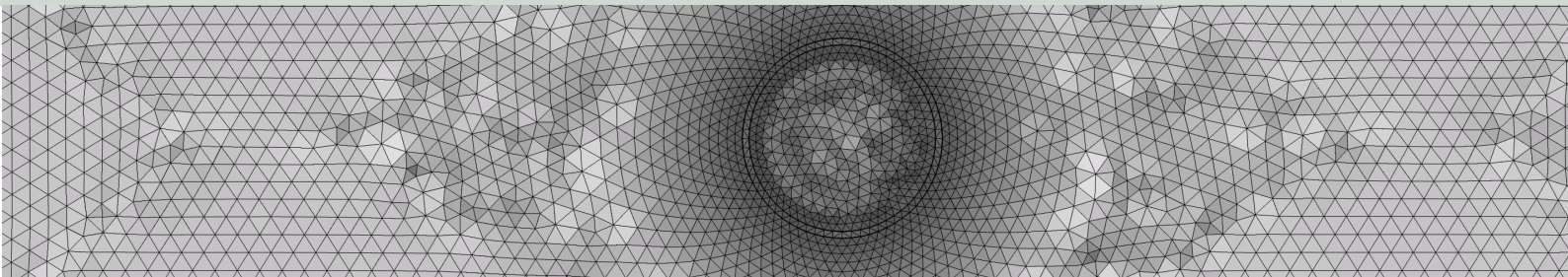




Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



Methodik (Multikriterienanalysen)

Expertenbericht

im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager

K.-J. Röhlig

Technische Universität Clausthal

Juli 2015

Disclaimer:

Die im Bericht dokumentierten Ansichten und Schlussfolgerungen sind diejenigen der Autoren und stimmen nicht notwendigerweise mit denen des ENSI überein.



TU Clausthal

Sachplan Etappe 2: Expertenauftrag Methodik (Multikriterienanalysen)

Technische Universität Clausthal
Institut für Endlagerforschung



TU Clausthal

Sachplan Etappe 2: Expertenauftrag Methodik (Multikriterienanalysen)

Klaus-Jürgen Röhlig

Juli 2015

Dieser Bericht entstand im Auftrag des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI). Der Bericht gibt allein die Auffassungen und Meinungen des Autors wieder.

Technische Universität Clausthal
Institut für Endlagerforschung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Vorgehensweise	5
3	Sachverhalt	7
4	Bewertung	13
4.1	Allgemeines.....	13
4.2	Vor- und Nachteile der Methoden, Einfluss auf das Ergebnis und Potenzial zur Verzerrung der Resultate	18
4.3	Technische Korrektheit und Nachvollziehbarkeit der zusammenfassenden Bewertung	20
4.4	Methodische Diversität und alternative Methoden	22
5	Literatur	28

1 Einleitung

Der Expertenauftrag Methodik (Multikriterienanalysen) wurde in Zusammenhang mit der Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT) (BFE 2008) durch das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) vergeben (Vertrag H-101155). Der Sachplan legt fest, wie Standorte zur geologischen Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz ausgewählt werden. In der Etappe 2 sollen Standortgebiete mit eindeutigen Nachteilen gegenüber anderen Standortgebieten zurückgestellt werden. Die von der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) zu diesem Zweck durchgeführten Multikriterienanalysen sind Gegenstand des Expertenauftrags.

Folgende Fragestellungen standen bei der Beurteilung der Methodik zur vergleichenden Bewertung im Fokus:

1. Was sind die Vor- und Nachteile der einzelnen angewendeten Methoden und welchen Einfluss können diese auf das Ergebnis haben? Welches Potenzial gibt es zur Verzerrung der Resultate?
2. Wurde die zusammenfassende Bewertung mittels der vier Methoden technisch korrekt und nachvollziehbar ausgeführt?
3. Ist die von der Nagra angewendete methodische Diversität sinnvoll gewählt? Ist die Wahl der angewandten Methoden genügend begründet? Existieren alternative Methoden, um entsprechende Vergleiche durchzuführen bzw. eindeutige Nachteile zu identifizieren? Wenn ja, könnten diese zu einem anderen Ergebnis führen, d.h. ist die Auswahl der Nagra belastbar im Hinblick auf das Ergebnis?

Eine Beurteilung der von der Nagra eingebrachten Zahlenwerte erfolgte nicht. Diese werden durch das ENSI selbst beurteilt.

2 Vorgehensweise

Gegenstände der Beurteilung waren folgende Teile des Sicherheitstechnischen Berichts NTB 14-01 der Nagra zu SGT Etappe 2 „Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete“:

- Textband (Nagra 2014a), Kapitel 5
- Anhang C (Nagra 2014b)
- Anhang D (Nagra 2014c)

Auch für die Bewertung der Wirtgesteine und Auswahl der prioritären Wirtgesteine in den geologischen Standortgebieten für das SMA-Lager wurden Multikriterienanalysen angewendet (Nagra 2014a, Kapitel 3). Diese waren nicht unmittelbarer Gegenstand des Expertenauftrags, Aussagen zu den Eigenschaften der gewählten Methoden sind jedoch übertragbar.

Vertragsgemäß wurden durch den Beauftragten (dem Autor des vorliegenden Berichts) zunächst diese Berichtsteile studiert. Im späteren Verlauf stellte sich die Notwendigkeit heraus, auch Informationen aus (Nagra 2014a), Kapitel 2 (insbesondere zur „Qualitativen Bewertung mit Nutzwertanalyse“) in die Betrachtung einzubeziehen.

Daran anschließend erfolgte eine Literaturrecherche zu den verwendeten Methoden. Ausgangspunkt waren die in (Nagra 2014c) zitierten Quellen (Brans et al. 1986, Brans & Mareschal 2005, Department for Communities and Local Government London 2009, Geldermann 1998, Geldermann et al. 2000, Geldermann & Schöbel 2011, Keeney & Raiffa 1976, Reichert et al. 2011, Zangemeister 1976). Darüber hinaus waren zunächst (Figueira et al. 2005, French 2013, Hubbard 2009, Lemaire 2014, McNamee & Celona 2008, Stewart et al. 2012, Strassert 2013, Zionts 1979) sowie im weiteren Verlauf der Bearbeitung (Gutberlet 2015, Oberschmidt 2009, Pudenz et al. 2002) Gegenstände der Recherche. Die meisten dieser Quellen werden nachfolgend nicht explizit zitiert, sie bildeten für den Beauftragten jedoch eine Basis zur Beurteilung der Methodenvielfalt und der Philosophie hinter einzelnen Methoden.

Der Beauftragte stellte die Erkenntnisse aus der Durchsicht von (Nagra 2014a-c) und erste Einschätzungen unter Berücksichtigung der o.g. Literatur dem ENSI am 26.05.2015 in einer Videokonferenz vor. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Konferenz sowie eines nachfolgenden Austauschs ergänzender Informationen mit dem ENSI entstand der Entwurf 01 des vorliegenden Berichts, der dem ENSI am 15.06.2015 zugestellt wurde. Dieser bildete die Grundlage eines internen Seminars des Fachgebiets Endlagersysteme am Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal

am 24.06.2015¹, in dem der Autor Sachverhalt und vorläufige Bewertung vorstellte. Der Autor möchte an dieser Stelle den Teilnehmern für wertvolle Anregungen zur Überarbeitung danken. Der Entwurf 01 wurde in einer Videokonferenz mit dem ENSI am 25.06.2015 vorgestellt und diskutiert. Aufgrund der Ergebnisse hat das ENSI Fragen an die Nagra formuliert. Die vorliegende Endfassung des Berichts entstand aufgrund der Ergebnisse des internen Seminars, der Videokonferenz vom 25.06., der Antworten der Nagra auf die Fragen des ENSI, sowie der schriftlichen Rückmeldung des ENSI vom 13.07.2015.

3 Sachverhalt

Nach dem Verständnis des Autors war das Ziel der von der Nagra vorgenommenen Vergleiche und Bewertungen eine Eignungsaussage sowie die Identifikation eindeutiger Nachteile von Standortgebieten im Hinblick auf „entscheidrelevante Merkmale“ und auf Indikatoren für diese Merkmale. Da es bei einer solchen Zielsetzung zu Zielkonflikten kommen kann, hat sich die Nagra mehrerer Verfahren der so genannten Multikriterienanalyse bedient. Ziel derartiger Verfahren ist die Bereitstellung von Entscheidungshilfen beim Vorliegen mehrerer Entscheidungskriterien, auch und insbesondere bei allfälligen Zielkonflikten.

