



BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR  
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

# Methoden für sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertungen im Standortauswahl- verfahren (MABeSt)

Vorhaben 4718F13001

**AUFTRAGNEHMER:IN**

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

G. Frieling  
K. Fischer-Appelt  
T. Beuth  
G. Bracke



# **Methoden für sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertungen im Standortauswahlverfahren (MABeSt)**

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autor:innen. Das BASE übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

*Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer:in wieder und muss nicht mit der des BASE übereinstimmen.*

**BASE-007/21**

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
urn:nbn:de:2020062422234

Berlin, Juni 2020

## **Impressum**

**Bundesamt  
für die Sicherheit  
der nuklearen Entsorgung  
(BASE)**

BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR  
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

**Auftragnehmer:in**  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH, Köln

G. Frieling  
K. Fischer-Appelt  
T. Beuth  
G. Bracke

030 184321-0  
[www.base.bund.de](http://www.base.bund.de)

Stand: Juni 2020

## **MABeSt - Methoden für si- cherheitsgerichtete Abwä- gungen und vergleichende Bewertungen im Standort- auswahlverfahren**

FKZ 4718F13001

Gerd Frieling  
Klaus Fischer-Appelt  
Thomas Beuth  
Guido Bracke

November 2019  
590007

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde lie-  
gende Ressortforschungsvorhaben  
(BMU) wurde mit Mitteln des Bun-  
desamtes für kerntechnische Ent-  
sorgungssicherheit (BfE) unter dem  
Kennzeichen 4718F13001 durchge-  
führt.

Die Verantwortung für den Inhalt die-  
ser Veröffentlichung liegt beim Auf-  
tragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und  
Meinung des Auftragnehmers wie-  
der und muss nicht mit der Meinung  
des Auftraggebers übereinstimmen.

## **Deskriptoren**

Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Standortauswahlgesetz (StandAG), Standortauswahl, Abwägungen, vergleichende Bewertungen, Methodik, Multikriterienanalyse

## **Kurzfassung**

Die GRS recherchierte im Rahmen des Vorhabens 4718F13001 „MABeSt - Methoden für sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertungen im Standortauswahlverfahren“ im Auftrag des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) den Stand von Wissenschaft und Technik (W & T) in Bezug auf generelle sicherheitsgerichtete Bewertungs- und Vergleichsmethoden. Die spezifischen Herausforderungen des Standortauswahlverfahrens nach dem Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (im Folgenden StandAG) wurden ermittelt und die Relevanz und Anwendbarkeit der Bewertungs- und Vergleichsmethoden für diese untersucht.

Dazu wurden die Aufgabenstellungen bzw. Verfahrensschritte nach StandAG, in denen Abwägungen bzw. vergleichende Bewertungen erfolgen, einzeln identifiziert. Einhergehend mit dieser Recherche wurden für die relevanten Verfahrensschritte die Herausforderungen in Bezug auf Abwägungen bzw. vergleichende Bewertungen aufgezeigt.

Der Stand von Wissenschaft und Technik für sicherheitsgerichtete Bewertungs- und Vergleichsmethoden, wurde mit Bezug zu Standortauswahlverfahren im In- und Ausland und auch anhand methodischer Herangehensweisen aus anderen Fachgebieten (z. B. der Deponiestandortauswahl) gesichtet und ausgewertet. Die identifizierten Methoden (z. B. aus der Entscheidungstheorie) wurden dargestellt und deren Anwendbarkeit für die relevanten Verfahrensschritte nach StandAG untersucht.

Für die methodische Ableitung einer Gesamtbewertung bzw. eines Vergleiches von Handlungsalternativen bzw. Untersuchungsräumen, auf der Grundlage unterschiedlicher Bewertungskriterien, erscheinen multikriterielle Methoden aus dem Bereich MADM (Multi Attribute Decision Making) als gut geeignet.



## **Abstract**

GRS reviewed the state-of-the-art of science and technology regarding methodologies for safety-orientated assessment and comparative evaluation within the project 4718F13001 „MABeSt - Methoden für sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertungen im Standortauswahlverfahren“ by order of the Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management (Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)). The specific challenges of the procedure from the Act on the Search for and Selection of a Site for a Disposal Facility for High-Level Radioactive Waste (Site Selection Act – StandAG) were identified and the relevance and applicability of assessment and decision on those were studied.

The tasks and procedural steps of the StandAG, which imply assessment and comparative evaluation, were identified. Along with this the challenges regarding assessment and comparative evaluation were highlighted.

The state-of-the-art of science and technology regarding methodologies for safety-orientated assessment and comparative evaluation related to the site selection procedure in Germany was screened for its basis, its application in several national projects at home and abroad, and methodological approaches in other fields (site selection of dumps) reviewed and evaluated.

The methodologies for multi-criterial assessment and decision (e.g. from decision theory) were presented and its applicability for the relevant steps of site selections procedure (StandAG) were analyzed.

For the methodical derivation of an overall assessment or a comparison of alternative objects on the basis of different evaluation criteria, multi-criteria methods from the categorie MADM (Multi-Attribute Decision Making) seem to be well suited.





## Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
	<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	2
1.2	Standortauswahlverfahren .....	3
1.3	Sicherheitsuntersuchungen und Sicherheitsanforderungen .....	6
<b>2</b>	<b>Verfahrensschritte des StandAG und deren Herausforderungen</b> .....	<b>11</b>
2.1	Phase 1: Ermittlung von Teilgebieten und Standortregionen.....	12
2.1.1	Phase 1A - Ermittlung von Teilgebieten gemäß § 13 StandAG .....	13
2.1.2	Phase 1B - Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung gemäß § 14 StandAG .....	19
2.1.3	Phase 1C - Entscheidung über übertägige Erkundung und Erkundungsprogramme gemäß § 15 StandAG .....	26
2.2	Phase 2: Übertägige Erkundung und Festlegungen für untertägige Erkundungen .....	28
2.2.1	Phase 2A - Übertägige Erkundung und Vorschlag für untertägige Erkundung gemäß § 16 StandAG .....	28
2.2.2	Phase 2B - Festlegung Standorte für die untertägige Erkundung gemäß § 17 StandAG .....	35
2.3	Phase 3: untertägige Erkundung und Standortentscheidung .....	37
2.3.1	Phase 3A - Untertägige Erkundung und Standortvorschläge gemäß § 18 StandAG .....	38
2.3.2	Phase 3B - Abschließender Standortvergleich und Standortvorschlag gemäß § 19 StandAG .....	44
2.3.3	Phase 3C - Standortentscheidung durch Bundestag und Bundesrat gemäß § 20 StandAG .....	47
2.4	Zusammenfassung der relevanten Verfahrensschritte für Abwägungen und vergleichende Bewertungen.....	48

<b>3</b>	<b>Grundlagen der Entscheidungstheorie</b> .....	<b>55</b>
<b>4</b>	<b>Literaturrecherche zur Anwendung von (multikriteriellen) Bewertungsmethoden</b> .....	<b>65</b>
4.1	Vorhaben in Deutschland.....	65
4.1.1	Verbundforschungsprojekt „Vergleichende Sicherheitsanalysen“ (VerSi I).....	65
4.1.2	„Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen“ (VerSi II).....	71
4.1.3	Optionenvergleich Asse.....	76
4.1.4	Auswahl eines Zwischenlagers für rückgeholte Abfälle.....	76
4.1.5	Verbundvorhaben ENTRIA.....	81
4.2	Vorhaben im Ausland.....	84
4.2.1	Schweiz.....	84
4.2.2	Kroatien.....	97
4.2.3	Sonstige Länder.....	99
4.3	Bewertungsmethoden in anderen Themenbereichen.....	109
4.3.1	Standortsuche für Deponien.....	110
4.3.2	Bewertung von Strategien im dynamischen Verkehrsmanagement.....	112
4.3.3	Analyse und Vergleich von Methoden zur integrierten Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen im Schienenverkehr.....	113
4.3.4	Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme.....	114
4.4	Zusammenfassende Darstellung der Literaturrecherche.....	115
<b>5</b>	<b>Multikriterielle Methoden</b> .....	<b>117</b>
5.1	Zusammenstellung von multikriteriellen Methoden in der Literatur.....	117
5.2	Klassifizierung (Kategorisierung) der Methoden(-kategorien).....	120
5.3	Nutzenbasierte Methoden.....	124
5.3.1	Additive Methoden: SAW (Simple Additive Weighting) und SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique).....	125
5.3.2	Nutzwertanalyse (NWA).....	126

5.3.3	AHP (Analytic Hierarchy Process) .....	129
5.3.4	ANP (Analytic Network Process).....	133
5.4	Outranking Methoden .....	134
5.4.1	PROMETHEE .....	134
5.4.2	Hasse-Diagramm.....	141
5.5	Weitere Methoden und Verfahren .....	143
5.5.1	Direkter Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken- Schwächen-Profil.....	143
5.5.2	Malus-Bilanzierung .....	145
5.5.3	Verbal-argumentative Methode .....	146
5.5.4	Ökologische Risikoanalyse .....	147
5.6	Berücksichtigung von Unsicherheiten/Ungewissheiten .....	148
5.7	Zusammenfassende Darstellung der multikriteriellen Methoden .....	152
<b>6</b>	<b>Anwendung der Methoden .....</b>	<b>163</b>
6.1	Bisherige Anwendungen ausgewählter Verfahren.....	163
6.2	Beschreibung eines Entscheidungsproblems.....	166
6.2.1	Definition der Problemstellung bzw. des Zielsystems (Schritt 1) .....	168
6.2.2	Modellbildung – Festlegung der Modellkonzepte (Schritt 2) .....	170
6.2.3	Auswahl der Bewertungskriterien (Schritt 3) .....	171
6.2.4	Kriterienausprägungen: Skalentypen, Ungewissheiten (Schritt 4).....	173
6.2.5	Ermittlung der Gewichtungen und Präferenzen für Kriterien (Schritt 5) ..	175
6.2.6	Aggregation der Informationen (Schritt 6) .....	176
6.2.7	Berücksichtigung von Ungewissheiten (Schritt 7).....	179
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>183</b>
7.1	Mögliche Anwendung der entscheidungstheoretischen Methoden auf das Standortauswahlverfahren .....	183
7.2	Ausblick .....	190
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>193</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>215</b>

	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>217</b>
<b>A</b>	<b>Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte im StandAG.....</b>	<b>219</b>
A.1	Phase 1A (§ 13 StandAG) .....	224
A.2	Phase 1B (§ 14 StandAG) .....	238
A.3	Phase 1C (§ 15 StandAG) .....	247
A.4	Phase 2A (§ 16 StandAG) .....	252
A.5	Phase 2b (§ 17 StandAG).....	259
A.6	Phase 3A (§ 18 StandAG) .....	265
A.7	Phase 3B (§ 19 StandAG) .....	272
A.8	Phase 3C (§ 20) .....	276

# 1 Einführung

Im Standortauswahlverfahren nach dem „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle“ (im Folgenden StandAG genannt) /STA 17/ soll durch eine kriteriengesteuerte, schrittweise, flächenmäßige Eingrenzung der Standort für hochradioaktive Abfälle mit „bestmöglicher Sicherheit“ nach StandAG in Deutschland gefunden werden.

Zu Beginn des Standortauswahlverfahrens werden von der BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung) aus einer zunächst bestehenden, voraussichtlich heterogenen geowissenschaftlichen Datenbasis der Bundesrepublik Deutschland, s. g. Teilgebiete mit günstigen geologischen Voraussetzungen identifiziert. Die heterogene Datenbasis ergibt sich aus dem unterschiedlichen Wissensstand bezüglich der einzelnen Gebiete. Im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens werden aus den Teilgebieten günstige Standortregionen zur übertägigen Erkundung ermittelt. Innerhalb der Standortregionen werden konkrete Standorte für eine untertägige Erkundung identifiziert. Zuletzt erfolgt im Standortauswahlverfahren ein abschließender Standortvergleich, der zu einer Standortentscheidung führt. Durch die räumliche Verteilung der jeweils zu betrachtenden Teilgebiete, Standortregionen und Standorte (im folgenden Untersuchungsräume<sup>1</sup> genannt) und in Abhängigkeit der jeweils vorhandenen geologischen Situation, sowie der zugehörigen Sicherheits- und Endlagerkonzepte (Endlagersysteme<sup>2</sup>), sind Abwägungen bzw. teilweise vergleichende Bewertungen der Untersuchungsräume erforderlich.

Durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Wirtsgesteine und der damit verbundenen unterschiedlichen wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme im Standortauswahlverfahren, entstehen verschiedene Herausforderungen in Bezug auf Abwägungen und ver-

---

<sup>1</sup> /BMU 19a/ § 3: „In den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind die Untersuchungsräume auszuweisen. Untersuchungsräume sind diejenigen räumlichen Bereiche, die zur Bewertung als möglicher Endlagerstandort vorgesehen sind. Für jedes Teilgebiet, jede Standortregion und jeden Standort ist mindestens ein Untersuchungsraum auszuweisen. Überlagern sich in einem Teilgebiet, einer Standortregion oder an einem Standort mehrere potenzielle Wirtsgesteine, für die jeweils eigene vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt werden sollen, oder sollen für ein Wirtsgestein mehrere vorläufige Sicherheitskonzepte untersucht werden, so ist die Ausweisung mehrerer Untersuchungsräume erforderlich.“

<sup>2</sup> Endlagersysteme sind gemäß StandAG folgendermaßen definiert als: „das den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle durch das Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten bewirkende System, das aus dem Endlagerbergwerk, den Barrieren und den das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche besteht, soweit sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen“

gleichende Bewertungen. Deshalb müssen geeignete methodische Ansätze für vergleichende Bewertungen zur nachvollziehbaren und belastbaren Entscheidungsfindung gefunden werden.

## **1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Die übergeordnete Aufgabenstellung in diesem Vorhaben ist „... *den derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) in Bezug auf generelle sicherheitsgerichtete Bewertungs- und Vergleichsmethoden zu recherchieren und zu erläutern sowie deren Relevanz und Anwendbarkeit unter Berücksichtigung der spezifischen Herausforderungen des Standortauswahlverfahrens herauszuarbeiten.*“ Das Vorhaben ist zur besseren Unterteilung der Aufgaben in drei Arbeitspakete gegliedert.

Im **Arbeitspaket 1** (Kapitel 2) werden zunächst die einzelnen Aufgabenstellungen bzw. Verfahrensschritte im Standortauswahlverfahren identifiziert, in denen Abwägungen bzw. Vergleiche und vergleichende Bewertungen zur Ausweisung von Untersuchungsräumen mit günstigen geologischen Verhältnissen zur Endlagerung durchgeführt werden und in denen Vergleiche zwischen einzelnen Untersuchungsräumen stattfinden. Einhergehend mit dieser Recherche werden auch die Herausforderungen für die relevanten Verfahrensschritte, in Bezug auf Abwägungen bzw. Vergleiche und vergleichende Bewertungen dargestellt.

Anschließend werden im **Arbeitspaket 2** (Kapitel 3 und 4) der derzeitige Stand von Wissenschaft und Technik für sicherheitsgerichtete Bewertungs- und Vergleichsmethoden mit Bezug zu Standortauswahlverfahren in Deutschland, aus internationalen Projekten, sowie methodische Herangehensweisen aus anderen Fachgebieten (z. B. der Deponiestandortauswahl) gesichtet und ausgewertet. Die identifizierten Methoden werden im Kapitel 5 näher beschrieben. Im Anschluss (Kapitel 6 und 7) erfolgt eine Bewertung der Anwendbarkeit der methodischen Ansätze für die relevanten Verfahrensschritte im Rahmen des Standortauswahlverfahrens nach StandAG.

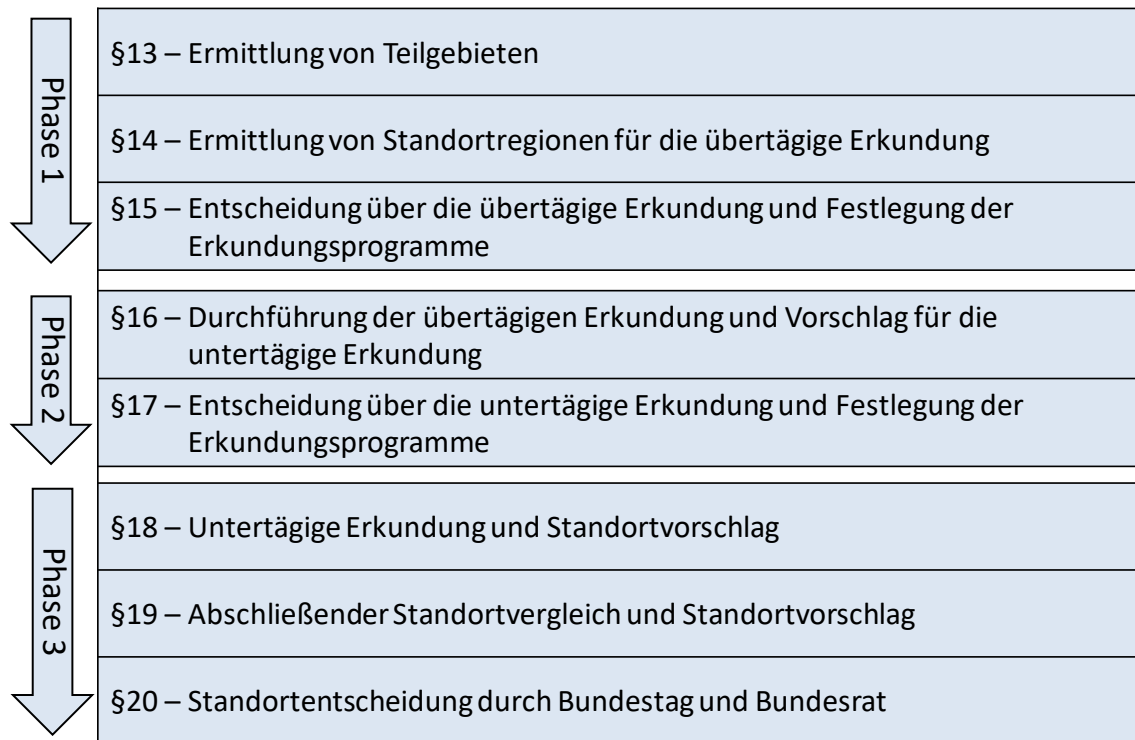
Im **Arbeitspaket 3** werden die Ergebnisse des Vorhabens in einem Abschlussbericht zusammengefasst.

Die Ergebnisse des Vorhabens sollen das BfE (Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit) als Aufsichtsbehörde im Rahmen seiner Aufgaben in die Lage versetzen, die Ergebnisse und Vorschläge der Vorhabenträgerin BGE im Verlaufe des Standortauswahlverfahrens zu den ermittelten Teilgebieten, Standortregionen, Standorten und dem abschließenden Standortvergleich nachzuvollziehen bzw. prüfen und bewerten zu können. Das Augenmerk der Prüfung liegt hierbei insbesondere auf der fachlichen Nachvollziehbarkeit der Vorgehensweise zur Ermittlung der jeweiligen Vorschläge und deren Begründung.

## **1.2 Standortauswahlverfahren**

Das Standortauswahlverfahren sieht auf Grundlage des StandAG /STA 17/ eine kriterienbasierte, schrittweise Eingrenzung zur Ermittlung des Standortes mit bestmöglicher Sicherheit vor. Die Einordnung der Verfahrensschritte nach StandAG erfolgt im MABeSt Vorhaben zur besseren Gliederung in Anlehnung an den Abschlussbericht der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (im folgenden Kommissionsbericht genannt) /KOM 16/ in drei Phasen. Das StandAG nimmt eine konkrete Einteilung in verschiedene Phasen nicht vor. Die Phasen entsprechen den wesentlichen Meilensteinen in der Eingrenzung der Untersuchungsräume. Die einzelnen Phasen werden anhand der Paragraphen im StandAG zur schrittweisen Eingrenzung (§§ 13 bis 20) wie folgt ausgewiesen (siehe Abb. 1.1):

- Phase 1: Anwendung des § 13 StandAG (Ermittlung von Teilgebieten) und § 14 StandAG (Ermittlung von Standortregionen für übertägige Erkundung). Festlegung der übertägig zu erkundenden Standortregionen durch Bundesgesetz gemäß § 15 Abs. 3 StandAG.
- Phase 2: Anwendung des § 16 StandAG (Übertägige Erkundung und Vorschlag für untertägige Erkundung), Festlegung der untertägig zu erkundenden Standorte durch Bundesgesetz nach § 17 Abs. 2 StandAG.
- Phase 3: Anwendung des § 18 StandAG (Untertägige Erkundung). Vorschlag für konkrete Standorte zum Standortvergleich nach § 19 StandAG, mit anschließender Festlegung durch Bundesgesetz nach § 20 Abs. 2 StandAG.



**Abb. 1.1** Schematische Darstellung der Phasen 1 bis 3 (abgeleitet aus StandAG /STA 17/)

### Anforderungen und Kriterien und ihre Funktionen im StandAG

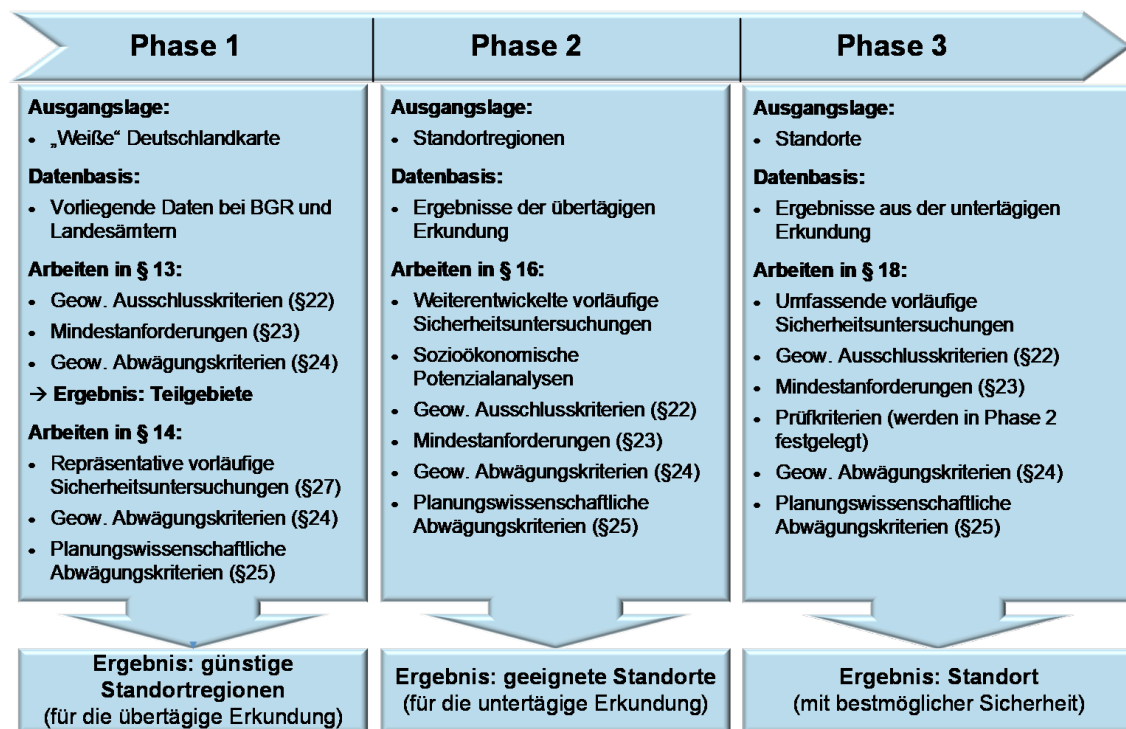
Zur kriterienbasierten, schrittweisen Eingrenzung der verschiedenen Untersuchungs-räume im Standortauswahlverfahren, werden zum einen Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG, mit den in der jeweiligen Phase zur Verfügung stehenden Daten, auf die jeweiligen Untersuchungs-räume angewandt. Zum anderen werden zur Bewertung der Untersuchungs-räume vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (ab §14 StandAG) durchgeführt (siehe Kap. 1.3).

Ziel der Anwendung der Anforderungen und Kriterien ist die Ermittlung von Untersu-chungsräumen mit einer jeweils günstigen geologischen Gesamtsituation. Durch die An-wendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen werden zunächst nicht ge-eignete Gebiete ausgeschlossen. Die Anwendung der Abwägungskriterien auf die ver-bleibenden Untersuchungs-räume, soll die geologische Gesamtsituation bewerten und entsprechend günstige Untersuchungs-räume ausweisen. Im Folgenden sind zusam-menfassend die Kriterien und Informationen, welche zur „Entscheidungsfindung“ heran-gezogen werden können, gemäß StandAG aufgeführt:



- **Ausschlusskriterien** (§ 22): Gemäß § 22 Abs. 1 StandAG ist ein Gebiet für Endlagerstandorte ungeeignet, wenn mindestens eines der Ausschlusskriterien nach § 22 Abs. 2 StandAG zutrifft.
- **Mindestanforderungen** (§ 23): Gemäß § 23 Abs. 2 StandAG sind Gebiete als Endlagerstandort geeignet, wenn keines der Ausschlusskriterien auf ein Gebiet zutrifft und wenn sämtliche Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG erfüllt sind.
- **Geowissenschaftliche Abwägungskriterien** (§ 24): Gemäß § 24 Abs. 1 StandAG wird durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und deren Abwägung bewertet, ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt.
- **Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien** (§ 25): Sie werden wegen des Primats der Sicherheit nachrangig zu den übrigen sicherheitsgerichteten Kriterien angewendet. Ziel ist die Einengung großer Flächen und/oder der Vergleich zwischen sicherheitstechnisch gleichwertigen Standorten.
- **Sozioökonomische Potentialanalyse:** „Die Potenzialanalyse soll zu einer qualitativ gewichteten und, wo immer möglich, quantitativ gestützten Aussage darüber kommen, ob die Realisierung eines Endlagers in der Standortregion positive, negative oder neutrale Entwicklungschancen erwarten lässt.“ /KOM 16/
- **Standortbezogene Prüfkriterien:** Funktional handelt es sich bei den Prüfkriterien für die Bewertung der untertägigen Erkundungsergebnisse gemäß § 16 Abs. 2, § 17 Abs. 4 und § 18 Abs. 2 /STA 17/ um standortspezifische Ausschlusskriterien (S. 298, 335ff in /KOM 16/), die vom Vorhabenträger BGE vorzuschlagen und vom BfE festzulegen sind.

In der Abb. 1.2 ist die Anwendung der Anforderungen, Kriterien und Untersuchungen für eine schrittweise flächenmäßige Eingrenzung der Untersuchungsräume, von der sogenannten „weißen Landkarte“ des Bundesgebietes Deutschland, bis zu dem Standort mit bestmöglicher Sicherheit nach StandAG, für die unterschiedlichen Phasen des StandAG zusammengefasst. Weitere Arbeiten, wie z. B. die Durchführung der Umweltverträglichkeitsprüfung und die vergleichende Bewertung der Standorte in Phase 3, sind zur besseren Übersicht nicht dargestellt.



**Abb. 1.2** Wesentliche Arbeitsschritte der einzelnen Phasen im Standortauswahlverfahren gemäß StandAG.

### 1.3 Sicherheitsuntersuchungen und Sicherheitsanforderungen

Neben der Anwendung der Anforderungen und Kriterien, sollen vorläufige Sicherheitsuntersuchungen zur Bewertung der Untersuchungsräume durchgeführt werden. Der Rahmen für die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen soll durch die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV, Art. 1) /BMU 19b/ und die Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV, Art. 2) /BMU 19a/ festgelegt werden. Die genannten Verordnungen haben zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch den Status eines Referentenentwurfs und müssen dem StandAG zufolge spätestens zum Zeitpunkt der Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen nach § 14 Abs. 1, Satz 2 in Kraft gesetzt sein. Aufgrund des Entwurfscharakters ist es möglich, dass die verabschiedeten Verordnungen inhaltlich zum Teil von den im Folgenden dargestellten Inhalten abweichen werden.

Nach StandAG /STA 17/ bildet die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung nach § 26 StandAG eine wesentliche Grundlage der im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 StandAG durchzuführenden Bewertung, ob an einem Standort in Verbindung mit dem vorgesehenen Endlagerkonzept der sichere Einschluss der

radioaktiven Abfälle erwartet werden kann. Die Rechtsverordnungen nach § 26 StandAG über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle und nach § 27 StandAG über die Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren nach StandAG wurden am 17.08.2019 als Referentenentwurf im Internet veröffentlicht.

### **Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung – EndlSiUntV)**

Die Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) /BMU 19a/ lag zum Zeitpunkt der Berichtserstellung als Referentenentwurf mit Stand vom 08.10.2019 vor. Sie enthält Vorschriften zu Inhalt und Struktur der Sicherheitsuntersuchungen und ist in 2 Abschnitte gegliedert:

**Abschnitt 1:** Allgemeine Vorschriften (Anwendungsbereich, Begriffsbestimmungen, Untersuchungsraum, Allgemeine Anforderungen an die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen).

**Abschnitt 2:** Struktur der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Die durch die EndlSiUntV vorgegebene Struktur ähnelt denen eines Sicherheitsnachweises. Hierzu gehören folgende Elemente:

- Eine **Geosynthese**, die eine Zusammenführung und Interpretation aller geowissenschaftlichen Informationen zu einem Untersuchungsraum mit dem Ziel einer konsistenten Darstellung insbesondere der für die Sicherheit des Endlagers relevanten geowissenschaftlichen Gegebenheiten enthält (§ 5)
- Ein **vorläufiges Sicherheitskonzept** und eine **vorläufige Auslegung des Endlagers**, die im Verlauf des Standortauswahlverfahrens weiterzuentwickeln und gemäß § 12 EndlSiAnfV zu optimieren sind.
- Eine **Systemanalyse** (§ 7), bei der die relevanten möglichen Entwicklungen des Endlagersystems im Nachweiszeitraum zu ermitteln, zu beschreiben und einzuordnen sind.
- Eine **betriebliche Sicherheitsanalyse** (§ 8), bei der alle Anlagenzustände des Endlagers einschließlich der übertägigen Anlagen während der Errichtung, des Betriebes und der Stilllegung nach § 17 EndlSiAnfV zu erfassen sind.

- Eine **Langzeitsicherheitsanalyse** (§ 9), welche den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahren ab dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers umfassen muss. Im Einzelnen sind der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle, die Integrität und Robustheit der wesentlichen Barrieren, die Robustheit der weiteren Barrieren und sonstigen Komponenten des Endlagersystems, die Einhaltung der Dosiswerte nach § 7 EndlSiAnfV sowie der Ausschluss von Kritikalität nach § 8 EndlSiAnfV nachzuweisen.
- Eine **umfassende Bewertung des Endlagersystems** (§ 10), in welcher auf der Basis der Ergebnisse der Systemanalyse die Sicherheit des Endlagersystems sowie seine Robustheit zu bewerten sind.
- Die **Bewertung von Ungewissheiten** (§ 11), die zum Zeitpunkt der Erstellung der jeweiligen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung bestehen.
- Die **Ableitung des Erkundungs- sowie Forschungs- und Entwicklungsbedarfs** (§ 12).
- Für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (Phase 1) werden Abstriche in Umfang und Tiefgang gemacht. Die betrifft beispielsweise die Annahme, dass technische und geotechnische Barrieren ihre Funktion grundsätzlich über den jeweils vorgesehenen Zeitraum erfüllen (kein Nachweis erforderlich) oder den Verzicht auf eine Abschätzung der zusätzlichen jährlichen effektiven Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung

### **Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV)**

Die EndlSiAnfV /BMU 19b/ lag zum Zeitpunkt der Berichtserstellung ebenfalls als Referentenentwurf mit Stand vom 08.10.2019 vor. Sie gilt für Anlagen des Bundes zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen nach § 9a Abs. 3 Satz 1 des Atomgesetzes, 1. die zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bestimmt sind. In § 21 sind Bestimmungen für den Fall enthalten, dass am selben Standort eine zusätzliche Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle nach § 1 Abs. 6 des Standortauswahlgesetzes erfolgen soll.

Die Verordnung gilt für ein Genehmigungsverfahren nach § 9b Absatz 1a des Atomgesetzes für ein Endlagersystem, dessen Standort im Zuge des Standortauswahlverfahrens nach StandAG ausgewählt wurde. Indirekt ist die EndlSiAnfV jedoch auch relevant

für den Standortauswahlprozess, da bereits bei der Suche nach Endlagerstandorten auf eine spätere Genehmigungsfähigkeit zu achten ist. Die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung ist folgendermaßen gegliedert:

- **Abschnitt 1:** Allgemeine Vorschriften (Anwendungsbereich, Begriffsbestimmungen),
- **Abschnitt 2:** Langzeitsicherheit (Mögliche und hypothetische Entwicklungen des Endlagersystems, Sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle, Integrität und Robustheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Integrität und Robustheit der technischen und geotechnischen Barrieren, Dosiswerte im Nachweiszeitraum, Ausschluss von Kritikalität),
- **Abschnitt 3:** Erkundung des Endlagerstandortes und Planung des Endlagers (Erkundung des Endlagerstandortes, Sicherheitskonzept, Auslegung des Endlagers, Optimierung des Endlagersystems),
- **Abschnitt 4:** Rückholbarkeit und Ermöglichung einer Bergung (Rückholbarkeit eingelagerter Endlagergebäude, Ermöglichung einer Bergung eingelagerter Endlagergebäude),
- **Abschnitt 5:** Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagers (Errichtung des Endlagers, Betrieb des Endlagers, Voraussetzungen für die Genehmigung, Sicherheit während der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung des Endlagers; Anlagenzustände, Einlagerung von radioaktiven Abfällen, Stilllegung des Endlagers, Voraussetzungen für die Genehmigung),
- **Abschnitt 6:** Weitere Vorschriften (Überwachung des Endlagers und seiner Umgebung, Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen am selben Standort).

Die EndlSiAnfV enthält weiterhin einen Anhang, der Hinweise zur Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors zum Nachweis des Ausschlusses von Rekritikalität im Endlager enthält.



## **2        Verfahrensschritte des StandAG und deren Herausforderungen**

Das Standortauswahlverfahren bzw. die einzelnen Paragraphen §§ 13 bis 20 StandAG, die den Verfahrensablauf regeln, werden nachfolgend basierend auf den jeweiligen Aufgabenstellungen in Verfahrensschritte (VfS) unterteilt. Die Verfahrensschritte umfassen hierbei insbesondere die einzelnen Aufgaben der jeweiligen Akteure BGE und BfE. Als einzelne Verfahrensschritte gelten Arbeiten wie z. B. die Datenerhebung und -analyse und regulatorische Schritte der Prüfung, Gesetzgebung und der Übermittlung von Informationen (Meilensteine) zwischen den beteiligten Institutionen. Die einzelnen Verfahrensschritte - im Zusammenhang mit der Öffentlichkeitsbeteiligung – sind der Vollständigkeit halber aufgeführt aber zusammenfassend dargestellt. Die Öffentlichkeitsbeteiligung ist hinsichtlich der durchzuführenden Tätigkeiten und möglicher Herausforderungen auf das Standortauswahlverfahren nicht Gegenstand der Aufgabenstellung dieses Vorhabens.

Hauptziel der Unterteilung des StandAG in einzelne Verfahrensschritte ist die Identifizierung von Aufgabenstellungen im Verfahren, in denen Abwägungen und/oder vergleichende Bewertungen durchzuführen sind. Zunächst werden diesbezüglich die ausgewiesenen Verfahrensschritte analysiert und hinsichtlich ihrer Inhalte beschrieben. Die allgemeine Auseinandersetzung mit den Aufgabenstellungen der einzelnen Verfahrensschritte führt zu einem allgemeinen Verständnis des Verfahrensablaufes und der verfahrensschrittspezifischen Herausforderungen. Sofern sich aus der erforderlichen Tätigkeit des Verfahrensschrittes die Aufgabe einer Abwägung oder vergleichenden Bewertung ergeben hat, werden in den jeweiligen Kapiteln zur Beschreibung der Phasen, in den Unterkapiteln „Herausforderungen“ für diese Verfahrensschritte die Herausforderungen an diese Aufgabe detailliert betrachtet/identifiziert.

Es werden zum einen Abwägungen zur Bewertung der geologischen Gesamtsituation „innerhalb“ eines Untersuchungsraumes und zum anderen vergleichende Bewertungen zwischen Untersuchungsräumen durchgeführt. Insbesondere zu Beginn des Standortauswahlverfahrens werden die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24 StandAG) angewendet. Im Verlauf des Standortauswahlverfahrens wird die Bewertung der Untersuchungsräume zunehmend auf Basis der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen erfolgen. Ein sicherheitsgerichteter Vergleich (von Standorten) ist gemäß § 18 StandAG erst in der Phase 3 explizit vorgesehen.

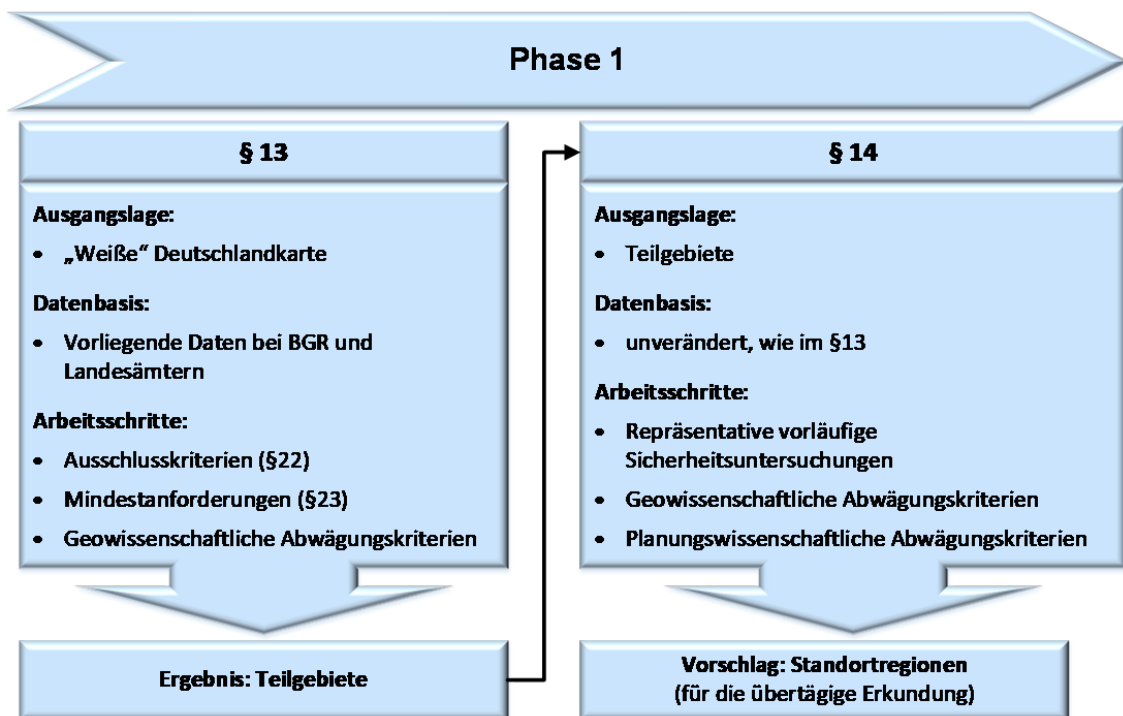
Es wird vorausgesetzt, dass Abwägungen, und unter Umständen vergleichende Bewertungen, in den jeweiligen Verfahrensschritten durchgeführt werden, in denen insbesondere die Anwendung der geowissenschaftlichen und planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien erfolgt. Die nachfolgenden Verfahrensschritte dienen in der Regel der Dokumentation der ermittelten Ergebnisse.

Weiterhin werden durch die Untersuchung des Verfahrensablaufes auch mögliche Abhängigkeiten zwischen den Verfahrensschritten identifiziert, die möglicherweise einen Einfluss auf die Abwägungen und vergleichenden Bewertungen haben können. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte und deren Inhalte ist im Anhang A dokumentiert.

## **2.1 Phase 1: Ermittlung von Teilgebieten und Standortregionen**

In der Phase 1 erfolgt durch die BGE gemäß § 13 StandAG (Phase 1A, Kap. 2.1.1) zunächst die Ermittlung von Teilgebieten und in § 14 StandAG (Phase 1B, Kap. 2.1.2) die weitere Eingrenzung der Teilgebiete zu Standortregionen, welche später in Phase 2 übertägig erkundet werden sollen. Die Abb. 2.1 zeigt schematisch die wesentlichen Arbeitsschritte für die §§ 13 und 14 StandAG. Grundlage für die Arbeiten in Phase 1 bilden die „vorhandenen“ Daten von den entsprechenden Institutionen (Landesämter, BGR). In dieser Phase werden keine teilgebiets- bzw. regionspezifischen Erkundungen durchgeführt. Entsprechend § 15 StandAG (Phase 1C, Kap. 2.1.3) erfolgt die Festlegung der übertägig zu erkundenden Standortregionen und deren Erkundungsprogramme durch Bundestag/Bundesrat (nicht in Abb. 2.1 dargestellt).





**Abb. 2.1** Wesentliche Arbeitsschritte im § 13 und § 14 StandAG (verändert nach /HEI 17/)

### 2.1.1 Phase 1A - Ermittlung von Teilgebieten gemäß § 13 StandAG

Das Ziel der Phase 1A (§ 13) ist eine Einengung der Gesamtfläche des Bundesgebietes („weiße Landkarte“) auf Teilgebiete, die eine günstige geologische Gesamtsituation aufweisen.

#### 2.1.1.1 Verfahrensablauf

Die im § 13 StandAG identifizierten Verfahrensschritte (VfS) sind in Tab. 2.1 zusammengefasst. Auf Grundlage der in Phase 1 verfügbaren Daten werden von der BGE anhand der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien nach § 22 Gebiete ausgeschlossen (VfS 13-1). Auf die verbleibenden Gebiete werden die Mindestanforderungen nach § 23 (VfS 13-2) angewendet. Hierdurch werden weitere Gebiete ausgeschlossen, welche nicht geeignete geologische Bedingungen zur Endlagerung aufweisen. Innerhalb der verbleibenden Gebiete werden anschließend durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 (VfS 13-3) Teilgebiete mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation identifiziert. Die BGE erarbeitet einen Vorschlag für die in VfS 13-3 ermittelten günstigen Teilgebiete (VfS 13-4). Der Vorschlag enthält eine Emp-

fehlung zum weiteren Umgang mit Gebieten, die aufgrund nicht hinreichender geowissenschaftlicher Daten nicht eingeordnet werden können. Zudem wird eine Darstellung der entscheidungserheblichen Tatsachen und Erwägungen beigefügt. Im Anschluss veröffentlicht die BGE den Vorschlag in einem Zwischenbericht und übermittelt diesen an das BfE (VfS 13-5). Nach Veröffentlichung des Zwischenberichtes beruft das BfE (nach § 13 Abs. 2, Satz 3) eine Fachkonferenz Teilgebiete ein (VfS 13-6).

**Tab. 2.1** Verfahrensschritte (VfS) im § 13 nach StandAG, Zuständigkeit für Schritte 13-1 bis 13-5: BGE, Schritt 13-6 BfE

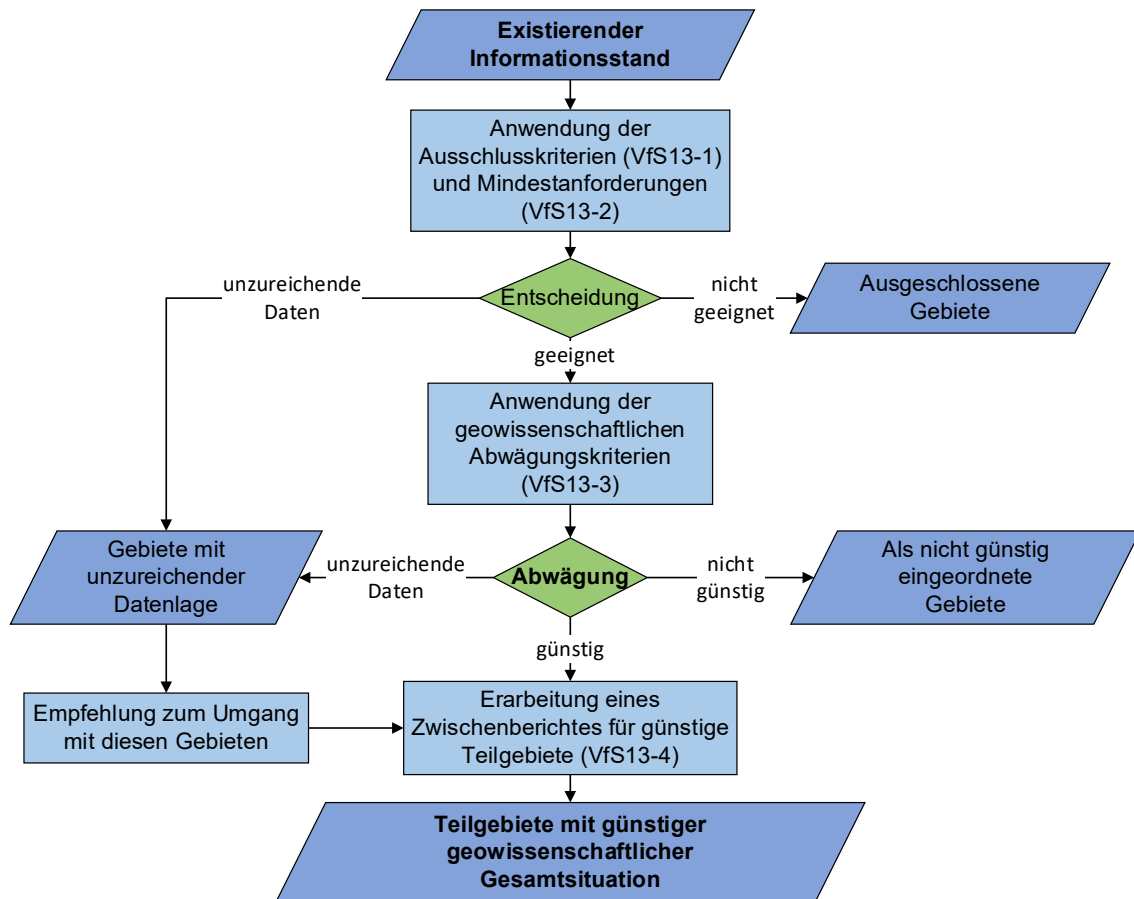
<b>VfS</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>13-1</b> Abs.2, Satz 1	Anwendung der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien nach § 22
<b>13-2</b> Abs. 2, Satz 1	Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23
<b>13-3</b> Abs. 2, Satz 2	Anwendung und Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24
<b>13-4</b> Abs. 2, Satz 4	Erarbeitung eines Zwischenberichtes
<b>13-5</b> Abs. 2, Satz 3	Übermittlung des Zwischenberichtes an das BfE
<b>13-6</b> § 9 Abs. 1, Satz 1	Einberufung der Fachkonferenz Teilgebiete durch das BfE

Die identifizierten Verfahrensschritte und deren Aufgabenstellungen führten zu dem Ergebnis, dass nur im VfS 13-3 aufgrund der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG Abwägungen durchgeführt werden. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte aus dem § 13 StandAG bzw. Tab. 2.1 erfolgt im Anhang A.1.