Die vier in (Nagra 2014c) beschriebenen und in (Nagra 2014a) angewandten Methoden sind im Einzelnen

- **„Qualitative Bewertung mit Nutzwertanalyse:** Qualitative Bewertung der Alternativen anhand von Nutzwerten (analog Etappe 1).
- **Direkter Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken-Schwächen-Profil:** Identifikation von eindeutigen Nachteilen anhand eines direkten Vergleichs der Bewertungen für die Alternativen.
- **'Outranking-Methode':** Identifikation von eindeutigen Nachteilen anhand eines paarweisen Vergleichs der Bewertungen für die Alternativen.

¹ Die Teilnehmer des Seminars wurden auf die Regeln zur Vertraulichkeit gemäß Artikel 3 des Vertrags H-101155 zwischen ENSI und Beauftragtem verpflichtet.

- **Malus-Bilanzierung:** Identifikation von eindeutigen Nachteilen anhand eines Vergleichs der Bewertungen für die Alternativen mit absoluten Schwellenwerten“ (Nagra 2014c)

Der Identifizierung eindeutiger Nachteile vorangestellt war eine Eignungsaussage, u.a. gestützt auf die „Qualitative Bewertung mit Nutzwertanalyse“ zur Identifizierung von Standortgebieten, die mindestens als „geeignet“ eingestuft werden können (Nagra 2014a, Kapitel 2). Das Verfahren ist bereits in der Sachplan-Etappe 1 angewendet worden. Allfällige Änderungen in der Bewertung resultieren entweder aus neuen Erkenntnissen oder aus Änderungen in der Bewertungsskala. Es wurde in 3 Ebenen gearbeitet (Kriteriengruppe – Kriterium – Indikator). Zunächst wurden den Indikatoren Bewertungen (sehr günstig, günstig, bedingt günstig, ungünstig, ungenügend) zugeordnet und diese in Zahlenwerte („Nutzwerte“ von 5 bis 1) überführt. Für jedes Kriterium wurde pro Standortgebiet das arithmetische (gleichgewichtete) Mittel der Nutzwerte für die ihm zugeordneten Indikatoren („aggregierte Nutzwerte“), für jede Kriteriengruppe wiederum das arithmetische (gleichgewichtete) Mittel der Werte für die Kriterien gebildet. Die Bewertung des Standortgebiets erfolgte schließlich durch arithmetische (gleichgewichtete) Mittelung der für das Gebiet ermittelten Werte für die einzelnen Kriteriengruppen. Ein Standortgebiet galt als geeignet, wenn es in der Gesamtbewertung mindestens die Bewertung 3 erzielte.

Diese „Qualitative Bewertung mit Nutzwertanalyse“ wurde bereits in Etappe 1 angewandt und durch das ENSI begutachtet. Sie war nicht unmittelbarer Gegenstand des Expertenauftrags, sie wird hier jedoch der Vollständigkeit halber mit angeführt und auf Wunsch des ENSI im nachfolgenden Kapitel in die Bewertung einbezogen, da auch hier eine Multikriterienanalyse zur Anwendung kam und die Methode in (Nagra 2014c) beschrieben wird.

Zur Identifikation eindeutiger Nachteile (Nagra 2014a, Kapitel 5) bediente sich die Nagra der übrigen drei der oben aufgeführten vier Methoden. Bei den hierzu gemäß der Vorgaben in (ENSI, 2013) betrachteten „entscheidrelevanten Merkmale“ handelt es sich um

- die Wirksamkeit der geologischen Barriere (8 Indikatoren),
- die Langzeitstabilität der geologischen Barriere (8 Indikatoren)
- die Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet (2 Indikatoren) und

- die bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale (3 Indikatoren).

Es handelt sich also um zwei Ebenen (entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren); die durch das ENSI vorgegebenen entscheiderelevanten Merkmale (Nagra 2014a, Tab. 2.1-5) weisen nach Wahrnehmung des Autors deutliche Parallelen zu den für die „Qualitative Bewertung mit Nutzwertanalyse“ verwendeten Kriteriengruppen auf, es wird jedoch nur eine Teilmenge der bei der „Qualitativen Bewertung“ betrachteten Indikatoren verwendet.

Die Nagra hat zunächst einen „direkten Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken-Schwächen-Profil“ von Indikatoren wie auch von Merkmalen vorgenommen. Dazu wurden zunächst die Indikatoren für jedes Standortgebiet quantifiziert, d.h. ihnen wurden Zahlenwerte („Nutzwerte“) auf einer Skala von 1 (ungünstig) bis 5 (sehr günstig) (in Stufen von 0.2) zugeordnet. Ergab die Quantifizierung, dass einem Standortgebiet für einen Indikator ein Nutzwert zugewiesen wurde, der um mindestens zwei Stufen ungünstiger ausfiel als der des bzgl. dieses Indikators besten Standortgebiets, so wurde dies als Hinweis auf einen *eindeutigen Nachteil* gewertet. Fiel die Bewertung um mindestens eine Bewertungsstufe ungünstiger aus, so galt dies als Hinweis auf einen *vertieft zu prüfenden Nachteil*.²

Weiterhin wurden für alle Merkmale Bewertungen („aggregierte Nutzwerte“) für jedes Standortgebiet abgeleitet, indem die für das jeweilige Merkmal maßgeblichen Indikatoren aggregiert wurden. Dies erfolgte für die Merkmale „Wirksamkeit der geologischen Barriere“ und „Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere“ unter der Annahme, dass die jeweiligen Indikatoren „kompensierbare Beiträge“ zu den ihnen zugeordneten Merkmalen leisten. Aufgrund dieser Annahme wurde durch eine arithmetische gleichgewichtete Mittelung der jeweiligen Indikatorwerte ein aggregierter Nutzwert für das jeweilige Merkmal und Standortgebiet abgeleitet. Dagegen wurde für die beiden anderen Merkmale „Langzeitstabilität der geologischen Barriere“ und „bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers“ angenommen, dass die Indikatoren „nicht-kompensierbare

² Offenbar beziehen sich die Angaben „eine Bewertungsstufe ungünstiger“ bzw. „zwei Bewertungsstufen ungünstiger“ *nicht* auf die als Dezimalbruch dargestellten Bewertungsgrößen, sondern auf gerundete Werte, wie sich auch in der Farbskala niederschlagen, vgl. Kapitel 3 „Bewertung“ und den dortigen Verweis auf die Antwort der Nagra zur ENSI-Frage 49.

Beiträge“ leisten. Daher wurde für diese Merkmale der jeweils schlechteste Indikator-Nutzwert für ein Merkmal diesem Merkmal und Standortgebiet als aggregierter Nutzwert zugeordnet.

Analog wie für die Indikatoren wurden aus den so abgeleiteten aggregierten Nutzwerten Hinweise auf eindeutige Nachteile bezüglich der Merkmale hergeleitet. Die Nagra weist darauf hin, dass der Indikator „Selbstabdichtungsvermögen“ eine Sonderrolle besitzt, da er sowohl für das Merkmal „Wirksamkeit der geologischen Barriere“ als auch für das Merkmal „Langzeitstabilität der geologischen Barriere“ relevant ist, also doppelt gewichtet wird.

Die Aggregation von Einzelinformationen unterscheidet sich also von der bei der „Qualitative Bewertung mit Nutzwertanalyse“ vorgenommenen: Während dort über drei Ebenen

Indikator → Kriterium, Kriterium → Kriteriengruppe, Kriteriengruppe → Standortgebiet gleich gewichtet gemittelt wurde, erfolgte eine Aggregation bei der Identifikation eindeutiger Nachteile über eine Ebene

Indikator → entscheiderelevantes Merkmal.