### **2.1.1.2 Herausforderungen**

Das Fließdiagramm in Abb. 2.2 zeigt zunächst den schematischen Verfahrensablauf zur Anwendung der Anforderungen und Kriterien gemäß § 13 StandAG und die Entscheidungsmöglichkeiten. Die VfS 13-5 und 13-6 sind für eine übersichtlichere Darstellung nicht im Fließdiagramm dargestellt. Für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (VfS 13-3) ergeben sich für jedes Gebiet drei mögliche Zuordnungen (Abb. 2.2):

- Die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ergibt eine „günstige“ geologische Gesamtsituation,
- die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ergibt **keine** „günstige“ geologische Gesamtsituation. Aus dem StandAG geht nicht genau hervor, wie weiter mit diesen Gebieten umgegangen wird, d. h., ob sie ausgeschlossen oder zurückgestellt werden. Es ist jedoch im Sinne der Gesamtlogik des Standortauswahlverfahrens davon auszugehen, dass diese Untersuchungsräume nicht als Teilgebiete ausgewiesen werden können und damit im weiteren Verfahren (zunächst) nicht weiter berücksichtigt werden,
- für ein Gebiet liegen nicht hinreichende Daten zur Anwendung der jeweiligen Abwägungskriterien vor bzw. ist aufgrund der Datenheterogenität zwischen einzelnen Gebieten kein Vergleich möglich.



**Abb. 2.2** Schematisches Ablaufschema für den § 13 StandAG

Für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und die darauf basierende Bewertung der jeweiligen geologischen Gesamtsituation, ergeben sich hier verschiedene Fragestellungen bzw. Herausforderungen, welche im Folgenden diskutiert

werden. Im Wesentlichen dient die Definition von Fragestellungen einer besseren Gliederung der Herausforderungen.

➤ **Gibt es geowissenschaftliche Abwägungskriterien, die ein höheres Gewicht als andere besitzen?**

Gemäß § 24 Abs. 1 StandAG sollen die in den Absätzen 3 bis 5 aufgeführten Kriterien und Indikatoren als Bewertungsmaßstab zur Ermittlung einer günstigen geologischen Gesamtsituation dienen. Dies beinhaltet zunächst alle Kriterien von Anlage 1 bis 11 (zu § 24 Abs. 3 StandAG). Im StandAG wird jedoch nicht festgelegt, ob einzelne geowissenschaftliche Abwägungskriterien gegenüber anderen ein unterschiedliches Gewicht (Einstufung hinsichtlich ihrer „Wichtigkeit“) im Abwägungsprozess besitzen. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass unterschiedliche Sicherheitskonzepte je nach Wirtsgesteinstyp eine unterschiedliche Gewichtung der Abwägungskriterien für eine günstige geologische Gesamtsituation erfordern, insbesondere dann, wenn das Wirtsgestein zu den wesentlichen Barrieren i. S. der EndISiAnf gehört.

Konsequenterweise tritt nach StandAG (§ 24, Abs. 2) bei Gebieten, bei denen **kein** einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) ausgewiesen werden kann, an die Stelle des Abwägungskriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 zu § 24 Abs. 3) die rechnerische Ableitung, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen. Wie diese rechnerischen Ergebnisse zur Bewertung der geologischen Gesamtsituation einbezogen werden sollen, ist unklar. Insbesondere könnten noch Kriterien entwickelt werden, die eine Einstufung einer rechnerischen Ableitung des Einschlussvermögens technischer und geotechnischer Barrieren, z. B. gemäß der Kategorien in Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG, in „günstig“, „bedingt günstig“ und „weniger günstig“ ermöglichen.

Weiterhin sind, soweit sich die Abwägungskriterien nach den Anlagen 1 sowie 3 bis 11 auf den ewG beziehen, diese bei Gebieten ohne ausweisbaren ewG auf den Einlagebereich entsprechend anzuwenden. In diesem Fall ist zum Beispiel möglich, dass das Abwägungskriterium zur Bewertung der Gasbildung in einem Endlagersystem mit ewG-Konzept ein anderes Gewicht besitzt, als in einem Endlagersystem, das im Wesentlichen auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht.

Es ist somit zu erwarten, dass wegen des abweichenden Sicherheits- und Endlagerkonzepts, insbesondere für Endlagersysteme ohne ausweisbaren ewG, das Gewicht der

Abwägungskriterien verschieden gegenüber denjenigen mit ausweisbarem ewG sein wird.

Die Anwendung geowissenschaftlicher Abwägungskriterien setzt damit die Kenntnis/Erstellung wirtsgesteinsspezifischer Sicherheits- und Endlagerkonzepte voraus. Hieraus ist ersichtlich, dass bereits im § 13 StandAG für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wirtsgesteinsspezifische Konzepte erstellt werden müssen. Da eine Erstellung standortbezogener Konzepte in Phase 1 des StandAG nicht möglich ist, ist davon auszugehen, dass die Anwendung der Kriterien nach § 24 StandAG nur auf Grundlage generischer (vorläufiger) Konzepte für Teilgebiete erfolgen kann und damit nicht abschließend sein kann. Hieraus ergeben sich methodische Herausforderungen für eine Abwägung der geowissenschaftlichen Kriterien bei der Ermittlung von Teilgebieten in verschiedenen Wirtsgesteinstypen bzw. geologischen Konfigurationen.

➤ **Sind alle geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in der Phase 1 anwendbar?**

Nach StandAG wird die günstige geologische Gesamtsituation durch eine sicherheitsgerichtete Abwägung der Ergebnisse zu „allen“ geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ermittelt (siehe § 24 Abs. 1 StandAG). Nach /BT 17/ wird ein einzelnes Abwägungskriterium nicht als hinreichend angesehen, um eine günstige geologische Gesamtsituation nachzuweisen oder abschließend bewerten zu können. Eine Berücksichtigung „aller“ Abwägungskriterien und die zuverlässige Einordnung einzelner Kriterien in eine Wertungsgruppe, ist in Phase 1 voraussichtlich durch die heterogene und teils lückenhafte Datenlage schwierig.

Viele der Abwägungskriterien setzen z. T. sehr detaillierte standortbezogene Kenntnisse voraus, die nicht flächendeckend vorliegen und meist erst durch spezielle geologische, geophysikalische und geotechnische Erkundungsarbeiten im weiteren Verfahrensverlauf gewonnen werden können /BOL 11/.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass im Verfahrensschritt nach § 13 StandAG keine vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen vorgesehen sind. Einige Abwägungskriterien bzw. deren Indikatoren sind das Ergebnis von Modellrechnungen für Endlagersysteme (z. B. die Gasbildung im Endlagerbergwerk). Der überwiegende Teil der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien bezieht sich zudem auf den ewG bzw. den Einlagerungsbe- reich, wenn kein ewG ausgewiesen werden kann. Grundsätzlich kann in dieser frühen

Phase lediglich die Möglichkeit der Existenz eines ewG im Gesteinskörper ausgewiesen werden.

➤ **Sind zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ausreichend Daten verfügbar?**

Wenn die Datenlage für die Anwendung der Kriterien und Anforderungen nach §§ 22 bis 24 StandAG nicht hinreichend ist, wird zumindest für die Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 3 StandAG festgelegt, dass die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt gilt und das Teilgebiet nicht ausgeschlossen wird.

Der weitere Umgang mit unzureichenden Daten für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ist im StandAG nicht explizit festgelegt. Es ist zu vermuten, dass auch hier kein Ausschluss aufgrund einer unzureichenden Datenlage erfolgt, sondern dass ggf. in der Phase 2 Nachuntersuchungen vorgenommen werden. Nach § 13 Abs. 2 StandAG ist für Teilgebiete, die aufgrund unzureichender geologischer Daten nicht eingeordnet werden können, durch die BGE noch eine Empfehlung zum weiteren Umgang mit diesen Gebieten zu erstellen. Dadurch ist eine derzeitige Einschätzung spekulativ, wie mit diesen Gebieten vom Vorhabenträger umgegangen wird.

Die Datenlage zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (z. B. § 24 Anlage 1, 5 und 6 StandAG) wird voraussichtlich in Phase 1 unzureichend sein, um eine eindeutige Zuordnung in eine Wertungsgruppe vornehmen zu können. Sofern eine Zuordnung in eine Wertungsgruppe auf der Basis von begründeten Einschätzungen erfolgt, muss diese unter dem Vorbehalt einer späteren Verifizierung erfolgen.

Nach /FIS 19/ wurden die bestehenden Daten nicht speziell für die Standortsuche erhoben und zielen zumeist nicht direkt auf die Gesteinsbereiche ab, welche für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle im Fokus stehen.

Die heterogen verteilte und für einige Teilgebiete zu erwartende unzureichende Datenlage, stellt eine wesentliche Herausforderung in der Phase 1 dar. Im Einzelnen ist es möglich, dass:

- Die Datenlage für eine Vielzahl von Abwägungskriterien nicht ausreicht, um eine zuverlässige Einordnung eines Teilgebietes bzw. einer Standortregion in die entsprechenden Bewertungsgruppen durchführen zu können,
- Zwischen den Teilgebieten bzw. den Standortregionen der Datenumfang und die -qualität sehr unterschiedlich ist. Dies ist ein Umstand, der in der Phase 1 nicht nachgebessert werden kann, da keine gezielten teilgebiets- bzw. standortregionenspezifischen Untersuchungen vorgesehen sind.

Auch die Methodik zur Beurteilung, ob eine Datenlage ausreichend oder unzureichend ist, muss nachvollziehbar sein. Daher ist die Bewertung der Qualität, Quantität und Plausibilität der vorhandenen Daten wichtig.

### **2.1.2 Phase 1B - Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung gemäß § 14 StandAG**

Hauptziel des § 14 StandAG ist die Eingrenzung (zahlen- und flächenmäßig) der in § 13 StandAG ermittelten Teilgebiete auf Standortregionen mit günstigen geologischen Bedingungen, die in der nächsten Phase 2 übertägig erkundet werden sollen.

#### **2.1.2.1 Verfahrensablauf**

Die ermittelten Verfahrensschritte des § 14 StandAG sind in der Tab. 2.2 zusammengefasst. Für die in § 13 StandAG ermittelten Teilgebiete werden von der BGE repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 StandAG durchgeführt (VfS 14-1) und auf Grundlage der Ergebnisse die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG erneut angewendet. Aus den (günstigen) Teilgebieten werden dann Standortregionen für die übertägige Erkundung ermittelt (VfS 14-2). Die geowissenschaftliche Datengrundlage ist im Vergleich zu § 13 StandAG unverändert. Zusätzlich werden erstmalig die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien angewendet (VfS 14-3).

Für die übertägig zu erkundenden Standortregionen erarbeitet die BGE standortbezogene Erkundungsprogramme und fasst die Ergebnisse in einem Vorschlag als Bericht

zusammen (VfS 14-4). Auf Grundlage des erstellten Vorschlages bzw. der ermittelten Standortregionen in VfS 14-4 erarbeitet die BGE standortbezogene Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung (VfS 14-5). Im Anschluss übermittelt die BGE den Vorschlag für die übertägig zu erkundenden Standortregionen an das BfE (VfS 14-6).

**Tab. 2.2** Verfahrensschritte (VfS) im § 14 StandAG, Zuständigkeit: BGE

<b>VfS</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>14-1</b> Abs. 1, Satz 2	Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen nach § 27
<b>14-2</b> Abs. 1, Satz 3	Erneute Anwendung und Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 und Ermittlung günstiger Standortregionen
<b>14-3</b> Abs. 1, Satz 4	Anwendung planungswissenschaftlicher Abwägungskriterien nach § 25
<b>14-4</b> Abs. 2	Erarbeitung eines Vorschlages für die übertägig zu erkundenden Standortregionen
<b>14-5</b> Abs. 1, Satz 5	Erarbeitung standortbezogener Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung
<b>14-6</b> Abs. 3	Übermittlung des Vorschlages und der standortbezogenen Erkundungsprogramme an das BfE

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte aus Phase 1B bzw. Tab. 2.2 erfolgt im Anhang A.2. Für den § 14 StandAG wurden die Verfahrensschritte 14-2 und 14-3 identifiziert, in denen voraussichtlich Abwägungen durchgeführt werden:

- VfS 14-2: die Bewertung der geologischen Gesamtsituation auf der Grundlage der erneuten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und deren Abwägung nach § 24 StandAG und der Ergebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen,
- VfS 14-3: die Anwendung planungswissenschaftlicher Abwägungskriterien nach § 25 StandAG.

Gemäß § 14 Abs. 2 StandAG (VfS 14-4) erarbeitet die BGE einen **Vorschlag** für die übertägig zu erkundenden Standortregionen. Das lässt sich so interpretieren, dass der Vorschlag nicht unbedingt alle günstigen Standortregionen enthalten muss, sondern nur eine begründete „Auswahl“. Diese Auswahl könnte erforderlich werden, wenn sich nach VfS 14-2 und 14-3 eine Vielzahl an günstigen Standortregionen ergeben, die aus unterschiedlichen Erwägungen heraus nicht alle erkundet werden können.



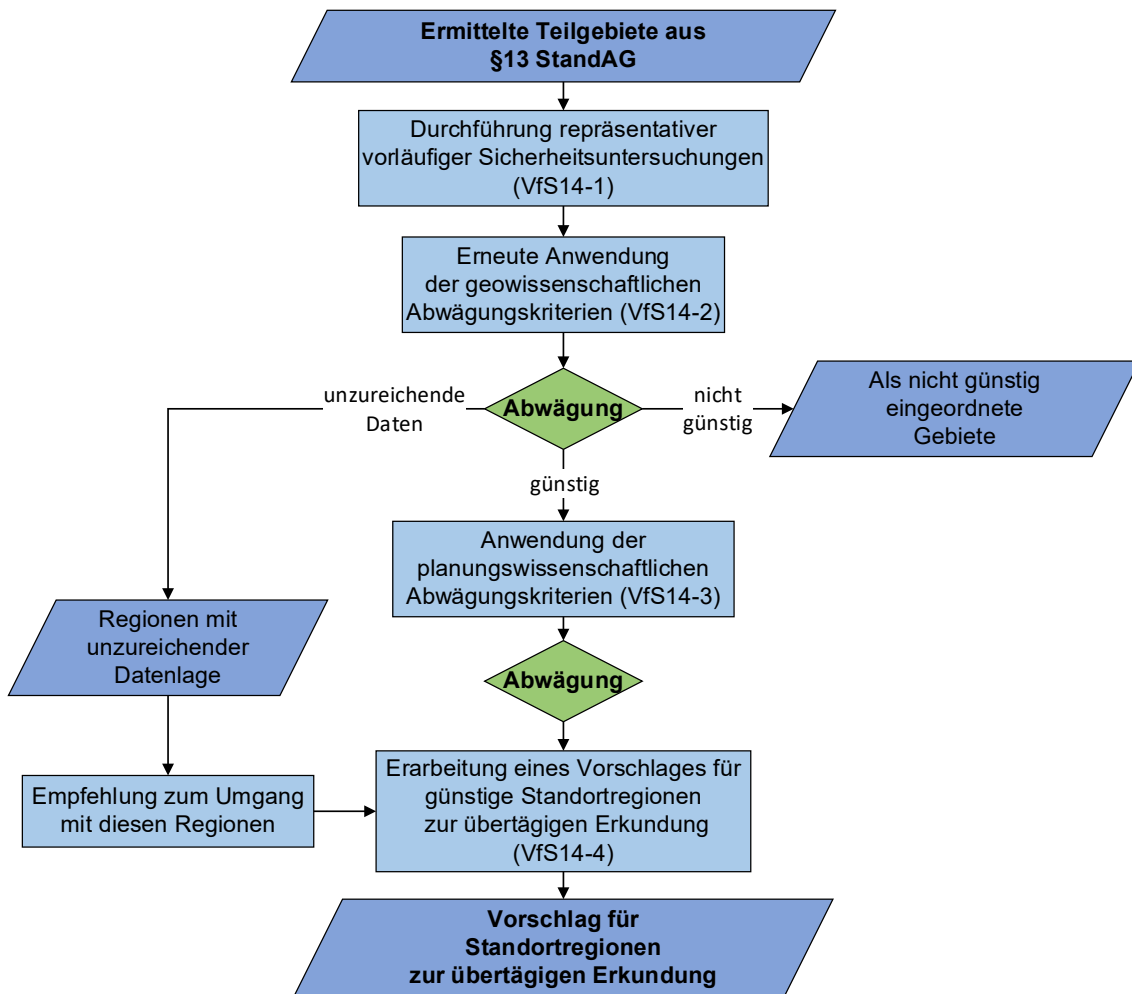
Eine Möglichkeit zur Begrenzung der Zahl günstiger Standorte bestünde in einer sicherheitsgerichteten „Verschärfung“ in der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (z. B. Verringerung der Parameterbandbreiten) und der Ergebnisse aus der sicherheitsgerichteten Bewertung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen oder auch der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien. Für diesen Schritt werden Abwägungen und unter Umständen auch vergleichende Bewertungen erforderlich sein. Dabei muss grundsätzlich eine nachvollziehbare Darstellung der Arbeiten für mögliche Rücksprünge im Verfahrensablauf gewährleistet werden.

VfS 14-4 wird nicht als ein relevanter Verfahrensschritt ausgewiesen da, wie in der Einleitung von Kap. 2 beschrieben, die Festlegung zutrifft, dass Abwägungen und vergleichende Bewertungen in den (vorangegangenen) Verfahrensschritten erfolgen, in denen auch die Anwendung der Kriterien stattfindet. Im VfS 14-4 erfolgt somit nur die Dokumentation der ermittelten Ergebnisse.

Im Folgenden werden die Herausforderungen in Bezug auf Abwägungen und/oder vergleichenden Bewertungen VfS 14-2 und 14-3 zusammengefasst.

#### **2.1.2.2 Herausforderungen**

Das Fließdiagramm der Abb. 2.3 zeigt den schematischen Verfahrensablauf zur Anwendung der Anforderungen und Kriterien gemäß § 14 StandAG und die Entscheidungsmöglichkeiten. Die Verfahrensschritte 14-5 und 14-6 sind für eine übersichtlichere Darstellung nicht im Fließdiagramm dargestellt. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob und wie die Ergebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, die erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien - auf Grundlage einer unveränderten Datenbasis - beeinflussen. Zudem ist unklar, welche Konsequenzen aus der Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien für die flächenmäßige Eingrenzung von Standortregionen resultieren. Deshalb werden in der Abb. 2.3 keine Entscheidungsmöglichkeiten aus der Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien dargestellt.



**Abb. 2.3** Schematisches Ablaufschema für den § 14 StandAG

### VfS 14-2 - Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

Gemäß § 14 Abs. 1 StandAG werden durch eine erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien auf Grundlage der Ergebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sogenannte günstige, übertägig zu erkundende Standortregionen identifiziert. Die für § 13 StandAG ausgewiesenen Fragestellungen und damit einhergehenden Herausforderungen für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gelten auch für den § 14 StandAG. Insbesondere weil keine neuen geowissenschaftlichen Daten erhoben werden und eine weitere Datenerhebung nicht vorgesehen ist. Eine Änderung der Informationslage ergibt sich unter Umständen für das Abwägungskriterium „Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“ nach Anlage 4 zu § 24, Abs. 3 StandAG. Denn im Rahmen der repräsentati-

ven vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im VfS 14-1 werden auch teilgebietspezifische geowissenschaftliche Langzeitprognosen zur Bewertung der langfristigen Stabilität der geologischen Verhältnisse erforderlich.

Die Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen soll zu einem Informationsgewinn führen, auf dessen Grundlage die erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erfolgt. Durch die Sicherheitsuntersuchungen sollen die Entscheidungen zur Auswahl günstiger Gebiete besser begründet und ein besseres Verständnis der sensitiven Parameter (Durchführung von Sensitivitätsanalysen) erlangt werden.

Es wird vorausgesetzt, dass Abwägungen und unter Umständen vergleichende Bewertungen, auf Grundlage der Ergebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, erst in dem nachfolgenden Verfahrensschritt 14-2 durchgeführt werden. Somit ergeben sich grundsätzlich keine Herausforderungen für den Verfahrensschritt 14-1 gemäß Aufgabenstellung. Trotzdem wird im Folgenden zusätzlich näher auf die Herausforderungen zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen eingegangen, da sich möglicherweise Einwirkungen auf die Herausforderungen in VfS 14-2 ergeben.

### **Herausforderungen bei der Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen**

Die Ergebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen für generische Endlager- und Sicherheitskonzepte sollen die Grundlage der jeweils anschließenden erneuten Anwendung der Abwägungskriterien bilden. Aufgrund unterschiedlicher Standortgegebenheiten und/oder Wirtsgesteinstypen müssen verschiedene Endlager- bzw. Sicherheitskonzepte entwickelt werden.

Wesentliche Arbeiten zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Phase 1 sind z. B.:

- die Erstellung generischer Endlagersysteme für die verschiedenen Wirtsgesteine,
- die Sichtung der vorhandenen Daten zur Parametrisierung und Identifizierung von Datenlücken und Kenntnislücken zum Endlagersystem, mit besonderem Augenmerk auf die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.

Die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen können zum Beispiel zur Ermittlung der Sensitivität und Relevanz einzelner Kriterien, für das jeweilige Endlagersystem bzw. deren Komponenten beitragen. Diese Untersuchungsergebnisse können zudem eine wesentliche Hilfestellung zu Erarbeitung der standortbezogenen Erkundungsprogramme (siehe VfS 14-4) sein.

Die sehr unterschiedliche Verfügbarkeit von Daten, die für die Teilgebiete zu erwarten ist, erschwert die Bewertung der Analyseergebnisse von repräsentativen vorläufigen Sicherheitsanalysen. Vor allem die in § 27 Abs. 1 („...*Bewertung, inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten erwartet werden kann.*“) geforderte Bewertung, kann wahrscheinlich erst ab der Phase 2 nach der übertägigen Erkundung in einem hinreichenden Tiefgang durchgeführt werden.

In der Phase 1 sind voraussichtlich probabilistische Untersuchungen zur Identifizierung von sensitiven Parametern insbesondere zur Weiterentwicklung der Sicherheitsuntersuchungen in Phase 2 zielführender. Nach /KOM 16/ sind die Ergebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Phase 1 aufgrund der geringen Kenntnisse zu den standortspezifischen geologischen Verhältnissen nur als orientierende Größe zu verstehen. Die Ergebnisse sind in dieser Phase noch mit hohen Ungewissheiten<sup>3</sup> behaftet und lassen damit keine hinreichend robuste Sicherheitsaussage erwarten.

Gemäß § 27 StandAG ist in den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen das Endlagersystem in seiner Gesamtheit zu betrachten und entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich seiner Sicherheit zu bewerten (siehe auch Kap. A.2.1 /FIS 17/). Zum Zeitpunkt der Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen sind die endlagerkonzeptionellen Planungen noch nicht weit vorgeschritten und somit werden noch keine detaillierten Angaben hierüber vorliegen. Es werden voraussichtlich generische, wirtsgesteinsspezifische Referenz-Endlagerkonzepte bestehen. Da insbesondere für das Wirtsgestein Kristallingestein bislang kein generisches Endlagerkonzept in Deutschland entwickelt wurde, ist zu erwarten, dass voraussichtlich Konzepte aus anderen Ländern übernommen werden /FIS 17/.

---

<sup>3</sup> Der Begriff „Ungewissheit“ wird in diesem Bericht in Übereinstimmung mit der EndlSiAnfV und der EndlSiUntV durchgängig anstelle des Synonyms „Unsicherheit“ verwendet. Hiervon muss in Kap. 5.6 abgewichen werden. Hintergrund ist, dass in der Entscheidungstheorie „Unsicherheit“ ein Überbegriff ist, unter dem die Ausdrücke „Ungewissheit“ und „Risiko“ subsummiert werden.

Wenn verschiedene Endlagerkonzepte für ein Wirtsgestein bzw. einen Untersuchungsraum möglich sind, könnte es bereits in der Phase 1 erforderlich werden, verschiedene Varianten zur Auswahl von Standortregionen zu berücksichtigen (z. B. Streckenlagerung oder Bohrlochlagerung). Die Erstellung von generischen Endlagerkonzepten für großflächige Gebiete, insbesondere für die Teilgebiete in der Phase 1, ist nur praktikabel, wenn innerhalb der Wirtsgesteinsformation nur geringe Variationen der geologischen Verhältnisse auftreten.

### **VfS 14-3 - Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien**

Gemäß § 14 Abs. 1, Satz 4 StandAG werden zum ersten Mal im Verfahren die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 25 StandAG angewendet. Die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien sind immer nachrangig (im Sinne der sicherheitsgerichteten Bewertung) zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zu betrachten. Die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien könnten in der Phase 1 zur weiteren Eingrenzung/Verkleinerung der ermittelten Standortregionen dienen. Sie könnten weiterhin den Ausschlag bei der Erarbeitung von Vorschlägen von übertägig zu erkundenden Standortregionen geben, sofern diese Gebiete unter Sicherheitsaspekten als gleichwertig zu betrachten sind. Die Ausführungen in § 25 StandAG:

*„Sie können auch für einen Vergleich zwischen Gebieten herangezogen werden, die unter Sicherheitsaspekten als gleichwertig zu betrachten sind.“*

lassen darauf schließen, dass ein Vergleich von Gebieten, ob in Phase 1B oder 2 nicht grundsätzlich ausgeschlossen wird. Eine weitere Einordnung der planungswissenschaftlichen Kriterien erfolgte in /SCH 16/. Hier wird angenommen, dass planungswissenschaftliche Kriterien nicht für einen sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagersystemen untereinander angewendet werden, sondern zur Abwägung gegenüber bestehenden Schutzgütern.

Die Ausführungen in § 25 StandAG und der Anlage 12 implizieren, dass die in § 25 ausgewiesenen Schutzgüter bereits existieren und bereits in Phase 1 Kenntnisse hierzu vorliegen und damit in Ausdehnung und Lage bekannt sind. Deshalb sollten keine Herausforderungen durch Datenungleichheiten vorliegen.

### **2.1.3 Phase 1C - Entscheidung über übertägige Erkundung und Erkundungsprogramme gemäß § 15 StandAG**

Die Phase 1C (§ 15 StandAG) beinhaltet Aufgaben des BfE und Bundestag/Bundesrat zur Festlegung der Standortregionen zur übertägigen Erkundung und der entsprechenden Erkundungsprogramme.

#### **2.1.3.1 Verfahrensablauf**

Die Verfahrensschritte des § 15 StandAG sind in der Tab. 2.3 zusammengefasst. Gemäß § 4 Abs. 2 StandAG wird der Vorschlag der BGE nach § 14 Abs. 2 StandAG bzw. VfS 14-6 unmittelbar nach Übermittlung an das BfE veröffentlicht. Das BfE initiiert die Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 7 Abs. 2 Nr. 1 StandAG (VfS 15-1). Danach prüft das BfE den Vorschlag der BGE für die übertägig zu erkundenden Standortregionen (VfS 15-2). Wenn das BfE von diesem Vorschlag abweichen will, hat die BGE Gelegenheit hierzu Stellung zu nehmen.

Das BfE erarbeitet eine begründete Empfehlung zum Vorschlag der BGE (nach § 14 Abs. 2 StandAG) unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, einschließlich der Beratungsergebnisse des Nationalen Begleitgremiums (VfS 15-3). Der Vorschlag (nach § 14 Abs. 2 StandAG) wird einschließlich aller erforderlichen Unterlagen nach § 15 Abs. 2 StandAG an das BMU übermittelt (VfS 15-5). Die Bundesregierung unterrichtet den Deutschen Bundestag und den Bundesrat über die Standortregionen. Die Bundesregierung legt per Bundesgesetz die übertägig zu erkundenden Standortregionen fest und wie mit den Gebieten, zu denen keine hinreichenden Informationen für die Anwendung der Kriterien nach den §§ 22 bis 24 StandAG vorliegen, weiter verfahren wird (VfS 15-5).

Das BfE überprüft die durch BGE vorgeschlagenen standortbezogenen übertägigen Erkundungsprogramme für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standortregionen und legt diese fest. Die Ergebnisse sowie Änderungen werden im Bundesanzeiger durch das BfE veröffentlicht (VfS 15-6).

**Tab. 2.3** Verfahrensschritte (VfS) im § 15 StandAG, Zuständigkeit: BfE und Bundestag/Bundesrat

<b>VfS</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>15-1</b> § 7 Abs. 2, Punkt 1	Veröffentlichung des Vorschlags der BGE durch BfE (Start der Öffentlichkeitsbeteiligung).
<b>15-2</b> Abs. 1, Satz 1	Prüfung des Vorschlags der BGE durch BfE
<b>15-3</b> Abs. 2, Satz 1	Erarbeitung einer begründeten Empfehlung zum Vorschlag der BGE
<b>15-4</b> Abs. 2, Satz 1	Übermittlung des Vorschlags einschließlich aller hierfür erforderlichen Unterlagen durch BfE an BMU
<b>15-5</b> Abs. 3	Festlegung zum weiteren Verfahren mit den Gebieten, zu denen keine hinreichenden Informationen für die Anwendung der Kriterien nach den §§ 22 bis 24 vorliegen, wird durch Bundesgesetz bestimmt
<b>15-6</b> Abs. 4	Prüfung der standortbezogenen Erkundungsprogramme zur überträgigen Erkundung für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standortregionen und Festlegung sowie Veröffentlichung im Bundesanzeiger durch BfE

Die identifizierten Verfahrensschritte und deren Aufgabenstellung bzw. Herausforderungen führen zu dem Ergebnis, dass unter Umständen im VfS 15-2 und 15-3 Arbeiten zu Abwägungen und vergleichenden Bewertungen durchzuführen wären. Im VfS 15-2 prüft das BfE den Vorschlag der BGE und muss insbesondere die durchgeführten Arbeiten zur Identifizierung der Teilgebiete (VfS 13-3) und Standortregionen (VfS 14-2 und 14-3) nachvollziehen. Im Rahmen der Prüfaufgaben des BfE ist es möglich, dass eigene Abwägungen und/oder Vergleiche erfolgen, um die Plausibilität, Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses zu prüfen. Es ist zu erwarten, dass die Herausforderungen und Möglichkeiten der methodischen Ansätze denen entsprechen, wie sie in den jeweils entsprechenden Verfahrensschritten der BGE durchzuführen sind. Die Herausforderungen in Bezug auf die Abwägungen und/oder vergleichenden Bewertungen entsprechen somit im Wesentlichen den Ausführungen in den Kapiteln 2.1.1.2 und 2.1.2.2. Daher erfolgt keine separate Betrachtung der Herausforderungen für den betreffenden Verfahrensschritt.

Es ist noch unklar, ob bzw. mit welchem Gewicht die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens (Öffentlichkeitsbeteiligung), einschließlich der Beratungsergebnisse des NBG in die begründete Empfehlung des BfE (VfS 15-3) zum Vorschlag der BGE einfließen.

Grundsätzlich können aus der Öffentlichkeitsbeteiligung Einwendungen kommen, welche Seitens des BfE zu Abwägungen und/oder zu vergleichenden Bewertungen unterschiedlicher Untersuchungsräume führen. Diese Herausforderungen sind jedoch nicht Gegenstand der Aufgabenstellung dieses Vorhabens und werden deshalb nicht weiter untersucht.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte aus Phase 1C bzw. Tab. 2.3 erfolgt im Anhang A.3.

## **2.2 Phase 2: Übertägige Erkundung und Festlegungen für untertägige Erkundungen**

Die Hauptziele der Phase 2 gemäß § 16 StandAG (Phase 2A, Kap. 2.2.1) bestehen in der Durchführung übertägiger Erkundungsprogramme und der Eingrenzung der Standortregionen (Fläche und Anzahl) auf Standorte für die untertägige Erkundung. Im § 17 StandAG (Phase 2B, Kap. 2.2.2) werden die Aufgaben des BfE und von Bundestag/Bundesrat zur Festlegung der Standorte zur untertägigen Erkundung und der entsprechenden Erkundungsprogramme beschrieben.

Die in Phase 1 ermittelten Standortregionen haben voraussichtlich eine hohe Variabilität der Daten in quantitativer und qualitativer Hinsicht. Deshalb soll in der Phase 2 durch die übertägigen Erkundungsmaßnahmen der nach § 15 StandAG festgelegten Standortregionen neben dem Erkenntniszugewinn im Allgemeinen ein mögliches Ungleichgewicht in Bezug auf die Datenquantität und -qualität zwischen den verschiedenen Standortregionen minimiert werden. In Phase 2 wird somit eine bessere Datenbasis zur Anwendung der Kriterien und Anforderungen (nach §§ 22 bis 24 StandAG) und zur Erstellung der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (nach § 27 StandAG) geschaffen.

### **2.2.1 Phase 2A - Übertägige Erkundung und Vorschlag für untertägige Erkundung gemäß § 16 StandAG**

Gemäß § 16 StandAG ist die BGE für die Durchführung übertägiger Erkundungsprogramme, deren Auswertung und die Vorbereitung der untertägigen Erkundungen zuständig.



### **2.2.1.1      Verfahrensablauf**

Die gemäß § 15 Abs. 3 StandAG festgelegten Standortregionen, werden von der BGE übertägig nach den standortbezogenen Erkundungsprogrammen (gemäß § 15 Abs. 4 StandAG untersucht und geowissenschaftliche Daten erhoben (VfS 16-1). Auf der Grundlage der Erkundungsergebnisse hat die BGE gem. § 16 Abs. 1 StandAG weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (nach § 27 StandAG) durchzuführen (VfS 16-2). Zum ersten Mal im Standortauswahlverfahren werden zusätzlich sozioökonomische Potenzialanalysen für die Standortregionen gem. § 16 Abs. 1 Satz 3 StandAG durchgeführt (VfS 16-3). Auf der Grundlage der übertägigen Erkundungsergebnisse und der Ergebnisse der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen werden die Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 23 StandAG erneut angewendet (VfS 16-4). Auf die verbleibenden Standortregionen werden auf der Grundlage der Ergebnisse der übertägigen Erkundung und der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen aus VfS 16-2, zur Ermittlung günstiger Standorte zur untertägigen Erkundung, die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 erneut angewendet (VfS 16-5). Zur weiteren flächenmäßigen Eingrenzung der verbliebenen Untersuchungsräume und um die Auswahl der unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten potenziell geeigneten und gleichwertigen Standorte weiter einzuengen, werden nachrangig zu den geowissenschaftlichen Kriterien die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien angewendet (VfS 16-6).

Im Anschluss an die erfolgten Untersuchungen wird von der BGE ein Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standorte erarbeitet (VfS 16-7). Für den Vorschlag sind auch die möglichen Umweltauswirkungen sowie sonstige mögliche Auswirkungen des Endlagervorhabens zu erarbeiten. Für die vorgeschlagenen Standorte erstellt die BGE im nächsten Schritt Erkundungsprogramme und Prüfkriterien für die untertägig zu erkundenden Standorte (VfS 16-8). Zuletzt übermittelt die BGE ihren Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standorte und der entsprechenden Erkundungsprogramme und Prüfkriterien an das BfE (VfS 16-9). Die einzelnen Verfahrensschritte sind in der Tab. 2.4 nochmal zusammengefasst.

**Tab. 2.4** Verfahrensschritte (VfS) im § 16 (Phase 2A) StandAG, Zuständigkeit: BGE

<b>VfS</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>16-1</b> Abs. 1, Satz 1	Übertägige Erkundung der Standortregionen
<b>16-2</b> Abs. 1, Satz 2	Durchführung weiterentwickelter vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen
<b>16-3</b> Abs. 1, Satz 3	Durchführung sozioökonomischer Potenzialanalysen (söP) für die Standortregionen.
<b>16-4</b> Abs. 2, Satz 1	Erneute Anwendung der Anforderungen und Kriterien (§§ 22 bis 23)
<b>16-5</b> Abs. 2, Satz 1	Erneute Anwendung und Abwägung der Abwägungskriterien nach §24 zur Ermittlung günstiger Standorte
<b>16-6</b> Abs. 2, Satz 2	Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach den Vorgaben in § 25
<b>16-7</b> Abs. 3	BGE erarbeitet Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standorte
<b>16-8</b> Abs. 2, Satz 3	Erarbeitung von Erkundungsprogrammen und Prüfkriterien für die untertägige Erkundung der in VfS 16-7 ermittelten Standorte
<b>16-9</b> Abs. 3, Abs. 4	BGE übermittelt seinen Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standorte und die entsprechenden Erkundungsprogramme und Prüfkriterien an das BfE.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte aus der Phase 2A bzw. Tab. 2.4 erfolgt im Anhang A.4. Die in § 16 StandAG identifizierten Verfahrensschritte, in denen Abwägungen und/oder vergleichende Bewertungen durchgeführt werden, sind:

- VfS 16-5: die Bewertung zur Ermittlung günstiger Standorte zur untertägigen Erkundung erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und der erneuten Anwendung der Abwägungskriterien nach § 24 StandAG,
- VfS 16-6: die Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach den Vorgaben in § 25 StandAG.

Analog zu der Beschreibung in Kap. 2.1.2.1 zum VfS 14-4, gelten die gleichen Überlegungen auch für den VfS 16-7. Im VfS 16-7 erarbeitet die BGE einen Vorschlag für die die untertägig zu erkundenden Standorte. Auch dieser Vorschlag muss nicht zwingend alle günstigen Standorte enthalten, sondern nur eine begründete „Auswahl“. Insbesondere

dere wenn eine Vielzahl an Standorten ermittelt wird, muss eine Auswahl zur untertägigen Erkundung getroffen werden, da diese Arbeiten sehr kostspielig und aufwendig sind. Um zu einer „Auswahl“ zu kommen müssen vermutlich zusätzliche Abwägungen und vergleichende Bewertungen zwischen den unterschiedlichen Standorten durchgeführt werden. Somit könnte auch hier postuliert werden, dass der VfS 16-7 als ein relevanter Verfahrensschritt ausgewiesen werden müsste. Es gilt jedoch auch hier die Festlegung, dass Abwägungen und vergleichende Bewertungen in den entsprechenden Verfahrensschritten 16-5 und 16-6 erfolgen. Im VfS 16-7 findet somit nur die Dokumentation der ermittelten Ergebnisse statt.

Im Folgenden werden die Herausforderungen in Bezug auf die Abwägungen und/oder vergleichenden Bewertungen der genannten Verfahrensschritte zusammengefasst.

### **2.2.1.2 Herausforderungen**

Das Fließdiagramm in Abb. 2.4 zeigt den schematischen Verfahrensablauf zur Anwendung der Anforderungen und Kriterien gemäß § 16 StandAG und die möglichen Entscheidungsmöglichkeiten. Die Verfahrensschritte 16-8 und 16-9 sind für eine übersichtlichere Darstellung nicht im Fließdiagramm dargestellt.

Es wird angemerkt, dass der Verfahrensablauf gemäß StandAG vorsieht, dass die weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen vor der erneuten Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG erfolgen.

Der § 16 StandAG trifft keine Aussagen oder gibt Hinweise zu Problemen, die aufgrund unzureichender Daten zur Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG entstehen können. Es wird vermutet, dass davon ausgegangen wird, dass zur Anwendung der Anforderungen und Kriterien alle Informationen durch die übertägige Erkundung erhoben werden können. Deshalb entfällt im Fließdiagramm (Abb. 2.4) der Strang zum Umgang mit Gebieten mit unzureichender Datenlage, im Gegensatz zur Vorgehensweise nach § 14 StandAG (siehe Kap. 2.1.2.2, Abb. 2.3).

Der Zeitpunkt, an dem die Ergebnisse der sozioökonomischen Potentialanalysen im Verfahrensablauf nach § 16 StandAG berücksichtigt werden sollen, ist im StandAG nicht explizit festgelegt. Das StandAG besagt lediglich, dass entsprechende Analysen durchzuführen sind. Nach /KOM 16/ sind die Ergebnisse im Rahmen der Abwägung zwischen

den unter Sicherheitsaspekten gleichwertig gut geeigneten Standortregionen beziehungsweise Standorten zu berücksichtigen. Deshalb wird für die eigentliche „Anwendung“ der Ergebnisse der sozioökonomischen Potentialanalysen kein eigener Verfahrensschritt ausgewiesen. Die Berücksichtigung erfolgt in dem Abwägungsschritt, in dem die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien abgewogen werden.

Weiterhin soll die BGE die möglichen Umweltauswirkungen und sonstigen Auswirkungen eines Endlagervorhabens (für die vom Vorschlag betroffenen Standorte) darstellen (§ 16 Abs. 3 Satz 2 StandAG). Es werden keine Hinweise gegeben, ob und, wenn ja, wie die Ergebnisse in die Auswahl von Endlagerstandorten für die untertägige Erkundung eingehen sollen.

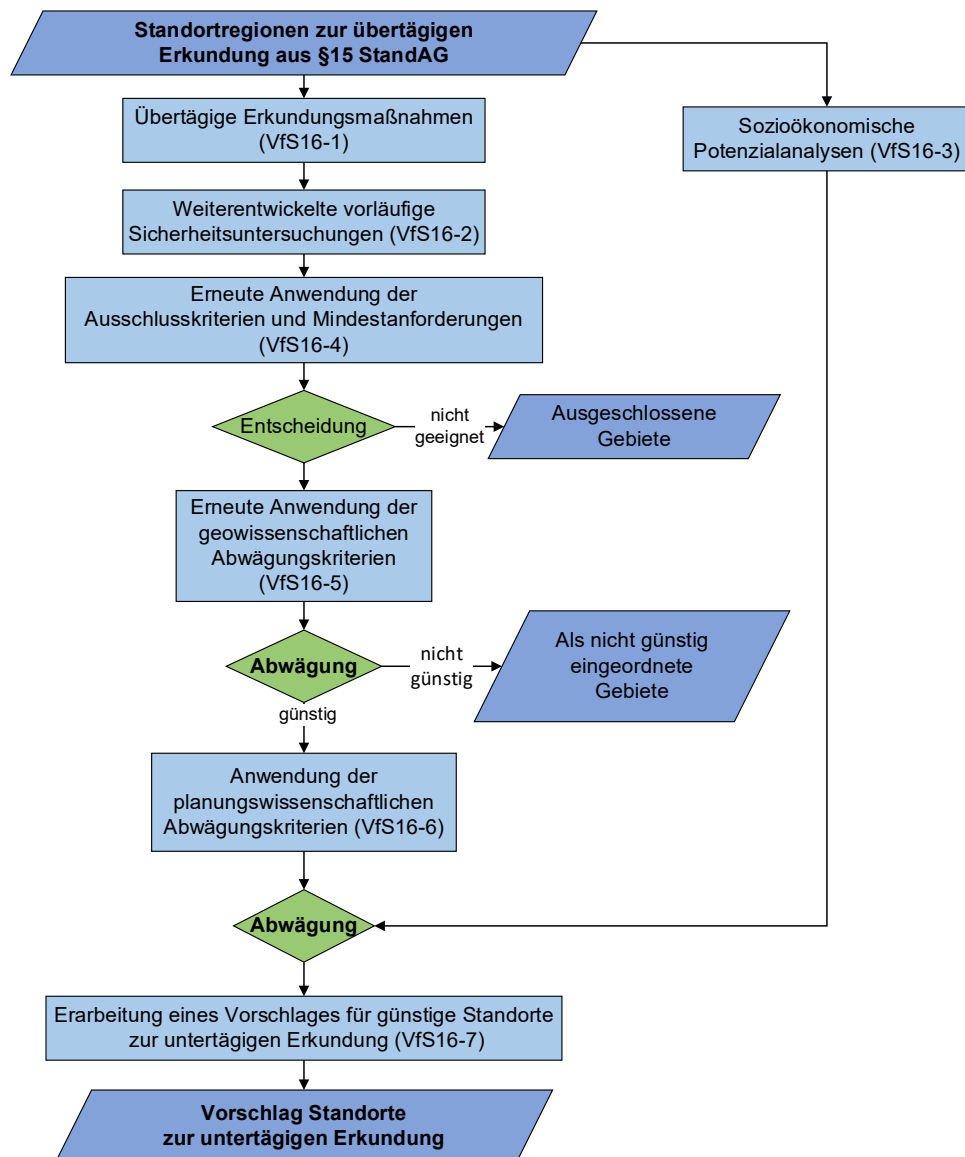


Abb. 2.4 Ablaufschema nach § 16 StandAG

## **VfS 16-5 - Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien**

VfS 16-5 zieht die Ergebnisse der übertägigen Erkundung als Grundlage zur erneuten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und deren Abwägung heran. Die für § 13 und § 14 StandAG ausgewiesenen Fragestellungen und damit einhergehenden Herausforderungen für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gelten zum Teil auch für den § 16 StandAG. Durch die Herstellung einer vergleichbaren Datenlage zwischen einzelnen Regionen entfällt voraussichtlich ein Großteil der Herausforderungen, welche aufgrund der Datenungleichheiten in der Phase 1 bestehen. Sicherheitsgerichtete Aussagen bzw. Bewertungen sind aufgrund der besseren Datenlage belastbarer.

/KOM 16/ geht davon aus, dass der Detaillierungsgrad der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und die Aussagekraft ihrer Ergebnisse aufgrund des Informationsgewinns durch die Erkundung der Standortregionen zunimmt. Mit der Weiterentwicklung des Kenntnisstandes sind die Sicherheits- und Endlagerkonzepte für die verschiedenen Wirtsgesteine zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Dadurch kann in Verbindung mit der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien eine vertiefte sicherheitsgerichtete Gesamtbewertung der Standorte unter Berücksichtigung der erwarteten Entwicklung des Gesamtsystems (Nahfeld und Fernfeld, Geosphäre) erfolgen. Dadurch können Ungewissheiten in der Anwendung der Abwägungskriterien und in Sicherheitsuntersuchungen (z. B. Parameterbandbreiten) verringert werden und eine besser belastbare Bewertung erfolgen.

Ab der Phase 2 ist es möglich aus Sicherheitsuntersuchungen bestimmte Sicherheitsindikatoren bzw. deren Konsequenzen abzuleiten. Hierzu zählt z. B. der Indikator zur Beurteilung der radiologischen Konsequenz. Die Ergebnisse können in Abwägungen und vergleichenden Bewertungen verwendet werden.

Wie in jeder Phase müssen weiterhin bestehende Ungewissheiten bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und bei der Durchführung der Sicherheitsuntersuchungen in die Abwägung ebenso herausgestellt und bewertet werden, wie die Robustheit der Sicherheitsaussage und der Sicherheit des Endlagersystems, d. h. bestehende konservative Annahmen und Sicherheitsreserven /KOM 16/.