Während das Vorgehen bei der „Qualitative Bewertung mit Nutzwertanalyse“ eine volle Kompensation von günstigen durch weniger günstige Indikatoren (und umgekehrt) auf jeder Aggregationsebene ermöglicht, gibt es die Möglichkeit einer Kompensation bei der Identifikation eindeutiger Nachteile nur für die Indikatoren, die den beiden entscheiderelevanten Merkmalen „Wirksamkeit der geologischen Barriere“ und „Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere“. Schließlich wurde bei der „Qualitative Bewertung mit Nutzwertanalyse“ an einem absoluten Kriterium (Bewertung von 3 oder besser) gemessen, während der direkte Vergleich die Standortgebiete relativ zueinander betrachtet.

Die Nutzwerte für Indikatoren und daraus abgeleitet für Merkmale wurden sowohl für SMA- als auch für HAA-Lager numerisch und auch mittels einer Farbskala tabellarisch dargestellt (Nagra 2014a, Tab. 5.2-1 für SMA und 5.2-2 für HAA). Darüber hinaus erfolgte eine Darstellung mittels von der Nagra so genannter Histogramme (Nagra 2014a, Fig. 5.2-1 für SMA und Fig. 5.2-2 für HAA), in denen für die Merkmale wie auch für die Indikatoren die Anzahl der Bewertungen für die verschiedenen Bewertungsstufen dargestellt wurden.

Die so abgeleiteten Hinweise wurden argumentativ bewertet und Schlussfolgerungen hinsichtlich tatsächlicher eindeutiger Nachteile abgeleitet. Als Beispiel für eine solche argumentative Bewertung sei hier die Bewertung der bautechnischen Machbarkeit für ein SMA-Lager in Südranden genannt. Hier ergaben sich aus der Betrachtung der Indikatoren „Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen“ und „Platzangebot untertags“ Hinweise auf *vertieft zu prüfende Nachteile*. Die Nagra argumentiert dann:

„Ferner weist das Standortgebiet Südranden ein sehr knappes Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage auf (Indikator 'Platzangebot untertags'). Auch diese vergleichsweise tiefere Bewertung wird als eindeutiger Nachteil eingestuft im Vergleich zu den Standortgebieten, welche für den Indikator 'Platzangebot untertags' die beste Bewertung aufweisen (Zürich Nordost und Jura Ost). Hingegen werden die vergleichsweise tieferen Bewertungen bei den Indikatoren 'Mächtigkeit' und 'Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' nicht als eindeutige Nachteile eingestuft, weil die Barrierenwirkung des Opalinustons und der unteren Rahmengesteine insgesamt doch als günstig eingestuft werden können und der Zugang nach Untertag zuverlässig und sicher gewährleistet werden kann.“

In einer Differenzenanalyse wurde dann überprüft, ob sich durch die Anwendung alternativer Methoden der Multikriterienanalyse ('Outranking-Methode', 'Malus-Bilanzierung') weitere Hinweise auf eindeutige Nachteile ergaben, die dann ebenfalls argumentativ bewertet wurden.

Die 'Outranking-Methode' beruht auf einem „paarweise(n) Vergleich der Alternativen bezüglich des entscheiderelevanten Merkmals bzw. Indikators anhand der Nutzwerte durch Anwendung einer Präferenzfunktion“ (Nagra 2014c). Nutzwerte und aggregierte Nutzwerte wurden dabei wie oben beschrieben bestimmt. Die Definition dieser Präferenzfunktion bzw. der daraus abgeleiteten „Schwäche-Präferenzflüsse“ wirkt sich dahin gehend aus, dass sich ein Hinweis auf eindeutige Nachteile nicht mehr allein aus dem Vergleich mit dem jeweils günstigsten Nutzwert bzw. aggregierten Nutzwert, sondern mit allen „konkurrierenden“ Nutzwerten ergibt. Beiträge zum Schwäche-Präferenzfluss ergeben sich immer dann, wenn das jeweils betrachtete Standortgebiet bezüglich eines Indikators oder eines entscheiderelevanten Merkmals einen ungünstigeren Nutzwert (bzw. aggregierten Nutzwert) als ein anderes aufweist; dies kann nicht dadurch kompensiert werden, dass es vielleicht einen günstigeren

Nutzwerte (oder aggregierten Nutzwerte) im Vergleich zu einem dritten Standortgebiet aufweist. Übersteigt der Schwäche-Präferenzfluss einen bestimmten Schwellenwert (durch Expertenurteil wurde 25% festgelegt), so wird dies als Hinweis auf einen Nachteil interpretiert. Neben den Schwäche-Präferenzflüssen sind in (Nagra 2014b, Fig. C.3-1) auch analog berechnete Stärke-Präferenzflüsse dargestellt, diese wurden aber in der weiteren Argumentation nicht verwendet.

Die 'Malus-Bilanzierung' liefert Hinweise auf Nachteile aus den Differenzen der Nutzwerte bzw. aggregierte Nutzwerte (im Sinne eines Malus) zu einem (durch Expertenurteil zu definierenden) absoluten Schwellenwert (festgelegt wurde 3.5). „Bei Unterschreitung eines Schwellenwerts ergibt sich ein Malus, welcher der Differenz zwischen Schwellenwert und Nutzwert entspricht. Fällt der Malus für ein Merkmal oder Indikator grösser als 0.4 aus (d.h. der Nutzwert liegt um mindestens 0.4 Bewertungspunkte unter dem Schwellenwert) und gibt es eine Vergleichsvariante ohne Malus beim entsprechenden Merkmal oder Indikator, so wird dies als Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil interpretiert. Dieser Schwellenwert wurde basierend auf einer Expertenbeurteilung gewählt.“ (Nagra 2014c)

Die vorgenannten Methoden wurden auf den so genannten „maßgebenden Fall der Einengung“ angewandt; darüber hinaus erfolgten Sensitivitätsprüfungen hinsichtlich von „alternativen Konzeptualisierungen“ und von „alternativen Lagerperimetern.“

Hierzu wurden die Nutzwerte für den „maßgebenden Fall“ für das jeweilige Standortgebiet denen für alternative Fälle (je nach Standortgebiet nur alternative Lagerperimeter bzw. alternative Lagerperimeter *und* Konzeptualisierungen) tabellarisch gegenübergestellt (Nagra 2014b, Tab. C.3-2a-f für die „qualitative Bewertung“ sowie C.3-5a-f für den „direkten Vergleich“ für das SMA-Lager; analog Tab. C.3-2g-h bzw. C.3-5g-h für das HAA-Lager). Beim „direkten Vergleich“ wurden allfällige Auffälligkeiten (also deutliche Unterschiede zum „maßgebenden Fall“) für die Standortgebiete *einzel*n argumentativ behandelt, eine Darstellung der *Gegenüberstellung* von Standortgebieten erfolgte immer für den „maßgebenden Fall“. In keinem Fall führte die Betrachtung alternativer Lagerparameter und Konzeptualisierung zu anderen Bewertungen als im „maßgebenden Fall“.

Weiterhin flossen in die Bewertung die Dosisberechnungen der Nagra sowie die Vorgaben des Sachplans, der KNS sowie der AG SiKA/KES ein. Schließlich wurde die Option eines Kombilagers im jeweiligen Standortgebiet geprüft.

4 Bewertung

4.1 Allgemeines

Managemententscheidungen erfolgen in der Regel angesichts einer Vielzahl von Entscheidungskriterien oder –maßstäben, so dass es zu Zielkonflikten kommen kann. In Anwendungsfällen der klassischen mathematischen Optimierung ist es möglich, die Freiheitsgrade, die für eine Entscheidung bestehen, durch Parameter darzustellen und die Entscheidungsziele in einer einzigen von diesen Parametern abhängigen so genannten „Zielfunktion“ (z.B. als Kosten, Gewinn oder Transportweglänge) objektiv zu aggregieren. Es gilt dann, durch geeignete mathematische Algorithmen unter allen möglichen Parameterkonstellationen diejenige(n) herauszufinden, für die die Zielfunktion maximiert bzw. minimiert wird. (Außermathematische) Schwierigkeiten entstehen dann, wenn nicht oder nicht vollständig klar ist, wie eine Zielfunktion zu formulieren ist, also wie „wertvoll“ ein bestimmter Parameterwert für den Entscheider oder seinen Kunden ist.

Letzteres gilt auch für den hier betrachteten Fall: Die Anzahl der Optionen (Standortgebiete) ist sehr überschaubar, mit jeder Option sind Parameterwerte verbunden, die – abgesehen von Ungewissheiten – eindeutig bestimmt sind. Der Kern des Problems liegt nicht in einer komplexen Lösungssuche, sondern in der oben genannten „Wertentscheidung“. Derartige Probleme können mit Hilfe von Methoden der Multikriterienanalyse behandelt und womöglich zur Lösung geführt werden; allerdings ist die Terminologie bezüglich dieser Methoden uneinheitlich:

„One source of confusion to those new to the field is the variety of different techniques, often with rather similar sounding titles, that appear to be available, such as multi-criteria decision analysis, multi-attribute utility theory, the analytic hierarchy process, and fuzzy set theory.“ (Department for Communities and Local Government London 2009).

Das nach Auffassung des Autors für die Problematik radioaktiver Abfälle bemerkenswerteste Beispiel einer Anwendung solcher Methoden erfolgte im Rahmen des Optionenvergleichs für die Entsorgung aller Arten radioaktiver Abfälle in Großbritannien durch das „Committee on Radioactive Waste Management“ (CoRWM 2006). Für die Beurteilung einer so genannten „short list“ von Entsorgungsoptionen

(long-term interim storage, deep geological disposal, phased deep geological disposal, near surface disposal of short-lived wastes – jeweils mit mehreren Varianten) wurden verschiedene Verfahren kombiniert:

- Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) (Abb. 1),
- ganzheitliche Beurteilung der einzelnen Optionen,
- Verbindung beider Methoden „Cooperative Discourse Methodology“

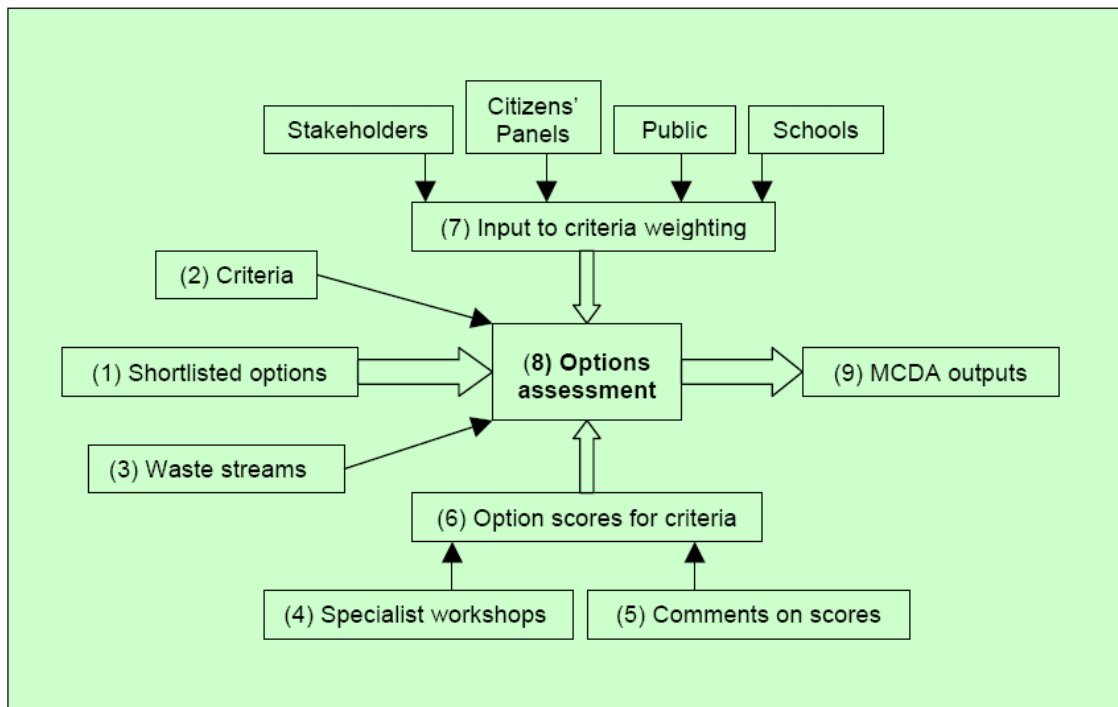


Abb. 1 Überblick zur Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) (aus CoRWM 2006)

Die Beurteilung im Rahmen der MCDA erfolgte anhand von 11 „Headline Criteria“, jedes gestützt auf 1-4 „Sub-Criteria“. Diese gingen linear gewichtet in die Gesamtbewertung ein (Tab. 1).

Tab. 1 Wichtung der „Headline Criteria“³ (aus CoRWM 2006)

Headline Criterion	Weight (%)
Public Safety, individual, short term (up to 300 years)	23.3
Security	23.3
Burdens on Future Generations	16.0
Flexibility	16.0
Worker Safety	7.7
Environment	7.1
Implementability	4.0
Amenity	1.7
Socio-economic	0.9
Total	100

Der Autor hat sich aus zwei Gründen entschlossen, die MCDA-Anwendung im Rahmen der CoRWM-Arbeit kurz darzustellen: (i) Offensichtlich hat die Wahl der Gewichte großen Einfluss auf die Ergebnisse; aus Tab. 1 ist ersichtlich, dass in der Praxis zwischen den einzelnen Gewichten große Unterschiede auftreten können. (ii) Die Wahl der Gewichte reflektiert offensichtlich Wertungen und Wertentscheidungen, die *per definitionem* subjektiv sind. In Abb. 1, Box (7) wird explizit dargestellt, wie dieser subjektive Faktor in die Analyse eingeht. In der MCDA des CoRWM erfolgte neben der Berechnung mittels der in Tab. 1 dargestellten Gewichte eine Sensitivitätsanalyse unter Verwendung von aus Stakeholder-Befragungen abgeleiteten „limiting cases“ für die Gewichte. Außerdem wurden Sensitivitäten hinsichtlich der Zuweisung von Werten zu den Kriterien (Box (6)) untersucht.

³ „Two headline criteria are missing from the above weighted list of criteria:

- Public Safety, individual, long term (greater than 300 years). As explained in paragraph 8, disposal and storage options were compared over the short term (300 years) in the MCDA, and assessments on the long term safety of the disposal options were conducted elsewhere.
- Cost. The specialists considering the cost of the options provided their best estimate of the cost of each option. There was a great deal of uncertainty associated with their figures, and a resulting large spread between the low and high estimates. There was also less difference between the options than expected. ... CoRWM therefore decided to keep the cost criterion separate from the other criteria in the MCDA, and to assess the impact of cost through a form of sensitivity testing.“ (CoRWM 2006)

In (Nagra 2014 a, b) erfolgt eine Aggregation im oben erläuterten Sinn zunächst bei der für die Eignungsaussage herangezogenen „qualitativen Bewertung mit Nutzwertanalyse“. Diese Aggregation ist nach Auffassung des Autors durch zwei zu hinterfragende grundlegenden Merkmale gekennzeichnet: Zum einen sind Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen auf der jeweiligen Ebene der Aggregation gleich gewichtet, also gleichberechtigt. Auf der höchsten Ebene der Aggregation (gleichberechtigte Berücksichtigung aller Kriteriengruppen) spiegelt dies nach Auffassung des Autors tatsächlich eine getroffene Wertung wider: Dem Entscheidenden ist die Eignung bezüglich jeder der vier Kriteriengruppen genau gleich viel wert. Auf der Ebene der Aggregation von den Kriterien zur jeweiligen Kriteriengruppe kann die Gleichberechtigung jedoch nach Auffassung des Autors durchaus in Frage gestellt werden: Mit welcher Begründung kann z.B. behauptet werden, dass ‚Erosion‘ *genau* dieselbe Bedeutung wie ‚Nutzungskonflikte‘ für die ‚Langzeitstabilität‘ hat? Die analoge Frage stellt sich verschärft bei der Aggregation von den Indikatoren zu den Kriterien (eine beispielhafte Diskussion hierzu erfolgt unten im Hinblick auf den eigentlichen Gegenstand des vorliegenden Berichts, die Identifizierung eindeutiger Nachteile). Noch größere Probleme sieht der Autor jedoch in Bezug auf das zweite grundlegende Merkmal der Methode: Es ergibt sich eine volle Kompensierbarkeit von besseren versus schlechteren Bewertungen auf allen Aggregationsebenen. Dass dies problematisch ist, ist insbesondere auf der Ebene der Aggregation von Kriteriengruppen zu Gesamtbewertungen erkennbar: Ein Standortgebiet kann theoretisch auch dann als ‚geeignet‘ eingestuft werden, wenn es bezüglich einer Kriteriengruppe als ‚weniger geeignet‘ gilt.