## **Einschätzung der Erfüllung der Sicherheitsanforderungen**

Auch in der Phase 2 erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen eine erneute Einschätzung, ob die Standortregionen die Festlegungen der EndlSiAnfV /BMU 19b/ nach § 27 StandAG erfüllen können. Gemäß der EndlSiAnfV (vgl. Kap. 1.3) wird der Umfang und die Tiefe der Prüfungen erheblich umfangreicher als für Phase 1B (§ 14 StandAG) sein. Insbesondere müssen weiterentwickelte Endlagerkonzepte vorliegen, die nicht mehr nur wirtsgesteinsspezifisch-konzeptionell sind, sondern die jeweils vorliegenden geologischen Bedingungen in den Standortregionen berücksichtigen müssen.

## **VfS 16-6 - Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien**

Nach der übertägigen Erkundung sollen die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 25 StandAG) nach § 16 Abs. 2 Satz 2 StandAG erneut angewendet werden. Wie schon für die Phase 1 (Kap. 2.1.2.2) erwähnt, liegen voraussichtlich alle Informationen zur Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien vor. Im Grunde wird sich die Datenlage im Vergleich zur Phase 1 nicht wesentlich ändern. Änderungen könnten sich durch die relativ langen Verfahrenlaufzeiten zwischen den Phasen und währenddessen erfolgende neue bzw. veränderte planungswissenschaftliche Festlegungen ergeben. Nach § 21 Abs. 2 bis 4 StandAG sind allerdings Gebiete, die als Standort mit bestmöglicher Sicherheit für die Endlagerung in Betracht kommen, vorrangig vor solchen Veränderungen zu schützen, die ihre Eignung als Endlagerstandort beeinträchtigen können.

Die für Phase 1 aufgezeigten Herausforderungen gelten grundsätzlich auch für die Phase 2. Es wird erwartet, dass sich durch die Verkleinerung der Untersuchungsräume von Regionen zu Standorten auch die Zielrichtung der Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien etwas ändert. In Phase 1 lag der Fokus auf der Verkleinerung großflächiger (Teil-)Gebiete zu Regionen. In Phase 2 können die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien helfen diese Regionen auf konkrete Standorte einzugrenzen.

Wie für die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien muss methodisch klar festgelegt werden, ob bzw. mit welchem Gewicht die Ergebnisse der sozioökonomischen Potenzialanalysen in einer Gesamtabwägung unter dem Primat der Sicherheit (entsprechend § 1 StandAG) berücksichtigt werden können. Dies gilt insbesondere für den Fall,

wenn es keine Standortkandidaten mit einer vergleichbaren sicherheitstechnischen Eignung gibt.

## **2.2.2 Phase 2B - Festlegung Standorte für die untertägige Erkundung gemäß § 17 StandAG**

§ 17 StandAG legt die Aufgabenstellungen zur Festlegung der Standorte für die untertägige Erkundung und der zugehörigen Erkundungsprogramme fest.

### **2.2.2.1 Verfahrensablauf**

Gemäß § 4 Abs. 2 wird der Vorschlag der BGE nach § 16 Abs. 3 StandAG (VfS 16-9) unmittelbar nach Übermittlung an das BfE veröffentlicht. Das BfE initiiert die Öffentlichkeitsbeteiligung gemäß § 7 Abs. 2 Nr. 2 StandAG (VfS 17-1). Danach überprüft das BfE den Vorschlag der BGE für die untertägig zu erkundenden Standorte (VfS 17-2). Wenn das BfE von diesem Vorschlag abweichen will, hat die BGE Gelegenheit hierzu Stellung zu nehmen.

Das BfE erarbeitet eine begründete Empfehlung zum Vorschlag der BGE unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens einschließlich der Beratungsergebnisse des Nationalen Begleitgremiums (VfS 17-3).

Das BfE legt durch Bescheid fest, ob das bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführte Standortauswahlverfahren nach den Regelungen des StandAG durchgeführt wurde und ob der Auswahlvorschlag dessen entspricht (VfS 17-4). Es können unter bestimmten Voraussetzungen Einwendungen/Rechtsbehelfe gegen diesen Bescheid eingereicht werden.

Der Vorschlag (nach § 16 Abs. 3) wird einschließlich aller erforderlichen Unterlagen nach § 17 Abs. 2 StandAG an das BMU übermittelt (VfS 17-5). Die Bundesregierung legt per Bundesgesetz die untertägig zu erkundenden Standorte fest (VfS 17-6).

Das BfE prüft die standortbezogenen Erkundungsprogramme zur untertägigen Erkundung. Hiernach werden diese im Bundesanzeiger veröffentlicht (VfS 17-7). Die ermittelten Verfahrensschritte des § 17 StandAG sind in der Tab. 2.5 zusammengefasst.

**Tab. 2.5** Verfahrensschritte (VfS) im § 17 nach StandAG, Zuständigkeit: BfE und Bundesregierung / Bundestag / Bundesrat

<b>VfS</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>17-1</b> § 7 Abs. 2, Punkt 2	Das BfE veröffentlicht den Vorschlag der BGE (nach § 16 Abs. 3)
<b>17-2</b> Abs. 1, Satz 1	Prüfung des Vorschlags (nach § 16 Abs. 3)
<b>17-3</b> Abs. 2, Satz 1	Auswertung der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, einschließlich der Beratungsergebnisse des NBG und Erarbeitung einer begründeten Empfehlung zum Vorschlag der BGE
<b>17-4</b> Abs. 3	Feststellung durch Bescheid des BfE, ob das bisherige Standortauswahlverfahren nach den Regelungen des StandAG durchgeführt wurde und der Auswahlvorschlag diesen entspricht
<b>17-5</b> Abs. 2, Satz 1	Übermittlung des Vorschlags der BGE (nach § 16 Abs. 3) und zusätzlicher Unterlagen an das BMU
<b>17-6</b> Abs. 2, Satz 3 und Satz 4	Unterrichtung des Deutschen Bundestags und des Bundesrats über Standorte, die untertägig erkundet werden sollen. Bestimmung der untertägig zu erkundenden Standorte durch Bundesgesetz
<b>17-7</b> Abs. 4	Das BfE prüft die standortbezogenen Erkundungsprogramme und Prüfkriterien zur untertägigen Erkundung für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standorte, legt diese fest und veröffentlicht sie sowie Änderungen im Bundesanzeiger

Die identifizierten Verfahrensschritte und deren Aufgabenstellung bzw. Herausforderungen führen zu dem Ergebnis, dass unter Umständen im VfS 17-2 und 17-3 Arbeiten zu Abwägungen und vergleichenden Bewertungen durchzuführen wären. Im VfS 17-2 prüft das BfE den Vorschlag der BGE und muss insbesondere die durchgeführten Arbeiten zur Identifizierung der günstigen Standorte nachvollziehen. Analog zum § 15 StandAG bzw. Phase 1C (Kap. 2.1.3.1) gelten auch hier die Aussagen, dass im Rahmen der Prüfungsaufgaben des BfE es möglich ist, dass eigene Abwägungen und/oder Vergleiche erfolgen müssen, um die Plausibilität, Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses zu prüfen. Es ist zu erwarten, dass die Herausforderungen und Möglichkeiten der methodischen Ansätze denen entsprechen, wie sie in den jeweils entsprechenden Verfahrensschritten der BGE durchzuführen sind. Die Herausforderungen in Bezug auf die Abwägungen und/oder vergleichenden Bewertungen entsprechen somit im Wesentlichen den Ausführungen im Kapitel 2.2.1.2. Daher erfolgt keine separate Betrachtung der Herausforderungen für den betreffenden Verfahrensschritt.



Es ist noch unklar, ob bzw. mit welchem Gewicht die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens (Öffentlichkeitsbeteiligung), einschließlich der Beratungsergebnisse des NBG in die begründete Empfehlung des BfE (VfS 17-3) zum Vorschlag der BGE einfließen. Grundsätzlich können aus der Öffentlichkeitsbeteiligung Einwendungen kommen, welche seitens des BfE zu Abwägungen und/oder zu vergleichenden Bewertungen unterschiedlicher Untersuchungsräume führen. Diese Herausforderungen sind jedoch nicht Gegenstand der Aufgabenstellung dieses Vorhabens.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte aus der Phase 2B bzw. Tab. 2.5 erfolgt im Anhang A.5.

### **2.3 Phase 3: untertägige Erkundung und Standortentscheidung**

In Phase 3 soll ein detailliertes Verständnis der in Phase 2 ermittelten Standorte durch untertägige Erkundungen erlangt werden. Die Hauptziele der Phase 3 bestehen in der Durchführung untertägiger Erkundungsprogramme und der Erarbeitung eines Standortvorschlages durch die BGE (§ 18 StandAG), der abschließenden Bewertung des Standortvorschlages durch das BfE (§ 19 StandAG) und der Standortentscheidung durch Bundestag/Bundesrat (§ 20 StandAG).

Es wird durch die untertägige Erkundung eine fundierte Datenbasis der verschiedenen Standorte, speziell der Eigenschaften des Wirtsgesteins und seiner überlagernden Schichtenfolgen, geschaffen. Auf Grundlage dieser Datenbasis können umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen erfolgen. Deren Ergebnisse sollten fundierte Abwägungen und Vergleiche der Standorte erlauben. Nach § 8 EndlSiUntV müssen die Sicherheitsuntersuchungen in den Phasen 2 und 3 auch die Betriebsphase umfassend berücksichtigen. So ist beispielsweise die Durchführung von Störfallanalysen vorgesehen. Letztmalig werden die Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG zur Ermittlung geeigneter Standorte angewendet. Zu diesem Zeitpunkt sollte die Informationslage so umfassend sein, dass alle Anforderungen und Kriterien angewendet werden können.

### **2.3.1 Phase 3A - Untertägige Erkundung und Standortvorschläge gemäß § 18 StandAG**

Der § 18 StandAG legt den Verfahrensablauf von der untertägigen Erkundung bis zum Vorschlag eines Standorts durch die BGE und der nachfolgenden Umweltverträglichkeitsprüfung durch das BfE fest.

#### **2.3.1.1 Verfahrensablauf**

Die gemäß § 17 Abs. 2 StandAG festgelegten Standortregionen werden von der BGE untertägig nach den standortbezogenen Erkundungsprogrammen untersucht und Geodaten erhoben (VfS 18-1). Auf der Grundlage der Erkundungsergebnisse hat die BGE umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (nach § 27 StandAG) durchzuführen (VfS 18-2). Zudem wird ein Bericht zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) nach § 16 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung erstellt (VfS 18-3). Auf der Grundlage der Ergebnisse der untertägigen Erkundung und der umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen aus VfS 18-2, werden zunächst die Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 23 StandAG (VfS 18-4) und anschließend auf die übrig gebliebenen Standorte die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG erneut angewendet (VfS 18-5). Um die Auswahl der unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten potenziell geeigneten Standorte weiter einzuengen, werden nachrangig zu den geowissenschaftlichen Kriterien, die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien angewendet (VfS 18-6). Die BGE erarbeitet einen Standortvorschlag auf der Grundlage einer vergleichenden Bewertung der zu betrachtenden Standorte (VfS 18-7) und übermittelt diesen an das BfE (VfS 18-8).

Das BfE führt auf Grundlage der seitens BGE vorgelegten Unterlagen die Umweltverträglichkeitsprüfung entsprechend des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (entsprechend den §§ 17 bis 21 und 54 bis 57 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung /BUN 90/) durch (VfS 18-9). Die einzelnen Verfahrensschritte sind in der Tab. 2.6 nochmal zusammengefasst.

**Tab. 2.6** Verfahrensschritte (VfS) nach § 18 (Phase 3A) nach StandAG, Zuständigkeit: BGE, VfS 18-9 BfE

<b>VfS</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>18-1</b> Abs. 1, Satz 1	Untertägige Erkundung der durch Bundesgesetz ausgewählten Standorte
<b>18-2</b> Abs. 1, Satz 2	Durchführung umfassender vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen nach § 27
<b>18-3</b> Abs. 1, Satz 2	Erstellung eines UVP-Berichts, nach § 16 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung
<b>18-4</b> Abs. 2, Satz 1	Anwendung der Prüfkriterien sowie eine erneute Anwendung der Anforderungen und Kriterien (§§ 22 und 23)
<b>18-5</b> Abs. 2, Satz 1	Erneute Anwendung und Abwägung der Abwägungskriterien nach § 24
<b>18-6</b> Abs. 2, Satz 2	Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 25
<b>18-7</b> Abs. 3, Satz 2	Erarbeitung eines Standortvorschlages nach § 18 Abs. 3 auf der Grundlage einer vergleichenden Bewertung der zu betrachtenden Standorte
<b>18-8</b> Abs. 3, Satz 1 und 2	Übermittlung des Standortvorschlags für ein Endlager mit Begründung an das BfE
<b>18-9</b> Abs. 3, Satz 3	Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung durch BfE

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte aus der Phase 3A bzw. Tab. 2.6 erfolgt im Anhang A.6. Abwägungen und/oder vergleichende Bewertungen werden in folgenden Verfahrensschritten durchgeführt:

- VfS 18-5: Erneute Anwendung der Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG auf der Grundlage der Ergebnisse der untertägigen Erkundung und der Ergebnisse der Sicherheitsuntersuchungen, um geeignete Standorte nach § 18 Abs. 3 StandAG zu ermitteln,
- VfS 18-6: Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach den Vorgaben in § 25,
- VfS 18-7: Erarbeitung eines Vorschlages für geeignete Standorte gemäß § 18 Abs. 3 StandAG auf der Grundlage einer vergleichenden Bewertung der zu betrachtenden Standorte.

Im Folgenden werden die Herausforderungen in Bezug auf die Abwägungen und/oder vergleichenden Bewertungen dieser beiden Verfahrensschritte zusammengefasst.

### **2.3.1.2 Herausforderungen**

Das Fließdiagramm in Abb. 2.5 zeigt den schematischen Verfahrensablauf zur Anwendung der Anforderungen und Kriterien gemäß § 18 StandAG und die Entscheidungsmöglichkeiten. Die Verfahrensschritte 18-3 (Erarbeitung UVP-Bericht), 18-8 und 18-9 sind für eine übersichtlichere Darstellung nicht im Fließdiagramm dargestellt.

Nach § 18 StandAG sollen alle Daten zur Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 25 StandAG vorliegen, deswegen entfallen Herausforderungen aufgrund nicht hinreichender Datenlagen.

Vom BfE werden für die entsprechenden Standorte Umweltverträglichkeitsprüfungen veranlasst. Im StandAG ist nicht festgelegt, wie die Ergebnisse der Prüfungen bei der Auswahl von Endlagerstandorten berücksichtigt werden sollen. Deswegen erfolgt keine Berücksichtigung im Ablaufschema.

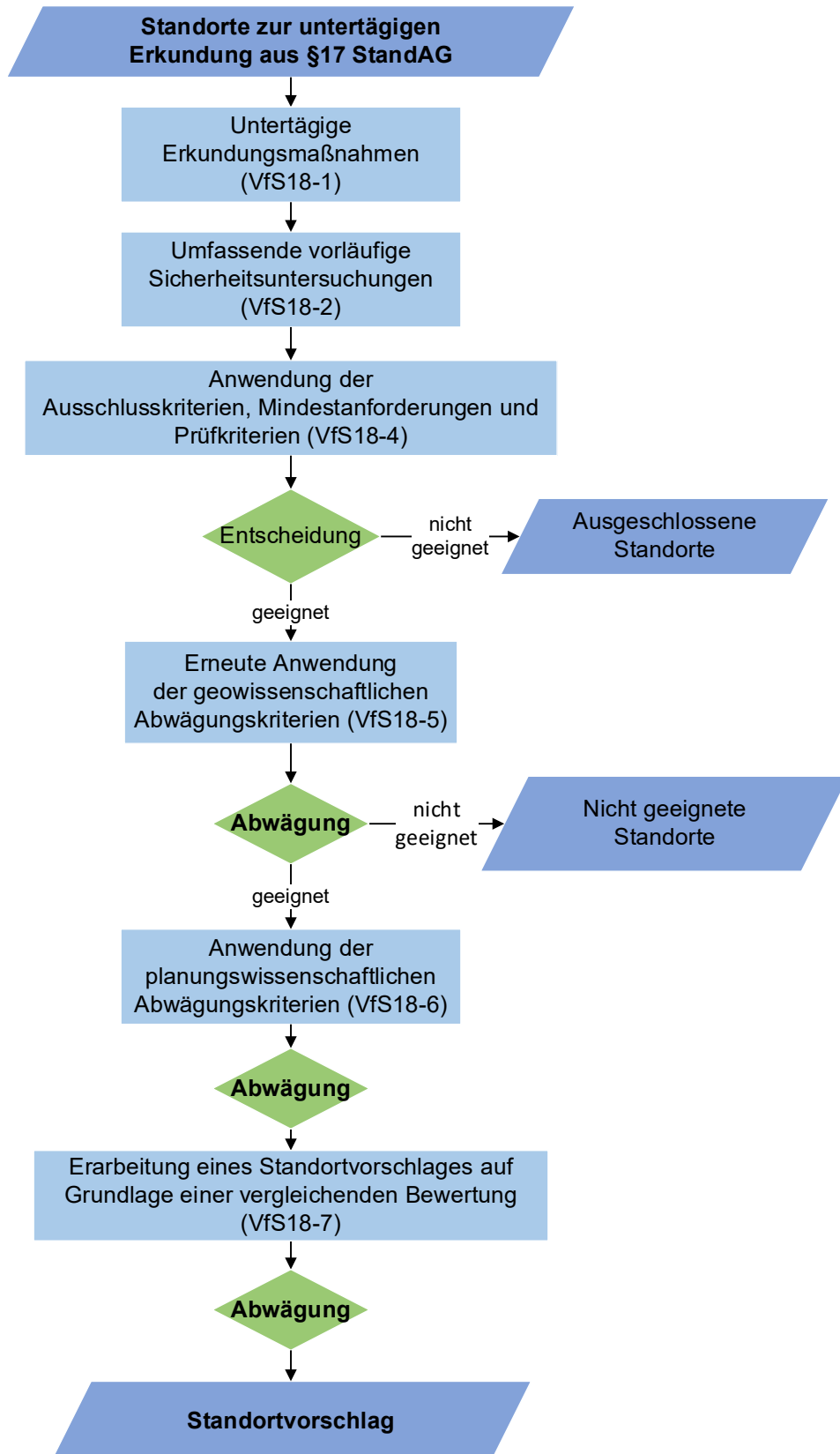


Abb. 2.5 Ablaufschema für den § 18 StandAG

## **VfS 18-5 - Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien**

Durch die untertägige Erkundung (VfS 18-1) wird eine fundierte Datenbasis konkreter Standorte, speziell der Eigenschaften des Wirtsgesteins und seiner überlagernden Schichtenfolgen, erhoben.

Somit sollen gemäß § 18 StandAG letztmalig die Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 25 StandAG angewendet werden. Dies bedeutet, dass spätestens zu diesem Zeitpunkt die Datenlage für die vollständige Anwendbarkeit aller Anforderungen und Kriterien gegeben sein muss.

Somit entfallen in Phase 3 die allgemeinen Herausforderungen aufgrund von Datenungleichheiten. Ungewissheiten ergeben sich jedoch nach wie vor aufgrund von Bandbreiten, die für einige Parameter (z. B. Porosität, Durchlässigkeitsbeiwert) ausgewiesen werden müssen.

Analog zum VfS 14-2 und VfS 16-5 sollen im VfS 18-5 die Ergebnisse der nun „umfassenden“ vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und auf Grundlage der Erkundungsergebnisse eine erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erfolgen. Wie schon für die Phase 1 und 2 wird sich die Weiterentwicklung der Sicherheitsuntersuchungen wesentlich auf die bessere Datenbasis aufgrund der untertägigen Erkundungsergebnisse stützen.

Nach § 23 Abs. 4 Satz 2 StandAG ist dieser Nachweis spätestens in der Phase 3 im Zusammenhang mit § 18 Abs. 3 StandAG zu führen. Damit stellt sich die Frage, wie anstelle der Mindestanforderungen und Abwägungskriterien bei Standorten, bei denen kein ewG ausgewiesen werden kann, der rechnerische Nachweis des Einschlussvermögens der technischen und geotechnischen Barrieren geführt werden soll.

In der Phase 3 sollen alle Informationen zur Durchführung der umfassenden Sicherheitsuntersuchungen und der erneuten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien vorliegen. Deshalb werden die wesentlichen Herausforderungen in der Phase 3 in Bezug auf den Vergleich der untertägig untersuchten Standorte bzw. konkreter Endlagersysteme gesehen, insbesondere wenn sich diese in unterschiedlichen Wirtsgesteinen befinden. Nach /BFS 05/ können Auswahlkriterien (geowissenschaftliche Abwägungskriterien) mögliche Standorte aufzeigen, sie sind aber für sich alleine nicht geeig-

net abschließend die Sicherheit eines Endlagers festzustellen. Dieser sicherheitsgerichtete Vergleich muss auf Basis von Sicherheitsindikatoren, die in der EndlSiAnfV festgelegt werden, erfolgen. Hierbei stehen methodische Herausforderungen im Fokus, welche in Kapitel 6 behandelt werden.

### **Einschätzung der Erfüllung der Sicherheitsanforderungen**

Wesentlich in Phase 3 ist, dass bei den Sicherheitsuntersuchungen die Standorte an den entsprechenden Vorgaben der EndlSiAnfV /BMU 19b/ an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle umfänglich abgeprüft werden. Grundsätzlich sollen die Sicherheitsuntersuchungen die Betriebsphase und die Nachbetriebsphase bzw. Langzeitphase nach Endlagerverschluss berücksichtigen. Dabei sind folgende Themenbereiche nach /BMU 19a/ relevant:

- Darstellungen der geowissenschaftlichen Situation im Bereich der Standorte (Geosynthese),
- Standortspezifische Sicherheits- und Nachweiskonzepte,
- thermisch ausgelegtes Endlagerkonzept, das in der Planung soweit fortgeschritten ist, dass betriebliche Sicherheitsnachweise einschließlich Störfallanalysen möglich sind,
- Eine Analyse des Endlagersystems, die sowohl endlagerinterne als auch externe (geologische, hydrogeologische und klimatische) Prozesse und Ereignisse berücksichtigt,
- Nachweise:
  - zum sicheren Betrieb des Endlagers,
  - zum sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle,
  - zur Integrität und Robustheit des ewG (bei Steinsalz und Tongesteinsstandorten) bzw. zur Integrität und Robustheit der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren (bei Kristallin-Standorten),
  - zu den radiologischen Konsequenzen, d.h. Abschätzung der zusätzlichen jährlichen effektiven Dosen,
  - zum Ausschluss von Rekritikalität im Endlager.

Nach /KOM 16/ müssen aufgrund der langen Zeitdauer bei der Durchführung des Standortauswahlverfahrens Fortentwicklungen des Standes von Wissenschaft und Technik bei nachfolgenden Sicherheitsuntersuchungen berücksichtigt werden.

### **VfS 18-6 - Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien**

Die Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien kann in Phase 3 nur zum Vergleich von sicherheitstechnisch gleichwertigen Standorten herangezogen werden. Eine weitere Flächeneinengung findet in der Phase 3 im Gegensatz zur Phase 1 und 2 (Anwendung auf Teilgebiete und Standortregionen) nicht mehr statt. Der Zweck der erneuten Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien, zu denen bereits in Phase 1 ein ausreichender Informationsstand bestehen sollte, kann nur dahingehend interpretiert werden, dass zwischenzeitliche Änderungen der Situation (z. B. neu ausgewiesene Naturschutzgebiete) berücksichtigt werden sollen.