Hinsichtlich der Identifizierung eindeutiger Nachteile ist jedoch festzustellen, dass sich aus der Zielsetzung in Etappe 2 des Sachplans (BFE, 2008) eine im Vergleich zu anderen Multikriterienanalysen spezielle Situation ergibt: Die Frage nach eindeutigen Nachteilen stellt sich dann separat für jedes entscheidrelevante Merkmal, eine Aggregation mit (subjektiv festzulegenden) Gewichten ist zunächst nicht erforderlich und allfällige Zielkonflikte spielen eine untergeordnete Rolle. Eine solche Aggregation kommt lediglich bei der Bewertung dieser entscheidrelevanten Merkmale anhand von Indikatoren zum Tragen. Diese wiederum ist kein rein subjektives Werturteil: Zum Beispiel könnte nach Einschätzung des Autors die relative Bedeutung der Indikatoren „Hydraulische Durchlässigkeit“, „Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums“, „Transmissivität präferenzzieller Freisetzungspfade“, „Selbstabdichtungsvermögen“, „Homogenität des Gesteinsaufbaus“, „Mächtigkeit“,

„Länge der massgebenden Freisetzungspfade“ und „Kolloide“ für das Merkmal „Wirksamkeit der geologischen Barriere“ durchaus anhand von Expertenurteilen und eingrenzenden Berechnungen quantifiziert werden. Es könnte auch untersucht werden, in wie weit sich diese Indikatoren tatsächlich im Hinblick auf das Merkmal gegenseitig kompensieren können.

Weiterhin ist festzustellen, dass formale Multikriterienanalysen mit Wichtungen eine Unabhängigkeit der Indikatoren voraussetzen⁴. Nach Auffassung des Autors ist eine solche Unabhängigkeit z.B. für die o.g. Indikatoren zur „Wirksamkeit der geologischen Barriere“ zumindest nicht *per se* ableitbar oder belegbar. Auch diesbezüglich wären Expertenurteile und eingrenzende Berechnungen hilfreich.

Subjektiv ist nach Auffassung des Autors dagegen die Entscheidung, was als *eindeutiger* Nachteil gilt, sei es für Indikatoren oder für Merkmale. Hier sind zwei Ebenen zu unterscheiden:

In der ersten Ebene stellt sich die Frage, was als Vergleichsgröße heranzuziehen ist: Geht es um die hinsichtlich des Indikators oder Merkmals *beste* tatsächlich existierende Option, so führt dies auf den „Direkten Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken-Schwächen-Profil“. Ist dagegen von Interesse, wie sich ein Indikator oder Merkmal für eine Option bezüglich der *Gesamtschau aller diesbezüglich besseren Optionen* darstellt, so kann dies anhand der „Outranking-Methode“ gezeigt werden. Setzt man schließlich einen *absoluten Maßstab* für ein Merkmal oder einen Indikator, liefert die „Malus-Bilanzierung“ diesbezügliche Informationen.

In der zweiten Ebene muss entschieden werden, wie stark sich eine Option hinsichtlich eines Indikators oder Merkmals von der o.g. Vergleichsgröße unterscheiden müsste, damit auf einen eindeutigen Nachteil (oder einen Hinweis auf einen solchen) geschlossen werden kann. Die diesbezügliche (subjektive!) Steuerung der Verfahren erfolgt über die Festlegung, dass Unterschiede von zwei (einer) Bewertungsstufe(n) von Interesse sind (Direkter Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken-

⁴ Gemeint ist nicht notwendigerweise eine statistische Unabhängigkeit im strengen Sinn, jedoch eine „preference independence“. „It means that the preference scores assigned to all options on one criterion are unaffected by the preference scores on the other criteria.“ (Department for Communities and Local Government London 2009) Der Begriff „preference score“ entspricht hier dem zugewiesenen Nutzwert.

Schwächen-Profil“) bzw. die Festlegung der Schwellenwerte („Outranking-Methode“, „Malus-Bilanzierung“, bei letzterem auch die Festlegung des Malus von 0.4).

4.2 Vor- und Nachteile der Methoden, Einfluss auf das Ergebnis und Potenzial zur Verzerrung der Resultate

Was sind die Vor- und Nachteile der einzelnen angewendeten Methoden und welchen Einfluss können diese auf das Ergebnis haben? Welches Potenzial gibt es zur Verzerrung der Resultate?

Nach dem im vorangegangenen Kapitel Gesagten sieht der Autor Nachteile der „qualitativen Bewertung mit Nutzwertanalyse“ in der vollen – und möglicherweise so nicht intendierten – Kompensation auf den Aggregierungsebenen.

Wie oben beschrieben, zielen die verwendeten Methoden zur Identifizierung eindeutiger Nachteile auf unterschiedliche Vergleichsgrößen (beste Option, Gesamtheit der Optionen, absoluter Maßstab). Insofern kann nach Auffassung des Autors für diese Methoden in keiner Weise von „Vor- und Nachteilen“ gesprochen werden. In (Department for Communities and Local Government London 2009) wird dargelegt:

„The main concern voiced about the outranking approach is that it is dependent on some rather arbitrary definitions of what precisely constitutes outranking and how the threshold parameters are set and later manipulated by the decision maker.

The outranking concept does, however, indirectly capture some of the political realities of decision making. In particular it downgrades options that perform badly on any one criterion (which might in turn activate strong lobbying from concerned parties and difficulty in implementing the option in question). It can also be an effective tool for exploring how preferences between options come to be formed. However, on balance,

its potential for widespread public use seems limited ..., notably in terms of many of the criteria set out in section 4.2.⁵

Nach Auffassung des Autors gilt dasselbe Argument („dependent on rather arbitrary definitions“) aber auch für die Festlegung der Bewertungsmaßstäbe für den „direkten Vergleich“ (zwei bzw. eine Bewertungsstufe Abstand) und die Malusbilanzierung (Schwellenwert und Malus von 0.4), vgl. Abschnitt 4.1.

Daher zieht es der Autor auch vor, statt von „Verzerrungen der Resultate“ eher von „Unterschieden“ zu sprechen. Welche dies potentiell sein können, ist nach dem bisher Gesagten offensichtlich:

Existiert ein „positiver Ausreißer“, also eine Option, die bezüglich eines Merkmals oder Indikators besonders vorteilhaft ist, so werden durch den „Direkten Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken-Schwächen-Profil“ besonders viele eindeutige Nachteile oder Hinweise (der anderen Optionen) identifiziert. Dagegen gehen in die Bewertung nach der („Outranking-Methode“) nicht nur ein solcher „Ausreißer“, sondern alle Optionen ein, die bzgl. des Merkmals oder Indikators besser sind als die betrachtete Option, der „Ausreißer-Effekt“ wird also nivelliert. Schließlich ergeben sich umso mehr Nachteile (oder Hinweise) aus der „Malus-Bilanzierung“, je anspruchsvoller der (physikalisch begründete) Schwellenwert gewählt wird. Im Extremfall können dann sogar für *alle* Optionen (bis auf eine) eindeutige Nachteile ausgemacht werden.

⁵ Im angesprochenen Abschnitt 4.2 werden genannt:

- „internal consistency and logical soundness
- transparency
- ease of use
- data requirements not inconsistent with the importance of the issue being considered
- realistic time and manpower resource requirements for the analysis process
- ability to provide an audit trail, and
- software availability, where needed.“

4.3 Technische Korrektheit und Nachvollziehbarkeit der zusammenfassenden Bewertung

Wurde die zusammenfassende Bewertung mittels der vier Methoden technisch korrekt und nachvollziehbar ausgeführt?

Nach Auffassung des Autors erfolgte die Bewertung technisch korrekt. Es gehörte *nicht* zu den Aufgaben des Autors, die in (Nagra 2014b) dargestellten Ergebnisse einzeln nachzurechnen. Zur Klärung der Frage, ob bei der Outranking-Methode die mit dem Abstand von 0.2 gestuften Nutzwerte oder lediglich die fünf Bewertungsstufen gemäß (Nagra 2014a, S. 37) verwendet wurden, hat der Autor jedoch auf Wunsch des ENSI eine Stichprobe überprüft. Er hat dabei festgestellt, dass die mit dem Abstand von 0.2 gestuften Nutzwerte verwendet wurden und ist auch in einem Fall (Schwäche-Präferenzfluss für das entscheidrelevante Merkmal „Wirksamkeit der geologischen Barriere“ für das SMA-Standortgebiet Wellenberg) auf eine Abweichung von einem Prozentpunkt aufmerksam geworden, die möglicherweise auf Rundungseffekte zurückzuführen ist.

Hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit ist einzuschätzen, dass die Dokumentation nach Auffassung des Autors insgesamt instruktiv, übersichtlich und nachvollziehbar ist. Der Autor sieht jedoch folgende Ausnahmen:

- Die Verwendung von Bewertungsstufen für die Nutzwerte mit dem Abstand von 0.2 erscheint dem Autor angesichts der bestehenden Ungewissheiten als zu fein. Die in (Nagra 2014a) vorgenommenen Rundungen, die dann zur Identifizierung eindeutiger Nachteile (Abstand von 2 Stufen) bzw. diesbezüglichen Hinweisen (1 Stufe) führten, sollten erklärt oder besser noch vermieden werden. Der Satz „Die mit * versehenen Grössen bezeichnen abgerundete (trunkierte) Werte.“ (Nagra 2014c) ist nicht hinreichend informativ. Auf die diesbezügliche Frage 49 des ENSI erteilte die Nagra die Auskunft „Die Einstufung erfolgt anhand der Differenz der Bewertungsstufen (d.h. ohne Berücksichtigung der Feinabstufung der Bewertungen)“.
- Die so genannten Histogramme für die Merkmale (Nagra 2014a, Fig. 5.2-1, -2 unten links) stellen diese gleichberechtigt dar; die Histogramme für die Indikatoren (selbe Abbildungen unten rechts) weisen den Merkmalen optisch ein größeres Gewicht zu, für die es mehr Indikatoren gibt. Dies sollte erklärt werden.

- „Die 'Outranking-Methode' zeigt relative Unterschiede zwischen Alternativen auf und weist auf Unvergleichbarkeiten hin“ (Nagra 2014c). Diese Aussage erschloss sich hinsichtlich der Unvergleichbarkeiten dem Autor aus der Darstellung im Bericht nicht. In ihrer Antwort zur diesbezüglichen Frage Nr. 52 des ENSI führte die Nagra unter Bezugnahme auf (Oberschmidt et al. 2009) aus, dass sich eine Unvergleichbarkeit dann ergibt, wenn eine Variante sowohl einen höheren Stärken- als auch einen höheren Schwächenpräferenzfluss als eine andere Variante hat. „Beispiel (vgl. Fig. C.3-1): SMA-SR und SMA-NL sind unvergleichbar, d.h. sie lassen sich anhand der beiden Präferenzflüsse nicht eindeutig rangieren. Ebenso sind HAA-JO und HAA-ZNO unvergleichbar.“
Damit ergibt sich für den Autor des vorliegenden Berichts die Schlussfolgerung, dass allfällige Unvergleichbarkeiten keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Ermittlung eindeutiger Nachteile hatten.
Unvergleichbarkeiten in diesem Sinn sind Ausdruck von „Zuspitzungen“ von Zielkonflikten. Die Frage nach „eindeutigen Nachteilen“ vermeidet nach dem Verständnis des Autors *per se* den Umgang mit derartigen Zielkonflikten (s. Kapitel 4.1.). Eine Möglichkeit, allfällige Zielkonflikte auch grafisch zu systematisieren und zu veranschaulichen ist die Technik der Hassediagramme (Pudenz et al. 2002, Gutberlet 2015).
- Das Expertenurteil beim Outranking bezieht sich auf den methodischen Aspekt: Es wird ein Schwellenwert für den Schwäche-Präferenzfluss festgelegt, was dies materiell bedeutet ist nicht klar ersichtlich. Das Expertenurteil zum Malus bezieht sich dagegen direkt auf den inhaltlichen Aspekt: Die Indikator- und Merkmalswerte stehen für materielle Sachverhalte – ein Malus von mehr als 0.4 bedeutet bei einem Schwellenwert von 3.5 schlicht eine Einstufung als „bedingt günstig“ oder „ungünstig“. Dies sollte klar dargelegt werden.

4.4 Methodische Diversität und alternative Methoden

Ist die von der Nagra angewendete methodische Diversität sinnvoll gewählt? Ist die Wahl der angewandten Methoden genügend begründet? Existieren alternative Methoden, um entsprechende Vergleiche durchzuführen bzw. eindeutige Nachteile zu identifizieren? Wenn ja, könnten diese zu einem anderen Ergebnis führen, d.h. ist die Auswahl der Nagra belastbar im Hinblick auf das Ergebnis?

Nach Auffassung des Autors und angesichts des oben Gesagten zu den Haupteigenschaften der gewählten Methoden ist die methodische Diversität sinnvoll gewählt. Die ergänzenden Methoden liefern nur sehr wenige abweichende Ergebnisse (etwa für die „Bautechnische Eignung“ für ein SMA-Lager in Südranden). Der Autor stellte sich jedoch die Frage, warum die alternativen Methoden („Outranking“, „Malus-Bilanzierung“) lediglich zur Ableitung „zusätzlicher“ Hinweise auf eindeutige Nachteile herangezogen wurden; sie hätten umgekehrt auch zur Argumentation (und ggf. Relativierung) hinsichtlich von durch den direkten Vergleich identifizierten Nachteilen oder Hinweisen dienen können, falls diese durch die beiden anderen Methoden nicht bestätigt werden.

Auf die diesbezügliche Frage 53 des ENSI gab die Nagra die Auskunft „In zwei Fällen ergeben sich aus dem direkten Vergleich abgeleitete eindeutige Nachteile, welche weder durch die Outranking-Methode noch durch die Malus-Bilanzierung bestätigt werden. Dabei handelt es sich um den Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' beim Standortgebiet Wellenberg und um den Indikator 'Platzangebot untertags' beim Standortgebiet Jura-Südfuss. In beiden Fällen wird argumentativ dargelegt, wieso diese Hinweise dennoch als eindeutige Nachteile eingestuft werden (vgl. NTB 14-01 S. 326-327, S. 331-332 und S. 339).“ Für den Autor ergibt sich daher die Schlussfolgerung, dass die Nagra den oben erwähnten Aspekt von Nachteilen, die durch die alternativen Methoden nicht bestätigt werden, in die Erwägung und Argumentation mit einbezogen hat, eine diesbezügliche Dokumentation und Diskussion in (Nagra 2014a) jedoch angemessen gewesen wäre.

Es existieren weitere, z.T. deutlich komplexere Methoden zur Multikriterienanalyse. Insbesondere reklamieren einige Methoden für sich, dass sie auch in der Lage sind, Ungewissheiten hinsichtlich der Indikatoren oder Merkmale in die Betrachtung einzubeziehen. Diese Methoden sind hinsichtlich ihrer Praktikabilität jedoch umstritten (Department for Communities and Local Government London 2009). Im Einzelnen

handelt es sich um Methoden auf probabilistischer Basis (z.B. Bayesian Belief Nets, Utility-basierte und Fuzzy-basierte Methoden).