### **VfS 18-7 - Vergleichende Bewertung der zu betrachtenden Standorte**

Gemäß § 18 Abs. 3 StandAG erarbeitet die BGE einen Standortvorschlag. Diesem Vorschlag sind Begründungen aller Entscheidungen und Bewertungen beizufügen. Nach § 18 Abs. 3 Satz 2 StandAG umfasst die Begründung auch eine vergleichende Bewertung der zu betrachtenden Standorte.

Die größte Herausforderung der vergleichenden Bewertung wird vermutlich die Vergleichbarkeit der Endlagersysteme in unterschiedlichen Wirtsgesteinen sein, falls in der Phase 3 entsprechende Standorte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen verbleiben. Es gelten hier die gleichen Aussagen, wie für den VfS 18-5. In diesem Verfahrensschritt stehen methodische Herausforderungen im Fokus, welche in Kapitel 6 behandelt werden.

#### **2.3.2 Phase 3B - Abschließender Standortvergleich und Standortvorschlag gemäß § 19 StandAG**

Der § 19 StandAG legt den (verwaltungstechnischen) Verfahrensablauf zur Festlegung eines Standortes auf Grundlage des von der BGE erstellten Standortvorschlages nach § 18 Abs. 3 StandAG, durch das BfE fest. Die geowissenschaftliche Datenlage ist identisch mit derjenigen am Ende der Phase 3A.



### **2.3.2.1      Verfahrensablauf**

Nach § 4 Abs. 2 StandAG wird der Vorschlag der BGE aus § 18 Abs. 3 StandAG bzw. VfS 18-8 unmittelbar nach Übermittlung an das BfE veröffentlicht. Das BfE initiiert die Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 7 Abs. 2 Punkt 3 StandAG (VfS 19-1). Danach überprüft das BfE den Standortvorschlag einschließlich des zugrunde liegenden Standortvergleichs von mindestens zwei Standorten und bewertet auf Grundlage des Ergebnisses dieser Prüfung und unter Abwägung sämtlicher privater und öffentlicher Belange sowie der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, welcher der Standorte der mit der bestmöglichen Sicherheit ist (VfS 19-2).

Das BfE legt durch Bescheid fest, ob das bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführte Standortauswahlverfahren nach den Regelungen des StandAG durchgeführt wurde und ob der Standortvorschlag diesen entspricht (VfS 19-3). Es können unter bestimmten Voraussetzungen Einwendungen/Rechtsbehelfe gegen diesen Bescheid eingereicht werden.

Das BfE erarbeitet einen Standortvorschlag, der eine zusammenfassende Darstellung und Bewertung der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, der Umweltauswirkungen entsprechend den §§ 24 und 25 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung und eine Begründung der Raumverträglichkeit enthält (VfS 19-4). Der Standortvorschlag wird einschließlich aller erforderlichen Unterlagen an das BMU übermittelt, wenn gegen den Bescheid nach § 19 Abs. 2 Satz 3 StandAG keine Rechtsbehelfe mehr eingelegt werden können oder das Bundesverwaltungsgericht über den Bescheid nach Satz 3 rechtskräftig entschieden hat (VfS 19-5). Die ermittelten Verfahrensschritte des § 19 StandAG sind in der Tab. 2.7 zusammengefasst.

**Tab. 2.7** Verfahrensschritte (VfS) nach § 19 (Phase 3B) StandAG, Zuständigkeit:  
BfE und Bundesregierung / Bundestag / Bundesrat

VfS	Beschreibung
<b>19-1</b> § 7 Abs. 2, Punkt 3	Das BfE veröffentlicht den Standortvorschlag (gemäß § 18 Abs. 3)
<b>19-2</b> Abs. 1, Satz 1, Satz 2	BfE prüft den Vorschlag der BGE gemäß § 18 Abs. 3 und bewertet welcher der Standorte der mit der bestmöglichen Sicherheit ist
<b>19-3</b> Abs. 2, Satz 3	Das BfE stellt durch Bescheid fest, ob das bisherige Standortauswahlverfahren nach den Regelungen dieses Gesetzes durchgeführt wurde und der Standortvorschlag diesen entspricht
<b>19-4</b> Abs. 1, Satz 3 und 4	Erarbeitung eines Standortvorschlages
<b>19-5</b> Abs. 2, Satz 1	Übermittlung des Standortvorschlags einschließlich aller hierfür erforderlichen Unterlagen durch BfE an BMU

Die identifizierten Verfahrensschritte und deren Aufgabenstellung bzw. Herausforderungen in § 19 StandAG führten zu dem Ergebnis, dass Arbeiten zu Abwägungen und vergleichenden Bewertungen im VfS 19-2 erforderlich werden könnten. Zunächst erfolgt die Prüfung des Vorschlages des Vorhabenträgers aus VfS 18-8. Auf Grundlage des Ergebnisses der Prüfung bewertet das BfE, welches der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist.

Analog zu §§ 15 und § 16 StandAG, gelten auch für den VfS 19-2 die Aussagen, dass im Rahmen der Prüfaufgaben des BfE, eigene Abwägungen und/oder Vergleiche erfolgen müssen, um die Plausibilität, Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses zu prüfen. Es ist zu erwarten, dass die Herausforderungen und Möglichkeiten der methodischen Ansätze denen entsprechen, wie sie in den jeweils entsprechenden Verfahrensschritten der BGE durchzuführen sind. Die Herausforderungen in Bezug auf die Abwägungen und/oder vergleichenden Bewertungen entsprechen somit im Wesentlichen den Ausführungen im Kapitel 2.3.1.2. Daher erfolgt keine separate Betrachtung der Herausforderungen für den betreffenden Verfahrensschritt.

Die Bewertung erfolgt zudem unter Abwägung sämtlicher privater und öffentlicher Belange, sowie der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens. Sofern für mehrere Standorte eine vergleichbare bzw. bestmögliche Sicherheit nach § 1 StandAG aufgezeigt werden kann, könnten in der vergleichenden Bewertung bzw. Abwägung öffentliche und private

Belange sowie die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens eingehen. Jedoch sind die Gewichtung / Bedeutung öffentlicher und privater Belange, sowie die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens für eine sicherheitsgerichtete Bewertung bzw. Abwägung der Standorte untereinander, noch zu klären. Somit ist es möglich, dass aus der Öffentlichkeitsbeteiligung Einwendungen kommen, welche seitens des BfE zu Abwägungen und/oder zu vergleichenden Bewertungen unterschiedlicher Untersuchungsräume führen können. Diese Herausforderungen sind jedoch nicht Gegenstand der Aufgabenstellung dieses Vorhabens und werden deshalb nicht untersucht.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte aus der Phase 3B bzw. Tab. 2.7 erfolgt im Anhang A.7.

### **2.3.3 Phase 3C - Standortentscheidung durch Bundestag und Bundesrat gemäß § 20 StandAG**

Der § 20 StandAG legt den Verfahrensablauf bis zur endgültigen Standortfestlegung durch ein Bundesgesetz fest.

#### **2.3.3.1 Verfahrensablauf**

Die Bundesregierung legt dem Deutschen Bundestag und dem Bundesrat den Standortvorschlag des BfE in Form eines Gesetzentwurfs vor (VfS 20-1). Zu dem Gesetzentwurf wird dem Bundestag und Bundesrat ein zusammenfassender Bericht über die Ergebnisse des Standortauswahlverfahrens und die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens einschließlich der Beratungsergebnisse des Nationalen Begleitgremiums beigefügt. Über die Annahme des Standortvorschlags wird durch Bundesgesetz entschieden (VfS 20-2).

Anschließend wird das Genehmigungsverfahren nach § 9b Abs. 1a des Atomgesetzes für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers verbindlich (VfS 20-3). Die Eignung des Vorhabens im Genehmigungsverfahren ist vollumfänglich zu prüfen.

**Tab. 2.8** Verfahrensschritte (VfS) nach § 20 StandAG (Phase 3C), Zuständigkeit: Bundesregierung/Bundestag

<b>VfS</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>20-1</b> Abs. 1, Satz 1	Die Bundesregierung legt dem Deutschen Bundestag und dem Bundesrat den Standortvorschlag in Form eines Gesetzentwurfs vor
<b>20-2</b> Abs. 2	Über die Annahme des Standortvorschlags wird durch Bundesgesetz entschieden
<b>20-3</b> Abs. 3	Auf der Grundlage dieser Entscheidung ist die Eignung des Vorhabens im Genehmigungsverfahren vollumfänglich zu prüfen

Innerhalb der Teilschritte zu § 20 StandAG werden keine Abwägungen oder vergleichenden Bewertungen erwartet.

#### **2.4 Zusammenfassung der relevanten Verfahrensschritte für Abwägungen und vergleichende Bewertungen**

Verfahrensschritte gemäß StandAG, in denen Abwägungen und vergleichende Bewertungen durchgeführt werden, sind in der Tab. 2.9 zusammenfassend dargestellt. Dies sind Verfahrensschritte, in denen von der BGE die Anwendung und Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 13, § 14, § 16 und § 18 StandAG erfolgen und in denen die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 14, § 16 und § 18 StandAG angewendet werden. Es wird vorausgesetzt, dass in den entsprechenden Verfahrensschritten, in denen die geowissenschaftlichen und planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien angewendet werden, auch die Arbeiten zu Abwägungen und vergleichenden Bewertungen, unter Berücksichtigung der Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen erfolgen. Es wird zudem gemäß § 18 StandAG zur Erarbeitung eines Standortvorschlages ein sicherheitsgerichteter Vergleich der ermittelten Standorte durchgeführt (siehe VfS 18-7).

Zudem wurden weitere Verfahrensschritte in den § 15 StandAG (VfS 15-2 und 15-3), § 17 StandAG (VfS 17-2 und 17-3) und § 19 StandAG (VfS 19-2) identifiziert, in denen die Vorschläge der BGE durch das BfE geprüft werden und die Auswertung der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens erfolgen. Im Rahmen der Prüfaufgaben des BfE ist zu erwarten, dass auch unabhängige Abwägungen und/oder Vergleiche erfolgen können aber nicht zwingend durchgeführt werden müssen, um sich von der Plausibilität, Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse der BGE zu überzeugen. Es ist davon

auszugehen, dass die zu prüfenden Herausforderungen vergleichbar mit denen für die BGE ermittelten Herausforderungen sind. Der Vollständigkeit sind die Verfahrensschritte in der Tab. 2.9 aufgeführt.

Des Weiteren werden die einzelnen Verfahrensschritte aufgeführt, die z. B. in Bezug auf die in ihnen durchgeführten Aufgaben bzw. Arbeiten ähnlich sind, um eine mögliche Übertragbarkeit von Methoden in Kapitel 4.3 zu überprüfen.

- Ähnlich sind die Verfahrensschritte, in denen die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien angewandt werden: **VfS 13-3, 14-2, 16-5** und **18-5**,
- sowie die Verfahrensschritte, in denen die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien angewandt werden: **VfS 14-3, 16-6** und **18-6**.

**Tab. 2.9** Identifizierte Verfahrensschritte (VfS) in denen Abwägungen und vergleichende Bewertungen durchgeführt werden (BGE) oder durchgeführt werden können (BfE)

<b>VfS</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Phase 1</b> Datengrundlage → bestehende Daten	
<b>13-3</b> Abs. 2, Satz 2	Anwendung und Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zur Ermittlung von Teilgebieten
<b>14-2</b> Abs. 1, Satz 3	Erneute Anwendung und Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zur Ermittlung günstiger Standortregionen
<b>14-3</b> Abs. 1, Satz 3	Anwendung planungswissenschaftlicher Abwägungskriterien
<b>15-2</b> Abs. 1, Satz 1	Prüfung des Vorschlags der BGE durch BfE
<b>15-3</b> Abs. 2, Satz 1	Erarbeitung einer begründeten Empfehlung zum Vorschlag der BGE
<b>Phase 2</b> Datengrundlage → Ergebnisse der übertägigen Erkundungsmaßnahmen	
<b>16-5</b> Abs. 2, Satz 1	Erneute Anwendung und Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien
<b>16-6</b> Abs. 2, Satz 2	Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (Berücksichtigung der sozioökonomischen Potenzialanalysen)
<b>17-2</b> Abs. 1, Satz 1	Prüfung des Vorschlags (nach § 16 Abs. 3)
<b>17-3</b> Abs. 2, Satz 1	Auswertung der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, einschließlich der Beratungsergebnisse des NBG und Erarbeitung einer begründeten Empfehlung zum Vorschlag der BGE
<b>Phase 3</b> Datengrundlage → Ergebnisse der untertägigen Erkundungsmaßnahmen	
<b>18-5</b> Abs. 2, Satz 1	Erneute Anwendung und Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien
<b>18-6</b> Abs. 1, Satz 2	Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien
<b>18-7</b> Abs. 3, Satz 2	Erarbeitung eines Vorschlages für geeignete Standorte auf der Grundlage einer vergleichenden Bewertung der zu betrachtenden Standorte
<b>19-2</b> Abs. 1, Satz 1, Satz 2	BfE prüft den Vorschlag der BGE gemäß § 18 Abs. 3 und bewertet welcher der Standorte der mit der bestmöglichen Sicherheit ist

## Zusammenfassung der Herausforderungen

Für die unterschiedlichen Phasen der Standortsuche nach StandAG können zwei Vorgehensweisen zur Eingrenzung und Auswahl der Untersuchungsräume unterschieden werden:

- Zum einen erfolgt eine Bewertung der geowissenschaftlichen Gesamtsituation, durch die **Abwägung** der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, zur Identifizierung günstiger Untersuchungsräume. Zudem kann eine flächenmäßige Eingrenzung von Untersuchungsräumen durch eine **Abwägung** der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien erfolgen. Für diese Arbeiten ist ein Vergleich von Untersuchungsräumen nicht zwingend notwendig und im StandAG nicht explizit vorgesehen.
- Zum anderen werden (sicherheitsgerichtete) **vergleichende Bewertungen** zwischen Standorten in der Phase 3 (und ggf. auch von Untersuchungsräumen in Phase 1 und 2), auf Basis der Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt, um somit geeignete Untersuchungsräume bzw. Standorte zu identifizieren.

Es sei hervorgehoben, dass die vorherigen Erläuterungen keine scharfe Abgrenzung zwischen Abwägungen und vergleichenden Bewertungen darstellen, auch nach einem Vergleich von Untersuchungsräumen müssen die Ergebnisse zur Entscheidungsfindung „abgewogen“ werden. Ein sicherheitsgerichteter Vergleich von Standorten ist gemäß § 18 StandAG jedoch erst in der Phase 3 vorgesehen. Unter Umständen können jedoch auch vorher Vergleiche sinnvoll sein, um zwischen Untersuchungsräumen abwägen zu können. Dies zeigen auch die Ausführungen in Kap. 2.1.2.2 und Anhang A.2.3 zur Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien und die Ausführungen in /BT 17/ S. 71:

*„Die Festlegung von geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dient dazu, die nach der Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen verbleibenden Gebiete hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerstandort vergleichend bewerten zu können. [...] Wie von der Endlagerkommission empfohlen soll dazu im Rahmen einer verbalargumentativen Abwägung ermittelt werden, in welchen Gebieten eine für die Sicherheit des Endlagers günstige geologische Gesamtsituation vorliegt [...] Eine rechnerische Gesamtbeurteilung der Erfüllung der Abwägungskriterien ist bewusst nicht vorgesehen. [...]“*

Inwieweit in Phase 1 und 2 Vergleiche von Untersuchungsräumen zwecks einer Eingrenzung letztendlich durchgeführt werden, kann hier nicht abgeschätzt werden. Es ist aber nicht auszuschließen, dass spätestens in Phase 2 vergleichende Bewertungen (ggf. in Form eines Rankings) bei den Standorten für die untertägige Erkundung vorgenommen werden müssen, wenn deren Anzahl so groß ist, dass eine untertägige Erkundung aller Standorte nicht wirtschaftlich durchführbar ist.

Aus der vorherigen Beschreibung zu Abwägungen und vergleichenden Bewertungen, können phasenabhängige Vorgehensweisen hervorgehoben werden. Der Ausschluss offensichtlich ungeeigneter Gebiete durch die Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, wird als vorheriger Schritt vorausgesetzt und nicht explizit erwähnt.

- a) In Phase 1 und zum Teil noch in Phase 2 erfolgt eine Eingrenzung **großflächiger Gebiete** zu günstigen Teilgebieten, günstigen Standortregionen und günstigen Standorten, auf Basis einer **Abwägung** der geowissenschaftlichen Informationen. Zur weiteren Eingrenzung können planungswissenschaftliche Abwägungskriterien herangezogen werden.
- b) Insbesondere in Phase 3 (und ggf. auch in Phase 1 und 2) werden **konkrete Standorte** (bzw. Untersuchungsräume), auf Grundlage einer fundierten Datenbasis, **sicherheitsgerichtet** miteinander **verglichen**.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass im StandAG keine Hinweise gegeben werden, ob und wie mit einem „Rücksprung“ im Standortauswahlverfahren umzugehen ist oder ob dieser von vornherein ausgeschlossen wird. Unter Umständen müssen zum Beispiel arbeiten aufgrund neuer Erkenntnisse oder durch die Einwirkungen der Öffentlichkeitsbeteiligung überdacht und erneut durchgeführt werden. Dies entspräche einem in /KOM 16/ geforderten, selbsthinterfragenden und lernenden System bzw. Verfahren.

Im Folgenden sind die Herausforderungen in Bezug auf Abwägungen und vergleichenden Bewertungen nochmal kurz zusammengefasst.

## **Phase 1**

In der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens ist die wesentliche Herausforderung die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien auf die unterschiedlichen



Wirtsgesteine bzw. den hierin enthaltenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Es liegen voraussichtlich nicht für alle Untersuchungsräume ausreichende Informationen für eine Bewertung aller geowissenschaftlichen Abwägungskriterien vor.

Erste orientierende Untersuchungen zur „Sicherheit“ der Endlagersysteme für die unterschiedlichen Wirtsgesteine erfolgen im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 14 StandAG. Zur Durchführung der Sicherheitsuntersuchungen müssen generische Modelle der entsprechenden wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme entwickelt werden. Die Sicherheitsuntersuchungen haben aufgrund der voraussichtlich hohen Datenungewissheiten und des konzeptionellen Charakters der Endlagersysteme nur eine orientierende Aussagekraft.

## **Phase 2**

In Phase 2 werden Datenungewissheiten durch die übertägigen Erkundungen verringert. Die Herausforderung bezüglich der Datenungewissheiten für eine vergleichende Bewertung wird somit verkleinert. Die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen werden weiter detailliert (weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen). Es ist davon auszugehen, dass in Phase 2 unterschiedliche Varianten von Endlagerkonzepten für die jeweiligen Wirtsgesteinstypen untersucht werden müssen (zum Beispiel Streckenlagerung oder Bohrlochlagerung). Zu den Varianten können auch Endlagerkonzepte mit unterschiedlichen technischen und geotechnischen Barrieren in den jeweiligen Wirtsgesteinen zählen. Sollten in der Phase 2 Vergleiche zwischen Standortregionen bzw. Standorten durchgeführt werden, beispielsweise um die Anzahl von Standorten für die nachfolgenden untertägigen Erkundungen einzuengen, so besteht eine weitere wesentliche Herausforderung darin, für einen sicherheitsgerichteten Vergleich der unterschiedlichen Varianten von Endlagerkonzepten, die bewertungsrelevanten Kriterien und Indikatoren auszuweisen. Zum Beispiel können komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen im Zuge der Sicherheitsuntersuchungen abgeprüft und deren Ausprägungen verglichen werden.

## **Phase 3**

Mit der sich vertiefenden Datenlage aufgrund der untertägigen Erkundungen werden insbesondere in Phase 3 die methodischen Aspekte einer vergleichenden Bewertung als wesentliche Herausforderung angesehen. Die methodischen Herausforderungen auf-

grund der Datenungewissheiten wurden zwar verkleinert, dennoch bestehen Ungewissheiten aufgrund der zukünftigen (wirtsgesteinsspezifischen) Entwicklung der Endlager-systeme (Szenarien-Entwicklung), welche in einer vergleichenden Bewertung berücksichtigt werden müssen. Die methodischen Herausforderungen werden in Kap. 6 untersucht.

### 3 Grundlagen der Entscheidungstheorie

Bei der Standortauswahl, z. B. für technische Anlagen (Autobahnen, Stromtrassen, Deponien, Kraftwerke, Endlager), besteht in der Regel die Aufgabe eine Vielzahl von Standortmöglichkeiten bzw. eine Vielzahl von Handlungsoptionen oder Planungsalternativen zu bewerten. Ziel ist es eine optimale oder bestmögliche Lösung für eine Entscheidung vorzuschlagen. Dieser Umstand wird als ein „Entscheidungsproblem“ (es gibt mindestens zwei klar voneinander unterscheidbare Alternativen) bezeichnet. Die methodischen Grundlagen zur Durchführung von Abwägungen und vergleichenden Bewertungen, liefert das Forschungsfeld der s. g. Entscheidungstheorie. Die entsprechende Fachliteratur zu Methoden der Entscheidungstheorie ist schwerpunktmäßig vor dem Hintergrund ökonomischer Fragestellungen ausgerichtet. Die Methodologie ist aber grundsätzlich auf alle Fragestellungen, auch für den Planungs- und Umweltbereich bzw. eine Standortsuche, anwendbar. Daher erfolgt in diesem Kapitel zunächst eine kurze Einführung in die Grundlagen der Entscheidungstheorie.

/LAU 12/ unterteilt die Ansätze der Entscheidungstheorie hinsichtlich ihrer Zielsetzungen in die folgenden Kategorien:

- **deskriptive Entscheidungstheorie:** Die deskriptive Entscheidungstheorie beschreibt, wie in der Realität Entscheidungen getroffen werden. Ihr Ziel ist es das Entscheidungsverhalten von Gruppen und Individuen für bestimmte Entscheidungssituationen zu beschreiben und zu prognostizieren.
- **präskriptive (normative) Entscheidungstheorie:** Die präskriptive (oder normative) Entscheidungstheorie liefert Ansätze, wie Entscheidungen „rational“ getroffen werden können (Wie entscheidet sich ein Mensch in bestimmten Situationen?). Es werden Grundprobleme der Auswahl aus mehreren einander ausschließenden Handlungsalternativen untersucht, um die bestmögliche Lösung zu finden.

Die deskriptive Entscheidungstheorie ist nicht oder nur bedingt geeignet bei konkreten Entscheidungsproblemen zu unterstützen. Hier bieten die Ansätze der präskriptiven Entscheidungstheorie die passenden Methoden. Jedoch können deskriptive Ansätze möglicherweise im Entscheidungsprozess helfen, dass der Entscheider eine „bessere“ Entscheidung unter den gegebenen (soziologischen) Randbedingungen trifft /LAU 12/. Dieser Umstand könnte insbesondere für die Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle relevant sein, in dem eine Vielzahl an beteiligten Institutionen bzw. betroffenen Akteuren (Bevölkerung) involviert sind. In diesem Vorhaben steht jedoch die

sicherheitsgerichtete Bewertung von unterschiedlichen Handlungsmöglichkeiten (Alternativen) und somit Methoden der präskriptiven Entscheidungstheorie im Vordergrund.

Im Folgenden werden einige Grundbegriffe der Entscheidungstheorie erläutert, da diese in den nachfolgenden Kapiteln verwendet werden.