Nach Auffassung des Autors wäre eine Anwendung dieser Methoden auch angesichts des gegenwärtigen Wissensstands hinsichtlich der Geologie der Standortgebiete unangemessen – auch Ungewissheit müsste adäquat charakterisiert bzw. quantifiziert werden. So wird z.B. aus (Fenton & Neil 2000) ersichtlich, welche Ansprüche an eine solche Charakterisierung und Quantifizierung entstehen: Neben den allen Methoden der Multikriterienanalyse gemeinsamen Schritten (Definition von Zielsetzungen, Kriterien, Randbedingungen) ist zu ermitteln, welche Kriterien und welche sie beeinflussenden Faktoren⁶ ungewiss sind. Für diese sind Wahrscheinlichkeitsverteilungen abzuleiten. Im Ergebnis entstehen durch die Anwendung der Technik der Bayesian Belief Nets Wahrscheinlichkeitsaussagen für die Kriterien; (Fenton & Neil 2000) schließen mit dem Hinweis:

„As a result ... you will be able calculate a value (within some probability bounds in the case of the uncertain criteria) for each criterion for a given action. This means that you can apply traditional MCDA techniques to combine the values for a given action and then to rank the set of actions. In the case of the uncertain criteria you could, for example, apply values for ‘most likely’ as well as the upper and lower bounds. If the result of the MCDA analysis produces a unique ‘best’ action which satisfies all of the defined constraints then you are done. If not you will have to relax various constraints or introduce new actions (MCDA deals with these issues and it is beyond the scope of this paper).“⁷

Dieser Hinweis verdeutlicht, dass neben die Schwierigkeit, Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Indikatoren abzuleiten, noch die Schwierigkeit tritt, aus den resultierenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Merkmale Handlungsanweisungen (zur Auswahl bzw. Zurückstellung von Standortgebieten) abzuleiten. Dies gilt nach Auffassung des Autors unabhängig von der gewählten Technik zur Propagation von Ungewissheiten (hier: Bayesian Belief Nets) generell für probabilistische Methoden. Der Autor ist der Meinung, dass die Ableitung von

⁶ In der Terminologie von (Fenton & Neil 2000) „criteria“ und „factors that will affect them“; dies entspricht im vorliegenden Fall entscheidungsrelevanten Merkmalen und Indikatoren.

⁷ „action“ entspricht in der Terminologie von (Fenton & Neil 2000) der Entscheidung für ein bestimmtes Standortgebiet.

Wahrscheinlichkeitsverteilung für Indikatoren im hier diskutierten Fall dem vorhandenen Wissensstand zu den Standortgebieten nicht angemessen ist. Darüber hinaus würde eine Entscheidung auf der Grundlage der für die Merkmale abgeleiteten Wahrscheinlichkeitsverteilungen wenig transparent sein, es träte die Schwierigkeit der Ableitung von Handlungsanweisungen aus den Kriterien auf und es würde somit eine Objektivität vorgetäuscht, die aufgrund der beschriebenen Situation in Wahrheit nicht besteht.

Nach Auffassung des Autors werden die bestehenden Ungewissheiten durch die Sensitivitätsprüfungen, wo neben dem „maßgebenden Fall der Einengung“ im „direkten Vergleich“ auch alternative konzeptuelle Annahmen und alternative Lagerperimeter betrachtet wurden, dem Stand der Etappe 2 *methodisch* angemessen berücksichtigt. Theoretisch hätte zwar die Möglichkeit bestanden, alle für den „maßgebenden Fall“ angewandten Methoden auch für alle Alternativen formal korrekt und vollständig durchzuführen, dies hätte jedoch nach Auffassung des Autors zu einer Überkomplexität und Unübersichtlichkeit geführt, die letztlich die Entscheidungen nicht gestützt sondern erschwert hätte. Die *inhaltliche* Überprüfung, ob die gewählten Alternativen geeignet sind, die bestehenden Ungewissheiten abzudecken, war nicht Gegenstand des Expertenauftrags.

Potential hinsichtlich der Erzeugung abweichender Ergebnisse hat nach Auffassung des Autors eher die Wahl alternativer Werte für die die einzelnen Verfahren steuernden Parameter. Dies gilt auf allen Ebenen der Parametrisierung:

1. Zunächst stellt sich die Frage, wie die Nutzwerte (Skala 1-5) aus den (qualitativen oder quantitativen) Beschreibungen für die einzelnen Indikatoren abgeleitet wurden. Prinzipiell gibt es hier die Möglichkeiten, sich mit den Rändern der Skala an der *bestmöglichen* bzw. *schlechtestmöglichen* Qualität zu orientieren („global scaling“). Alternativ kann eine Orientierung an der besten

verfügbaren / schlechtesten verfügbaren Qualität erfolgen („local scaling“).⁸ Auch für die Zuweisung von Zwischenstufen existieren verschiedene Ansätze („value function“, „direct rating“, „Analytic Hierarchy Process AHP“, ...). Die Beurteilung der Ableitung der Nutzwerte lag außerhalb des hier beschriebenen Expertenauftrags.

2. Weiterhin ist die Wahl der Ansätze für die Aggregation von Nutzwerten für einzelne Indikatoren hin zu Nutzwerten für Merkmale von Bedeutung. Wie beschrieben wurden für zwei Merkmale ein nicht-kompensatorischer Ansatz (Wahl des schlechtesten Indikatorwerte) verwendet. Dies entspricht einer logischen UND-Verknüpfung der Indikatoren⁹. Ohne diesbezüglich beauftragt worden zu sein, möchte der Autor doch anmerken, dass ihm dieser Ansatz für die bautechnische Machbarkeit unmittelbar schlüssig erscheint, er dem ENSI jedoch eine inhaltliche Überprüfung zum Merkmal Langzeitstabilität empfiehlt. Für die beiden anderen Merkmale erfolgte ein kompensatorischer Ansatz; die Beiträge wurden linear und gleichwertig gewichtet. Dem Autor erscheint diese Wahl der Gewichte als beliebig und nicht ausreichend begründet. Wie oben ausgeführt, wäre eine Festlegung anhand einer Expertenbeurteilung und im Fall des Merkmals „Wirksamkeit der geologischen Barriere“ ggf. auch anhand eingrenzender Berechnungen durchaus sinnvoll gewesen. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob die Indikatoren tatsächlich paarweise unabhängig sind, wie dies für den kompensatorischen Ansatz theoretisch erforderlich gewesen

⁸ „The choice between local and global should make no difference to the ranking of options. An advantage of global scaling is that it more easily accommodates new options at a later stage if these record performances that lie outside those of the original set. However it has the disadvantages of requiring extra, not necessarily helpful judgements in defining the extremes of the scale and ... it lends itself less easily than local scaling to the construction of relative weights for the different criteria.“ (London 2009). Diese Einschätzung ist nach Auffassung des Autors richtig, aber nicht vollständig auf den hier relevanten Fall der Ermittlung eindeutiger Nachteile übertragbar: Falls die Standortgebiete bezüglich eines Indikators recht ähnlich sind, kann „local scaling“ *trotzdem* zur (dann unangemessenen) Identifizierung eindeutiger Nachteile führen. Daher ist hier „global scaling“ vorzuziehen.

⁹ Die geologische Tiefenlager ist nur bautechnisch machbar bei hinreichender Tiefenlage UND hinreichenden geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnissen UND hinreichendem Platzangebot.

wäre.¹⁰ Hinsichtlich der Indikatoren zur „Wirksamkeit der geologischen Barriere“ bestehen hier seitens des Autors Zweifel, ebenso wie hinsichtlich der Frage, ob wirklich eine vollständige Kompensierbarkeit vorliegt.