## **Alternativen**

Die Vorgehensweisen bzw. Methoden zur Lösung von Entscheidungsproblemen basieren in der Regel auf der Abwägung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Handlungsmöglichkeiten bzw. Alternativen. Eine Alternative ist dabei eine Wahlmöglichkeit, welche sich aus den potentiellen Handlungsoptionen und Maßnahmen eines Entscheidungsproblems ableitet. Es müssen immer mindestens zwei klar voneinander abgrenzbare (sich gegenseitig ausschließende) Alternativen ausgewiesen werden können, damit ein Entscheidungsproblem besteht. Letztendlich muss sich der Entscheidungsträger immer genau für eine Alternative entscheiden /GEL 14/.

## **Merkmale und Kriterien**

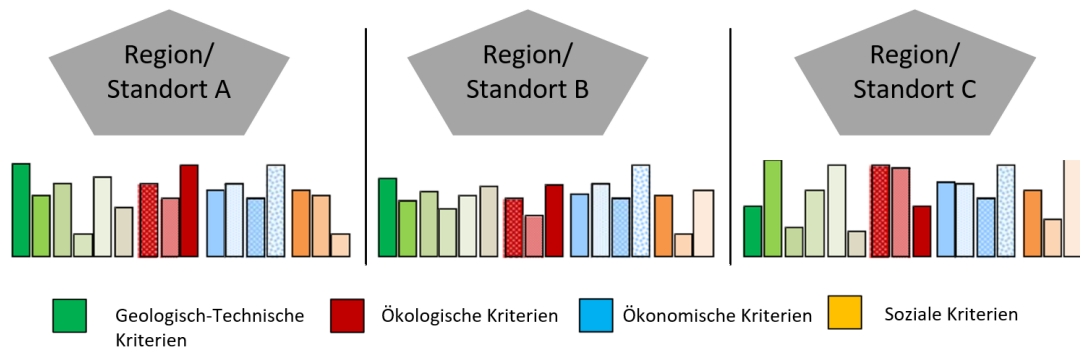
Die vergleichende Bewertung der Alternativen in einem (allgemeinen) Standortauswahlverfahren erfolgt anhand ihrer verschiedenen Eigenschaften. Zur Beschreibung der Eigenschaften werden s. g. Merkmale ausgewiesen. Die Merkmale können den physischen oder funktionalen Eigenschaften einer Alternative eine qualitative oder quantitative Ausprägung<sup>4</sup> zuordnen. Ein physisches Merkmal mit einer quantitativen Ausprägung ist beispielsweise die Mächtigkeit einer Gesteinsschicht. Die funktionalen Merkmale beschreiben die möglichen Wechselwirkungen bzw. Einwirkungen auf Prozesse /APP 09/. Für den Entscheidungsprozess werden relevante, für einen Vergleich von Alternativen entscheidende Merkmale, als Kriterien bezeichnet. Somit ergibt sich aus der Gesamtmenge an Merkmalen eine Teilmenge an physischen oder funktionalen Kriterien.

Die Abb. 3.1 zeigt schematisch, dass bei einem Standortauswahlverfahren Kriterien (dargestellt als Balken) aus verschiedenen Bereichen (unterschiedliche Farben der Balken) mit unterschiedlichen Gewichtungen (unterschiedliche Höhen der Balken) einfließen können. Es können zum Beispiel geowissenschaftliche, ökologische, ökonomische aber

---

<sup>4</sup> Unter einer (Kriterien)-ausprägung wird ein Wert angenommen, mit dem sich die unterschiedlichen Kriterien unterscheiden bzw. vergleichen und letztendlich bewerten lassen. Es können zum Beispiel quantitative oder qualitative Ausprägungen unterschieden werden.

auch soziale Kriterien für unterschiedliche Standorte berücksichtigt werden (dargestellt durch die Hauptfarben grün, rot, blau und gelb).

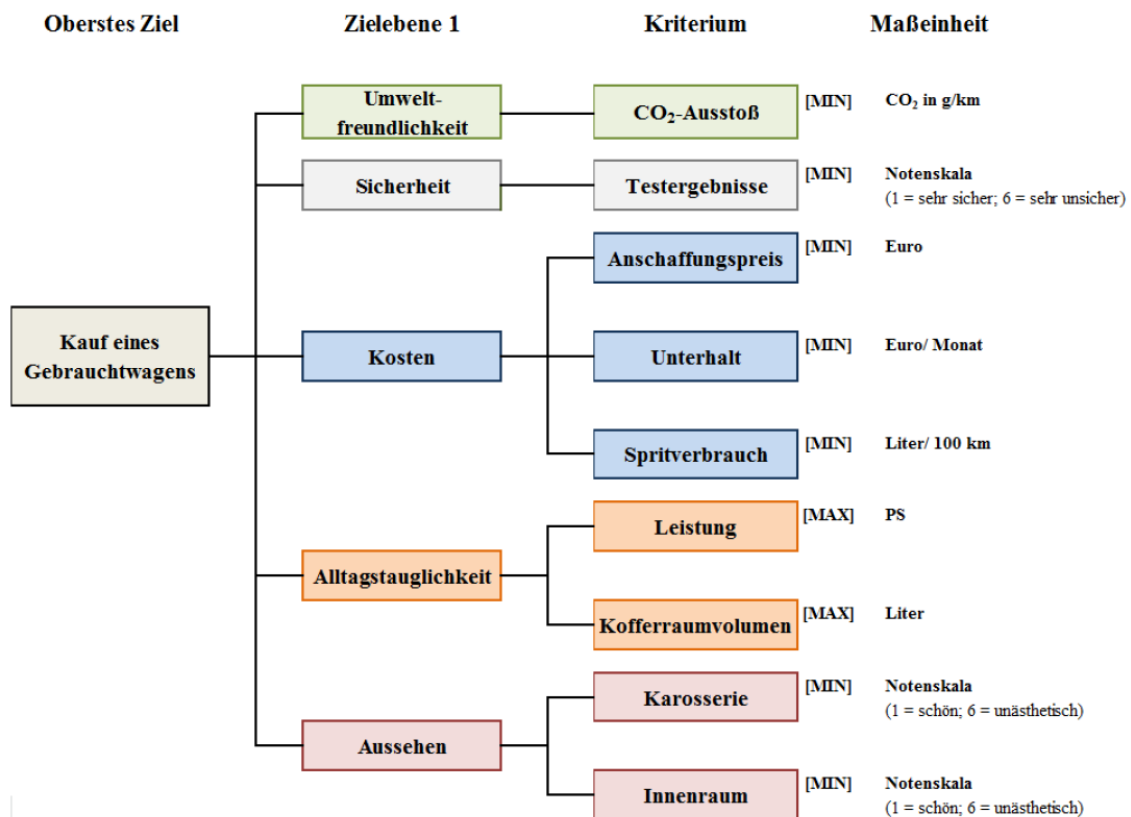


**Abb. 3.1** Schematische Darstellung der multikriteriellen Entscheidung für verschiedene Handlungsalternativen (verändert nach /GEL 12/).

### Zielsystem

Zur Identifizierung der relevanten Merkmale müssen ein oder mehrere Ziele festgelegt werden. In der Regel sollen mehrere Haupt- und Nebenziele in einem Auswahlverfahren erreicht werden. Das Hauptziel, z. B. in einem Standortauswahlverfahren für radioaktive Abfälle, ist die „bestmögliche Sicherheit“ durch eine Standortauswahl zu erreichen. Die Sicherheit wird dabei im Wesentlichen auf die Integrität des Endlagers bzw. den Einschluss des Radionuklidinventares für eine Mio. Jahre bezogen. Nebenziele können z. B. eine bestmögliche Sicherheit für die Betriebsphase oder für die Langzeitphase sein. Zudem können Nebenziele in Bezug auf die Integrität für bestimmte Komponenten festgelegt werden. Damit wird deutlich, dass die Ziele hierarchisch angeordnet werden können /APP 09/.

Die Gesamtheit dieser Ziele und ihre Ordnung bezeichnet man als **Zielsystem**. Ein klares strukturiertes Zielsystem ist die Voraussetzung für die sachgerechte Identifizierung und Gewichtung von Kriterien aus der Gesamtmenge der Merkmale /APP 09/. In einem strukturierten Zielsystem wird daher ein Hauptziel formuliert, welches das Gesamtziel des Entscheidungsproblems darstellt. Zur Konkretisierung wird das Hauptziel anschließend in logisch zusammenhängende Unterziele unterteilt (Abb. 3.2) mittels derer die exakten Ziele konkretisiert werden /GEL 14/.



**Abb. 3.2** Kriterienhierarchie am Beispiel zum Kauf eines Gebrauchtwagens  
/GEL 14/

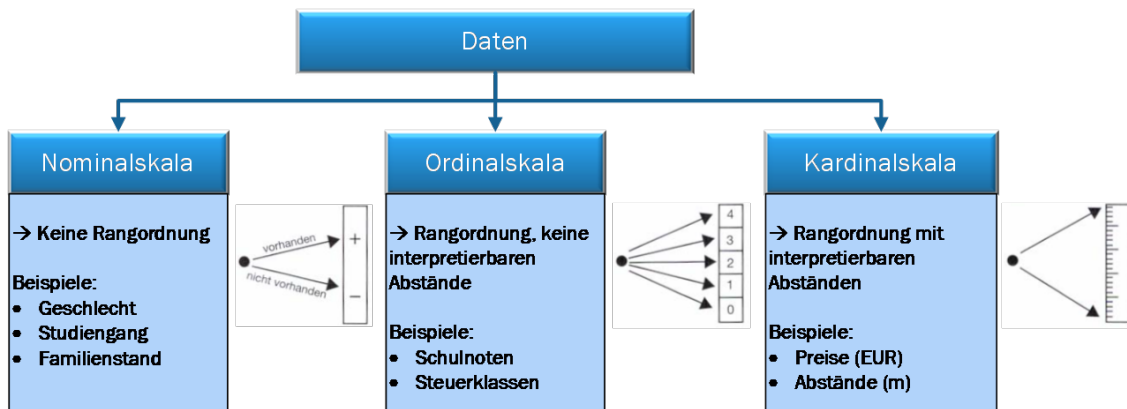
Den Kriterien werden Indikatoren zugeordnet. Indikatoren sind Ersatzgrößen, die zur Beurteilung herangezogen werden, wenn die zu prüfenden Merkmalsausprägungen der Kriterien nicht direkt gemessen werden können. Indikatoren sind Größen, welche komplexe Zusammenhänge vereinfachen sollen. Ein Beispiel wäre die rechnerische Ableitung der maximalen radiologischen Dosis, die als Indikator für die Langzeitsicherheit eines Endlagersystems dient /APP 09/.

Im StandAG wird der Begriff **Indikator** zudem für die Bewertung der Ausprägung eines Kriteriums verwendet (siehe Anlagen 1 bis 11 gemäß § 24 Abs. 3 bis 5 StandAG). Hier haben die Indikatoren nicht die Funktion einer Ersatzgröße, wie in dem oben genannten Sinne.

### Skalentypen

Zu Beginn eines Entscheidungsprozesses müssen zunächst die Grundlagen zum Vergleich von mehreren Alternativen geschaffen werden. Hierzu muss eine genaue Be-

schreibung der Alternativen erfolgen. Die Beschreibung beinhaltet eine detaillierte Ableitung der Merkmale und die Ermittlung der Kriterien mit den zuzuordnenden Skalentypen /GEL 14/ (Abb. 3.3).



**Abb. 3.3** Erläuterung der Skalentypen (eigene Darstellung)

Mit der **Nominalskala** (Abb. 3.3) werden qualitative Daten, wie Merkmale bzw. Ausprägungen klassifiziert (z. B. Geschlecht), mit denen sich Häufigkeiten darstellen lassen. Die Nominalskala ist eine diskrete Skala, in der keine arithmetischen Operationen zulässig sind und keine Rangordnung hergestellt werden kann /FOR 15/.

Die **Ordinalskala** ist ebenfalls eine diskrete Skala, die im Gegensatz zur Nominalskala eine Wertung und somit Ordnung zulässt (z. B. Schulnoten). Somit können Aussagen über Größenrelationen im Sinne von „größer-kleiner“ oder „mehr-weniger“ erfolgen. Es können jedoch keine Aussagen über das Ausmaß der Größenunterschiede gemacht werden /FOR 15/, /ZIM 13/. Da in der Ordinalskala Rangdifferenzen nicht betrachtet werden, sind Mittelwertbildung oder Additionen der Ränge nicht erlaubt. Nur Vergleiche sind zulässig /ZIM 13/.

Die **Kardinalskala** ist eine messbare Skala, in der Teilmengen abgebildet werden können, denen eine Maßeinheit zugrunde liegt. Somit können Abstände bzw. Differenzen zwischen zwei Skalenwerten ausgedrückt werden (z. B. Währung, Temperatur) /FOR 15/.

### Informationen bzw. Daten

Für eine vergleichende Bewertung werden Informationen (Befunde) zu den entscheidungsrelevanten Kriterien benötigt. Die **Information** kann eine direkt messbare Größe des Merkmals sein oder bekannte Funktionszusammenhänge (Indikatoren) enthalten.

Nach /GOL 09/ ist die Zuverlässigkeit einer Aussage, eine Funktion sowohl der Qualität als auch der Quantität, der verwendeten Datengrundlage. Im Allgemeinen wird die Qualität als wichtiger eingeschätzt als die Quantität. Begründet wird dies dadurch, dass viele Informationen, die eine „falsche“ Aussage eines Parameterwertes liefern, als weniger wertvoll angesehen werden als wenige Informationen, die „richtige“ Aussagen eines Parameterwertes liefern. /GOL 09/ führten für ihre Untersuchungen einen Zuverlässigkeitsindex zur Bewertung der Daten ein, basierend auf der Quantität und Qualität von Erkundungsergebnissen. Im Folgenden werden die Begriffe Quantität und Qualität und deren Anforderungen näher erläutert:

### *Quantitative Anforderungen*

Für die entscheidungsrelevanten Kriterien müssen genügend Daten zur Bewertung vorliegen. Für eine belastbare Bewertung eines Kriteriums muss ein Datenwert mindestens durch einen zweiten aber besser noch durch mehrere Datenwerte abgesichert werden. Liegen für einzelne Kriterien keine oder nicht genügend Daten vor, ist zu überlegen, ob bzw. inwieweit das Kriterium überhaupt in die Bewertung einbezogen werden kann /APP 09/.

### *Qualitative Anforderungen*

Neben einer genügenden (quantitativen) Menge an Daten ist zudem die Qualität der Daten für eine robuste Bewertung entscheidend. Mit Qualität ist im Wesentlichen die „Aussagekraft“ der Daten gemeint. In der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens wird auf bestehende Daten der Landesämter und der BGR zurückgegriffen. Ein Großteil dieser Daten wurde überwiegend von der Industrie im Zuge der Suche nach Rohstoffen erhoben und diese entsprechen wohlmöglich nicht den qualitativen Anforderungen des Standortauswahlverfahrens. Insbesondere haben sich die Erkundungstechniken mit der Zeit weiterentwickelt und lassen detailliertere und genauere Aussagen zu Gesteinseigenschaften zu. Der Detailierungsgrad der verschiedenen Erkundungstechniken, zum Beispiel zur Identifizierung einer Schichtgrenze, kann stark unterschiedlich sein. Je genauer Schichten oder Störungszonen lokalisiert werden können, desto aussagekräftiger bzw. qualitativ hochwertiger sind die Daten.



## **Aggregation**

Abschließend findet die eigentliche vergleichende Bewertung der unterschiedlichen Alternativen statt, die schließlich unter Zusammenführung aller Bewertungsaspekte mit der Auswahl einer Alternative endet /APP 09/. Die Verdichtung der Kriterien zu einer oder mehreren (Teil)Aussage(n) wird Aggregation genannt. Für die Aggregation der Informationen können s. g. Aggregationsmethoden angewendet werden. Die zentrale Schwierigkeit aller Methoden ist die Zusammenführung der einzelnen Bewertungsergebnisse der jeweiligen Kriterien und ihre gegenseitige Abwägung zum Zwecke der notwendigen Gesamtbewertung /APP 09/. Da bei einer Aggregation in der Regel eine Reduzierung der Komplexität erfolgt, ist dies mit einem Informationsverlust verbunden. Deshalb ist die Methodik der Aggregation entscheidend für die Nachvollziehbarkeit eines Entscheidungsprozesses.

Eine transparente und nachvollziehbare Entscheidungsfindung ist eine Grundvoraussetzung für den Bewertungsprozess. Dies gilt insbesondere in Bezug auf die Akzeptanz eines Ergebnisses in der Öffentlichkeit. Hierbei bezieht sich die Transparenz und Nachvollziehbarkeit vor allem auf subjektive Entscheidungen im Verfahren. Gute Voraussetzungen zur Erfüllung der Transparenz und Nachvollziehbarkeit bietet eine geringe Aggregation in einer Methodik. Durch eine explizite Bewertung aller Kriterien, ohne eine umfassende (kompensatorische) Aggregation, kann ein Entscheidungsprozess methodisch nachvollziehbar und transparent dargestellt werden /APP 09/.

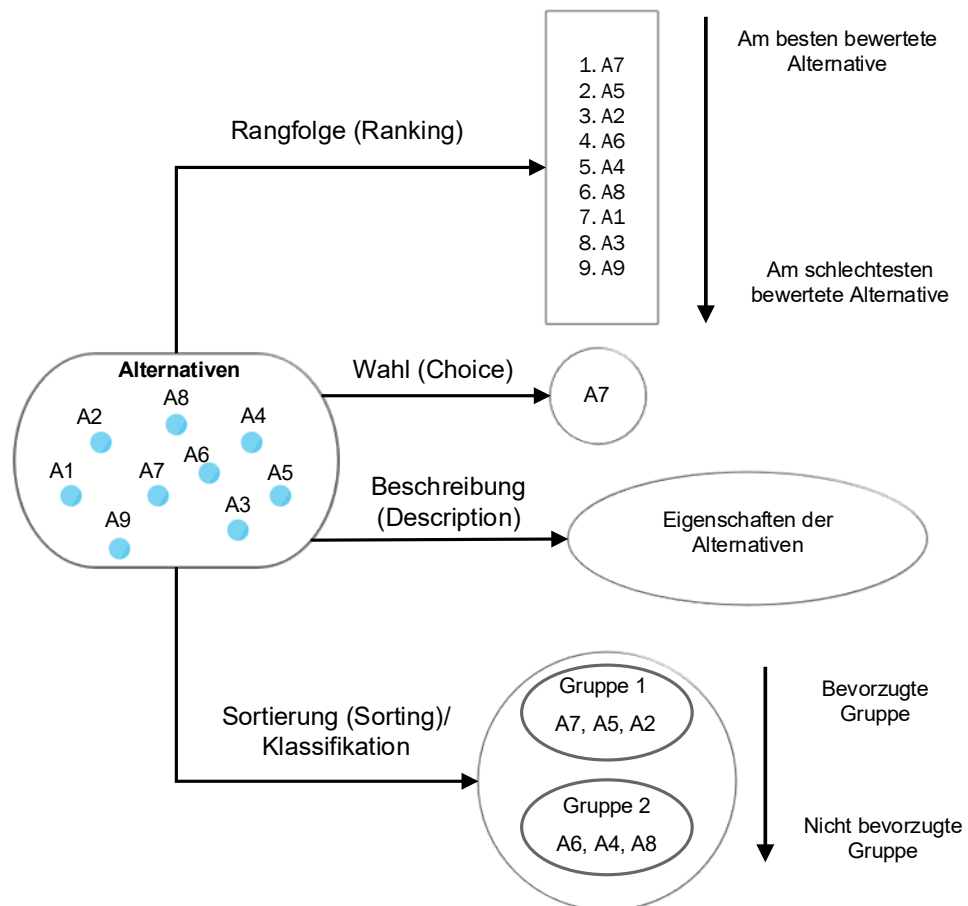
## **Bewertung der Ergebnisse**

Nach erfolgter Aggregation von Kriterienausprägungen müssen die Alternativen bewertet werden. Hierfür werden zum Beispiel so genannte partielle und/oder absolute Rangfolgen erstellt. Absolute Rangfolgen lassen sich zum Beispiel immer aus Zahlen bilden, weil Zahlen im Bezug zueinander immer größer, kleiner oder gleich sind. Für die Erstellung einer absoluten Rangordnung gelten gemäß /LAU 12/ folgende Regeln:

- **Reflexivität:** Je zwei Alternativen oder auch Kriterien sind miteinander vergleichbar:  
 $x > y$  (x wird bevorzugt)  
 $x < y$  (y wird bevorzugt)  
 $x \sim y$  (Indifferenz, beide sind gleich)
- **Transitivität:** Widerspruchsfreie Präferenzrelationen:  
 Wenn  $x > y$  und  $y > z$ , dann gilt auch  $x > z$

Wenn nun Alternativen nicht mehr vergleichbar sind, zum Beispiel weil ein Kriterium fehlt, dann können die Alternativen nicht mehr in eine absolute Rangfolge, sondern in eine partielle Rangfolge überführt werden, in der auch eine Unvergleichbarkeit berücksichtigt werden kann (für weitere Informationen siehe /WIK 18/). Nach /DOU 04/ können bei der Betrachtung eines diskreten Entscheidungsproblems vier verschiedene Arten von Analysen zur Einordnung von Alternativen durchgeführt werden Abb. 3.4:

- Ranking: Erstellung einer **Rangfolge** der Alternativen von den besten zu den schlechtesten.
- Choice: Identifizieren der besten **Alternative** oder eine Auswahl der besten Alternativen.
- Description: Identifizieren der **Hauptunterscheidungsmerkmale** der Alternativen und eine Bewertung basierend auf diesen Merkmalen.
- Sorting: Einteilung der Alternativen in vordefinierte homogene **Gruppen**.

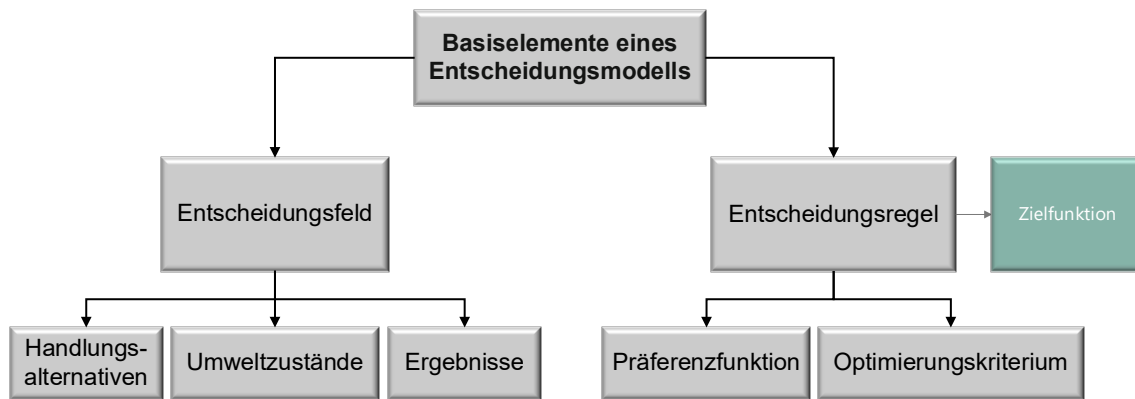


**Abb. 3.4** Schematische Darstellung der „Auswahl“-Möglichkeiten für multikriterielle Entscheidungsprobleme (verändert nach /DOU 04/)

Nach /DOU 04/ basieren sowohl Auswahl als auch Rangfolge auf relativen Beurteilungen, die paarweise Vergleiche zwischen den Alternativen beinhalten. Folglich hat das Gesamtbewertungsergebnis eine relative Form, abhängig von den zu bewertenden Alternativen. Zum Beispiel ist ein Bewertungsergebnis der Form „Produkt X ist das Beste seiner Art“ das Ergebnis relativer Beurteilungen und kann sich ändern, wenn die Menge von Produkten, die dem Produkt X ähnlich ist, geändert wird.