3. Schließlich wurde festgelegt, für welchen Unterschied eines Indikators oder Merkmals von der jeweiligen Vergleichsgröße auf einen eindeutigen Nachteil (oder einen Hinweis auf einen solchen) geschlossen werden kann (s. oben). Dies betrifft die Festlegung, dass Unterschiede von zwei (einer) Bewertungsstufe(n) von Interesse sind („Direkter Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken-Schwächen-Profil“) bzw. die Festlegung der Schwellenwerte („Outranking-Methode“, „Malus-Bilanzierung“). Insbesondere der diesbezügliche bloße Verweis auf ein „Expertenurteil“ durch die Nagra ist nach Auffassung des Autors der Bedeutung der Wahl dieser Werte bzw. Kriterien nicht angemessen. Auf die diesbezügliche Frage 51 des ENSI erklärte die Nagra: „Der Einfluss dieser Steuerparameter wurde bei der Erarbeitung und Festlegung der Methodik iterativ geprüft. Die gewählten Schwellenwerte sind als Resultat dieses iterativen Vorgehens zu verstehen. Es wurde aber keine systematische Sensitivitätsanalyse bzgl. dieser Schwellenwerte durchgeführt.“

In den meisten Multikriterienanalysen sind diese verschiedenen Ebenen der Parametrisierung durch (subjektive) Werturteile geprägt; dies gilt insbesondere für die Wahl von Gewichten (Punkt 2). Wie oben erläutert, sieht der Autor des vorliegenden Berichts eine solche Subjektivität eher in den unter Punkt 3 beschriebenen Aspekten. Dies ändert jedoch nichts an der grundlegenden Feststellung:

„A key feature of MCA is its emphasis on the judgement of the decision making team, in establishing objectives and criteria, estimating relative importance weights and, to some extent, in judging the contribution of each option to each performance criterion. The subjectivity that pervades this can be a matter of concern. Its foundation, in principle, is the decision makers' own choices of objectives, criteria, weights and

¹⁰ Falls Abhängigkeiten von Indikatoren auftreten, wäre der einfachste Ansatz, diese Indikatoren gemeinsam zu betrachten, sie also in einen Indikator auf einer Meta-Ebene zu aggregieren. Der Autor sieht es allerdings nicht als zweckmäßig an, eine solche Meta-Ebene *zusätzlich zwischen* den Ebenen „Indikator“ und „entscheidrelevantes Merkmal“ einzuführen, eher könnte z.B. direkt eine Einschätzung der „Wirksamkeit der geologischen Barriere“ anhand der einzelnen Indikatoren über abschätzende Rechnungen geschehen. Eine zweite Möglichkeit wäre die Arbeit auf der Basis einer Nicht-Kompensierbarkeit der abhängigen Indikatoren. Schließlich bestünde die Möglichkeit mit deutlich komplexeren MCA-Methoden zu arbeiten, wie sie in Kapitel 4.1 diskutiert wurden.

assessments of achieving the objectives, although 'objective' data such as observed prices can also be included. MCA, however, can bring a degree of structure, analysis and openness to classes of decision that lie beyond the practical reach of CBA." (Department for Communities and Local Government London 2009) (MCA = Multicriteria analysis, CBA = Cost-benefit analysis).

„The purpose [of multicriteria decision analysis] is to serve as an aid to thinking and decision making, but not to take the decision.“ (Department for Communities and Local Government London 2009)

Umso mehr wäre es nach Auffassung des Autors (und in Übereinstimmung mit den Aussagen in der Literatur) geboten, alle Parametrisierungen (insbesondere die unter Punkt 3 beschriebenen, aber auch die Wahl der Gewichte bei der „qualitativen Bewertung mit Nutzwertanalyse“) einer Sensitivitätsanalyse zu unterziehen, um so zu klären, welchen Einfluss subjektive Entscheidungen auf das Ergebnis der Analyse hatten.

Es ist aber andererseits anzumerken, dass die hier diskutierten formalen / quantitativen Methoden eher als Indizien denn als Nachweise für eindeutige Nachteile herangezogen wurden; die finale Entscheidung fiel aufgrund argumentativer / qualitativer Bewertung (Bsp. Platzangebot Jura-Südfuß). Auch ergänzende Evidenz wie z.B. die Dosisrechnungen wurden argumentativ herangezogen (Bsp. Schutz vor Erosion HAA Jura-Ost).

5 Literatur

BFE, 2008. Bundesamt für Energie: Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil. Ittigen.

http://www.bfe.admin.ch/radioaktiveabfaelle/01277/05191/index.html?lang=de&dossier_id=05195

Brans, J.P., Mareschal, B. & Vincke, P., 1986: How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method for MCDM. EJOR 24, 228-238

Brans, J.P. & Mareschal, B., 2005: PROMETHEE Methods. In: J. Figueira, S. Greco & M. Ehrgott (eds.): Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, pp. 163-196. Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London

CoRWM, 2006. Committee on Radioactive Waste Management: Managing our Radioactive Waste Safely. CoRWM's Recommendations to Government.

https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/294118/700_-

[CoRWM July 2006 Recommendations to Government pdf.pdf](#)

Department for Communities and Local Government London, 2009. Multi-criteria analysis: a manual. Wetherby.

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, 2013: Präzisierungen zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etappe 2 SGT. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. Brugg.

<http://static.ensi.ch/1359108618/33-154-web.pdf>

Fenton, N. & Neil, M, 2000: Making Decisions: Using Bayesian Nets and MCDA.

https://www.eecs.qmul.ac.uk/~norman/papers/bbns_and_mcda.pdf

Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. (eds.), 2005: Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. Springer

French, S., 2013: Cynefin, statistics and decision analysis. Journal of the Operational Research Society (2013) 64, 547–561

- Geldermann, J., 1998: Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung. Diss. Univ. Karlsruhe 1998. Fortschrittsbericht VDI, Reihe 16, Nr. 105 (1999)
- Geldermann, J., Spengler, T. & Rentz, O., 2000: Fuzzy Outranking for Environmental Assessment. Case Study: Iron and Steel Making Industry. Fuzzy Sets and Systems – Special Issue on Soft Decision Analysis 115, 45-65
- Geldermann, J. & Schöbel, A., 2011: On the similarities of some multi-criteria decision analysis methods. J. of Multi-Crit. Decis. Anal. 18/3-4, 219-230
- Gutberlet, D., 2015: Can multi-criteria analysis models support the site selection for a repository for heat-generating waste? Mining Report 151 (2015) No. 3
- Hubbard, D.W., 2009: The Failure of Risk Management: Why It's Broken and How to Fix It. John Wiley & Sons
- Keeney, R.L. & Raiffa, H., 1976: Decisions with Multiple Objectives; Preferences and Value Tradeoffs. John Wiley & Sons
- Lemaire, M., 2014: Mechanics and Uncertainty. John Wiley & Sons
- McNamee, P., Celona, J., 2008: Decision Analysis for the Professional. SmartOrg, Inc.
- Nagra, 2014a. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2. Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Technischer Bericht 14-01, Textband. Wettingen.

Nagra, 2014b. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2. Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Technischer Bericht 14-01, Anhang C: Ergebnisse der qualitativen Bewertung und des sicherheitstechnischen Vergleichs der Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete. Wettingen.

Nagra, 2014c. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2. Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Technischer Bericht 14-01, Anhang D: Verwendete MCDA-Verfahren für die Bewertung und Einengung der Wirtgesteine und geologischen Standortgebiete. Wettingen.

Oberschmidt, J., Geldermann, J. & Ludwig, J., 2009: Entscheidungsunterstützung zur Auswahl von Energietechnologien unter Berücksichtigung zeitlich veränderlicher Präferenzen. 6. Internationalen Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, IEWT

Pudenz, S., Brüggemann, R., Voigt, K. & Welzl, G., 2002: Nachhaltige Entwicklung von Managementstrategien: Multikriterielle bewertungs- und Entscheidungshilfe-Instrumente. 6. SETAC-Tagung, Übersichtsbeitrag, UWSF – Z Umweltchem Ökotox 14 (1), 2002

Reichert, P., Schuhwirth, N. & Langhans, S.D., 2011: MCWM – Ein Konzept für multikriterielle Entscheidungsunterstützung im Wassermanagement. Wasser, Energie, Luft 103/ 2, 139-148

Stewart, T.J., French, S., Rios, J., 2012: Integrating multicriteria decision analysis and scenario planning—Review and extension. Omega 41 (2013) 679–688

Strassert, G., 2013: Das Ordnen von Optionen und die Theorie der kollektiven Entscheidung: Wie durch individuelle Ordnungen kollektive Ordnungen und zirkuläre Triaden hergestellt werden. Frankfurt am Main: Peter Lang AG

Zangemeister, C., 1976: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. Diss. Techn. Univ. Berlin 1970, 4. Aufl., München, Wittemann

Zionts, S., 1979: MCDM: If Not a Roman Numeral, then What? Interfaces, Vol. 9, No. 4 (Aug., 1979), pp. 94-101

Technische Universität Clausthal
Institut für Endlagerforschung

Adolph-Roemer-Straße 2A
38678 Clausthal-Zellerfeld

Tel. +49 (0) 5323 72-2536
Email: ief@tu-clausthal.de
<http://www.ief.tu-clausthal.de/>