### Entscheidungsmodell

Als eine wichtige Entscheidungshilfe zur Untersuchung von Entscheidungsproblemen kann die Erstellung von s. g. Entscheidungsmodellen dienen (Grundmodell der Entscheidungstheorie, Abb. 3.5). Mit Entscheidungsmodellen werden Entscheidungsprobleme, unabhängig von ihrer speziellen Problemstellung, in eine allgemeine Grundstruktur überführt. Dies dient einer Strukturierung und Beschreibung der Problemstellung /LAU 12/.



**Abb. 3.5** Grundmodell der Entscheidungstheorie (verändert nach /LAU 12/)

Das Entscheidungsfeld (Abb. 3.5) umfasst alle notwendigen Größen zur Darstellung eines Entscheidungsproblems. Das Entscheidungsfeld wird gebildet durch die Handlungsalternativen, die Umweltzustände und die Ergebnisse (Abb. 3.5). Handlungsalternativen ergeben sich aus unterschiedlichen Konstellationen und Ausprägungen von Entscheidungsvariablen. Entscheidungsvariablen sind vom Entscheidungsträger beeinflussbare Größen /GIL 18a/. Umweltzustände sind Größen, die die Ergebnisse der Alternativen beeinflussen aber keine Entscheidungsvariablen des Entscheiders darstellen /LAU 12/. Gemäß /LAU 12/ ergeben sich somit unterschiedliche Alternativen anhand der Variation der durch den Entscheidungsträger beeinflussbaren Faktoren, nicht aber durch die unterschiedlichen Umweltzustände. Ein Entscheidungsfeld beinhaltet zudem das Element „Ergebnisse“, welches die Konstellationen der Ausprägungen der Zielgrößen (z. B. Gewinn eines Unternehmens) darstellen /LAU 12/.

Entscheidungsregeln (Zielfunktionen) beschreiben, wie eine Strategie zu wählen ist damit ein größtmögliches Ausmaß an Bedürfnisbefriedigung erfolgt bzw. welche Handlungsalternative das Zielsystem am besten widerspiegelt /LAU 12/. Eine Entscheidungsregel besteht aus einer Präferenzfunktion<sup>5</sup>  $\Phi(A_a)$ , die den einzelnen Alternativen  $A_a$  Präferenzwerte zuordnet, sowie einem Optimierungskriterium. Mit Hilfe des Präferenzwertes können Alternativen geordnet werden. Das Optimierungskriterium legt fest, welche Ausprägung für den Präferenzwert angestrebt wird. Die für die unterschiedlichen Alternativen ermittelten Präferenzwerte können als Indikator für den Grad der Bedürfnisbefriedigung oder Zielerreichung interpretiert werden /LAU 12/.

<sup>5</sup> Funktion, die jeder Handlungsalternative einen Präferenzwert zuordnet, mit dessen Hilfe Alternativen nach ihrer Vorziehungswürdigkeit geordnet werden können.

## **4            Literaturrecherche zur Anwendung von (multikriteriellen) Bewertungsmethoden**

Es wurde eine Literaturrecherche zu methodischen Herangehensweisen in Bezug auf Abwägungen und vergleichende Bewertungen durchgeführt. Im Kap. 4.1 werden zunächst Vorhaben aus Deutschland und in Ergänzung hierzu in Kap. 4.2 auch internationale fachliche Studien und Publikationen dargestellt, die sich mit der Standortauswahl von Endlagern für radioaktive Abfälle beschäftigt haben. Weiterhin werden in Kap.4.3 vergleichende Methoden für Entscheidungsprobleme aus anderen Fach- und Themenbereichen bei der Recherche berücksichtigt.

Im Kap. 6 wird auf Basis der im Kap. 2 identifizierten relevanten Verfahrensschritte und Herausforderungen bewertet, welche dieser Ansätze für die relevanten Aufgaben in den Verfahrensschritten nach StandAG in Betracht kommen könnten.

### **4.1            Vorhaben in Deutschland**

Im Folgenden werden relevante fachliche Studien und Publikationen mit Bezug auf vergleichende Bewertungen, welche für Standortauswahlverfahren in Deutschland erstellt wurden, beschrieben. Hierbei handelt es sich um:

- die Forschungsvorhaben VerSi I und II,
- den Optionenvergleich Asse,
- die Auswahl eines Zwischenlagerstandortes für rückgeholte Abfälle und
- das Verbundvorhaben ENTRIA.

Da die Vorhaben VerSi I und II dezidiert dazu dienen, eine Methode für den sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagersystemen in verschiedenen Wirtsgesteinen zu entwickeln, werden die Ergebnisse dieser Vorhaben im Nachfolgenden ausführlicher dargestellt.

#### **4.1.1            Verbundforschungsprojekt „Vergleichende Sicherheitsanalysen“ (VerSi I)**

Im Jahre 2007 wurde das Verbundprojekt „Durchführung vergleichender Sicherheitsanalysen für Endlagersysteme zur Bewertung der Methoden und Instrumentarien" (VerSi

/FIS 10/) vom BfS (Bundesamt für Strahlenschutz) initiiert, dessen übergeordnete Zielsetzung in der Entwicklung von Vergleichsgrößen, Methoden und Werkzeugen für den Vergleich von Endlagerstandorten auf der Basis von Langzeitsicherheitsanalysen zu Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen bestand.

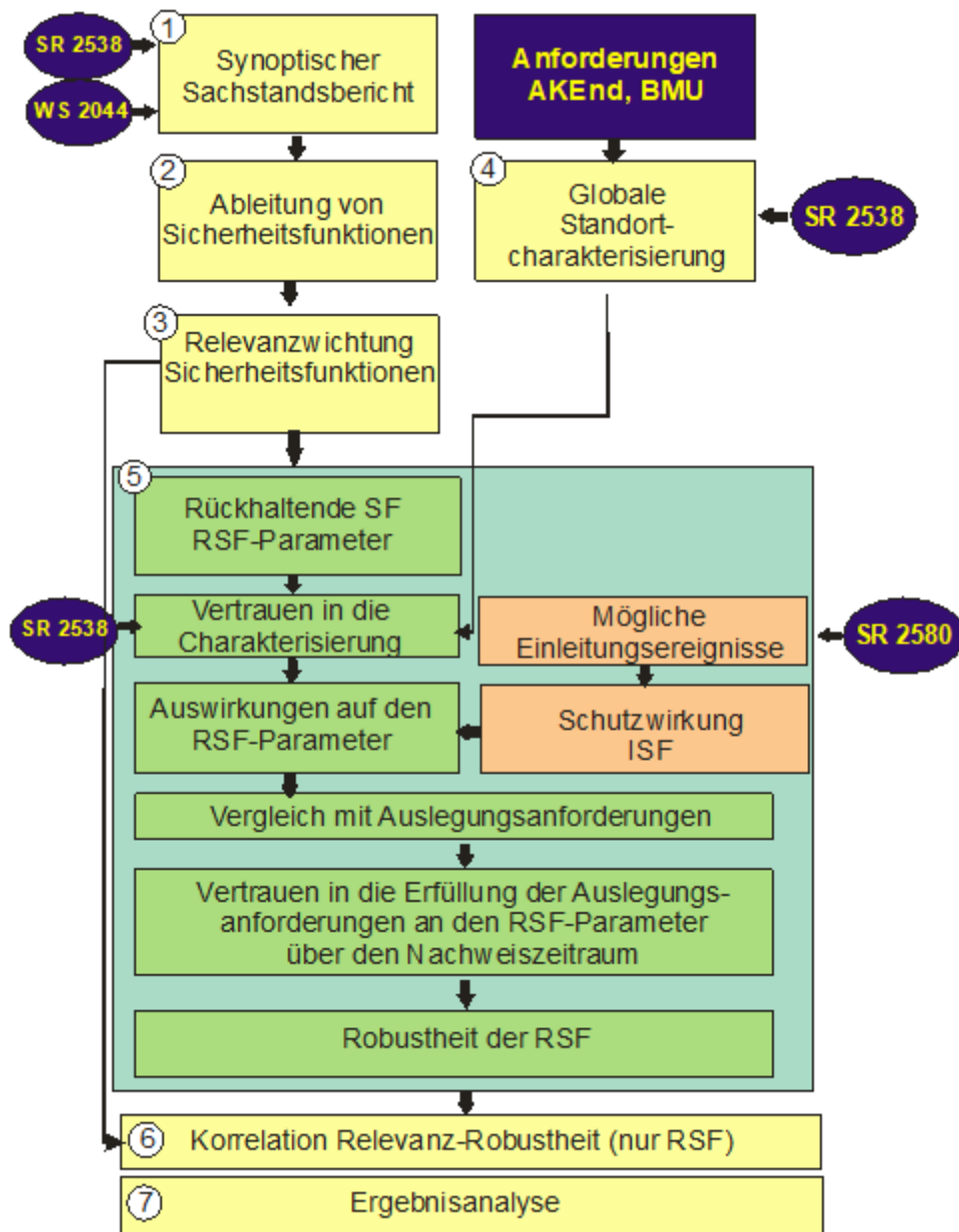
Ziel war es, wissenschaftlich-technische Grundlagen für einen sicherheitsgerichteten, methodisch systematischen und transparenten Vergleich zwischen dem Standort Gorleben und alternativen generischen Standorten in einer Tonsteinformation zu erarbeiten. Dabei wurde unterstellt, dass bei zum Vergleich anstehenden Endlagerstandorten keine gravierenden Zweifel bezüglich der Erfüllung der AkEnd-Kriterien und der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ bestehen, also ein „Mindestsicherheitsniveau“ vorliegt.

Insofern zielt die VerSi-Methodik darauf ab, die Endlagersysteme über die erforderliche Mindestsicherheitsmarge hinaus bezüglich ihrer sicherheitsgerichteten Robustheit zu bewerten. Unter Robustheit wird einerseits die Unempfindlichkeit eines Endlagersystems gegen innere und äußere Einflüsse (z. B. Inlandeisüberfahung) und andererseits der vorliegende Grad an Ungewissheiten bei Standortcharakterisierung und der Standortprognose über den Nachweiszeitraum verstanden. Für diese unterschiedlichen Aspekte der Robustheit wurden entsprechende Bewertungskriterien abgeleitet.

Diese Robustheitsbewertung wurde systematisch entlang der charakteristischen Parameter der Sicherheitsfunktionen der einzelnen Endlagersystemkomponenten (Abfall, Behälter, Versatz, geotechnische Barrieren, ewG, etc.) vorgenommen. Die Einzelbewertungen werden zum Schluss zu einer Gesamtbewertung der Robustheit der Endlagersysteme aggregiert.

Den wirtsgesteinsbedingt sicherheitskonzeptionell unterschiedlichen Anforderungen an die Funktionsweise der einzelnen Endlagersystemkomponenten, wurde durch eine Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen Rechnung getragen.

Einen Überblick über die verschiedenen Schritte der verbal-argumentativen Vergleichsmethodik zeigt Abb. 4.1.



**Abb. 4.1** Überblick über die Einzelschritte der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik für den Endlagersystemvergleich /FIS 10/.

SF: Sicherheitsfunktion, RSF: Rückhaltende Sicherheitsfunktion, ISF: Integritätsbewahrende Sicherheitsfunktion, SR 2580: VerSi-Teilvorhaben: „Szenarientwicklung“ 3607R02580; SR 2538: VerSi-Teilvorhaben: „Planerische Grundsatzfragen“ 3607R02538, WS 2044: VerSi-Teilvorhaben: „Vergleichende Langzeitsicherheitsanalysen“.

Im Einzelnen hat die verbal-argumentative VerSi-Methodik folgende Schritte (s. Abb. 4.1):

### **1. Schritt: Synoptischer Sachstandsbericht**

Der synoptische Sachstandsbericht bildet die notwendige Informationsgrundlage für die nachfolgende Bewertungen der Endlagersysteme. Im Rahmen der Standortauswahl wird davon ausgegangen, dass im Zuge der Untersuchung der zu vergleichenden Gebiete bzw. Standorte durch den Antragsteller eine schrittweise aktualisierte Dokumentation der Erkundungsergebnisse und der Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen erfolgt. Im synoptischen Sachstandsbericht werden diese Informationen entsprechend aufbereitet und für die zu vergleichenden Endlagersysteme systematisch einander gegenübergestellt.

### **2. Schritt: Ableitung von Sicherheitsfunktionen**

Ausgehend von den aus den Sicherheitskonzepten abgeleiteten Anforderungen an die einzelnen Endlagerkomponenten erfolgt eine komponentenweise Auflistung von Sicherheitsfunktionen. Hierbei werden alle Sicherheitsfunktionen gemäß ihrer Wirkungsweise in rückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF) und integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen (ISF) gegliedert. Die Wirkung rückhaltender Sicherheitsfunktionen dient primär der Radionuklidrückhaltung. Integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen dienen dagegen dem Schutz von Komponenten z. B. gegenüber mechanischen oder thermischen Lasten, die sich aus der Endlagerentwicklung oder externen Einwirkungen auf das Endlagersystem ergeben.

### **3. Schritt: Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen**

Im Vorfeld der Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen ist das unterschiedliche Gewicht (Relevanz) mit der die Sicherheitsfunktionen zur Erfüllung der Globalanforderung der Radionuklidrückhaltung beitragen, unter Berücksichtigung der jeweiligen Wirkungszeiträume, zu würdigen.



Im vorliegenden Fall wurden zwei Wirkungszeiträume unterschieden:

- a) Eine Übergangsphase, die bei einem Teil der Barrieren benötigt wird, damit diese auslegungskonforme Eigenschaften annehmen. In dieser Zeit wird die Radionuklidrückhaltung von „schnellwirkenden“ Barrieren (wie z. B. Behälter, Schacht- und Streckenabdichtungen) im Verbund mit dem ewG gewährleistet.
- b) Einer stationären Langzeitphase in der die Barrieren aus wirtsgesteinsähnlichem Material ihre auslegungskonformen Eigenschaften angenommen haben und im Verbund mit dem ewG eine dauerhafte Radionuklidrückhaltung bewirken.

Auf Grund fehlender quantitativer Maßstäbe für die Relevanz kann die Wichtung der Sicherheitsfunktionen nach ihrer Relevanz nur entlang von Ordinalskalen erfolgen. Bei diesem Ranking ist lediglich eine Ordnungsaussage möglich (wichtiger, weniger wichtig etc.), wobei die Abstände zwischen den einzelnen Rangplätzen nicht bekannt sind. Im vorliegenden Fall erfolgte die Einteilung der Sicherheitsfunktionen in 5 Relevanzklassen (5 = sehr hohe Relevanz, d. h. „unverzichtbar“ bis 1 = sehr geringe bzw. keine Relevanz).

#### **4. Schritt: Globale Standortcharakterisierung**

Aufgrund der Komplexität der natürlichen Komponenten (z.B. ewG) wird eine gezielte Gegenüberstellung der sicherheitsrelevanten Standorteigenschaften beider Endlager-systeme empfohlen, ein Schritt, der aufgrund des deutlich einfacheren strukturellen Aufbaus bei geotechnischen und technischen Komponenten entfallen kann. In Vorbereitung der Robustheitsprüfung zur Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der Parameter von rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des ewG (Verfahrensschritt 5, Arbeitsschritte 5b und 5c, s. Abb. 4.1) erfolgt eine systematische Zusammenstellung der geometrischen, geologischen, hydraulischen, geomechanischen und erdgeschichtlichen Eigenschaften der zu vergleichenden Standorte, zweckmäßigerweise in tabellarischer Form.

#### **5. Schritt: Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen**

Der zentrale Schritt der verbal-argumentativen Abwägungsmethode ist die Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen, anhand der die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen charakterisierenden Parameter (und ggf. auch Prozesse). Der

Grund für den Übergang auf die Parameterebene ist, dass Sicherheitsfunktionen zunächst lediglich abstrakte qualitativ-verbale Beschreibungen der Umsetzung sicherheitsgerichteter Anforderungen an die einzelnen Systemkomponenten darstellen und sich somit nicht primär einer Robustheitsbewertung unterziehen lassen. So können Sicherheitsfunktionen nicht selbst gemessen werden, sondern nur die sie charakterisierenden Parameter. Im letzten Arbeitsschritt der Robustheitsbewertung werden die Einzelbewertungen zu den Parametern zur Gesamtrobustheit der betreffenden Sicherheitsfunktion aggregiert.

Auch die Robustheitseinstufung der Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen erfolgt entlang von Ordinalskalen, da quantitative Maßstäbe, nach denen die Robustheit „gemessen“ werden könnte, zumindest nicht durchgängig vorhanden sind.

## **6. Schritt: Korrelation Relevanz-Robustheit**

Die Korrelation zwischen Relevanz und Robustheit der Sicherheitsfunktionen bildet die Synthese der Schritte 3 und 5 in Abb. 4.1. Ziel ist es für den Vergleich der Endlagersystem-Hinweise auf mögliche „Robustheitsdefizite“ bei den jeweiligen Sicherheitsfunktionen zu identifizieren (Negativselektion). Es geht allerdings noch nicht um eine „Endbewertung“ der Endlagersysteme, sondern zunächst nur darum potenzielle Anhaltspunkte für Relevanz gewichtete Robustheitsschwächen zu gewinnen, die im letzten Schritt 7 genauer analysiert werden.

Im Grundsatz wird dabei davon ausgegangen, dass ein Endlagersystem dann eine ideale Robustheit aufweist, wenn alle rückhaltenden Sicherheitsfunktionen bezogen auf ihre Relevanz **angemessene** Robustheiten aufweisen. So bestehen bei rückhaltenden Sicherheitsfunktionen, die als sehr relevant (Einstufung 5), d. h. als unverzichtbar eingestuft wurden, entsprechend hohe Erwartungen an die Robustheit. Diese werden dann erfüllt, wenn die Bewertung der Sicherheitsfunktion im Verfahrensschritt 5 mindestens zur Einstufung als „robust“ (Einstufung 4) geführt hat. Entsprechendes gilt für rückhaltende Sicherheitsfunktionen deren Relevanz geringer als 5 eingestuft wurde. Auch hier gilt die Erwartung einer bezüglich der Relevanz angemessenen Robustheitseinstufung.

Fällt die Robustheitseinstufung dagegen um 2 oder mehr Ordinalklassen geringer aus als die entsprechende Relevanzeinstufung, so wird dies als Hinweis auf eine mögliche Robustheitsschwäche des jeweiligen Endlagersystems gewertet. Robustheitseinstufun-

gen von rückhaltenden Sicherheitsfunktionen, die höher als die erwartete Mindesteinstufung liegen, führen dagegen zu keinem „Robustheitsgewinn“ des betrachteten Endlagersystems.

## **7. Schritt: Ergebnisanalyse**

Ziel des letzten Schrittes ist die Bewertung der im vorangegangenen Verfahrensschritt zunächst formal identifizierten Robustheitsdefizite. Es erfolgt eine Analyse, welche Einzelaspekte zu einer (bezogen auf ihre Relevanz) kritischen Robustheitseinschätzung beigetragen haben. Weiterhin werden die Auswirkungen der Robustheitsdefizite auf die Einschlusswirkung der zu vergleichenden Endlagersysteme sowie die Ursachen der Robustheitsdefizite im Hinblick auf ihre Behebbarkeit untersucht.

Auch im Schritt 7 wird keine Kompensation der identifizierten Robustheitsdefizite im Sinne einer Verrechnung vorgenommen. Dies bedeutet, dass es beispielsweise nicht zielführend ist, dasjenige Endlager als Favorit herauszustellen, welches weniger Robustheitsdefizite als das andere aufweist oder ein Robustheitsdefizit mit einem besonders robusten Befund einer anderen Sicherheitsfunktion zu kompensieren. Vielmehr muss das Ergebnis verbal-argumentativ bewertet werden.

Generell erfolgt keine endgültige Entscheidung, welches der beiden Endlagersysteme das zu bevorzugende ist. Dies bleibt im späteren operativen Standortauswahlprozess dem Entscheider vorbehalten. Endziel eines verbal-argumentativen Abwägungsverfahrens ist es vielmehr, dem Entscheider die Ergebnisse des Abwägungsverfahrens soweit aufbereitet und interpretiert zur Verfügung zu stellen, dass dieser eine vergleichsweise einfache Endabwägung vornehmen und eine begründete Entscheidung treffen kann.

### **4.1.2 „Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen“ (VerSi II)**

In den Jahren 2016 und 2017 wurde im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens 05504/2 von der GRS die VerSi I-Abwägungsmethode weiterentwickelt. Hierbei wurden folgende Aspekte bearbeitet:

- Die Erweiterbarkeit der Abwägungsmethode auf Standorte in kristallinem Wirtsgestein.
- Die Überprüfung der Notwendigkeit der Modifikation der Abwägungsmethode infolge des Gebotes der Rückholbarkeit und der Bergbarkeit der Abfälle.
- Überprüfung, ob die Abwägungsmethode bereits bei der Auswahl von Untersuchungsräumen in Phase 1 angewendet werden kann.

Die Ergebnisse des Vorhabens VerSi II sind in /FIS 17/ dokumentiert. Im Nachfolgenden wird auf die wichtigsten Ergebnisse eingegangen.

## **1. Erweiterung der Abwägungsmethode auf Standorte in kristallinem Wirtsgestein**

### **Komponentenmodell**

Zu Beginn der Arbeiten zur Erweiterung der Abwägungsmethode auf Kristallinstandorte im Vorhaben VerSi II wurde klar, dass das im Vorhaben VerSi I verwendete Komponentenmodell, welches aus zwei horizontalen Einlagerungskonzepten und standortspezifischen Verschlusskonzepten abgeleitet worden war, eine zu geringe Flexibilität aufweist, um alle für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland in Frage kommenden Verschlusskonzepte abzubilden. So können aktuelle Verschlusskonzepte, die z. B. in den Vorhaben ANSICHT /JOB 17/ oder CHRISTA /JOB 16/ entwickelt wurden, damit nicht abgebildet werden, da es weitere Komponenten gibt, die im VerSi I-Komponentenmodell nicht vorhanden sind. Es wurde daher ein modulares Komponentenmodell entwickelt, mit dem sich Verschlusskonzepte für verschiedene Wirtsgesteine in ihrer Grundstruktur abbilden lassen (s. Abb. 4.2). Dieses Komponentenmodell kann verwendet werden, um den Aufbau von Endlagerkonzepten zu analysieren und zu vergleichen. Ziel ist eine Verbesserung des Verständnisses der zu vergleichenden Endlagersysteme.

### **Komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen**

Die im Vorhaben VerSi I durchgeführte Zuordnung von Sicherheitsfunktionen zu einer exakt gleichen Anzahl von Komponenten bei allen Endlagersystemen entfällt. Stattdessen darf nun bei der Relevanz- und Robustheitsbewertung die Anzahl und Art der Komponenten für jedes Endlagerkonzept unterschiedlich sein.

Bei der Relevanz- und Robustheitsbewertung wird unter einer Sicherheitsfunktion immer die Sicherheitsfunktion einer bestimmten Komponente verstanden. Sicherheitsfunktionen treten hier nie als abstrakte, von Komponenten losgelöste Einheiten auf.

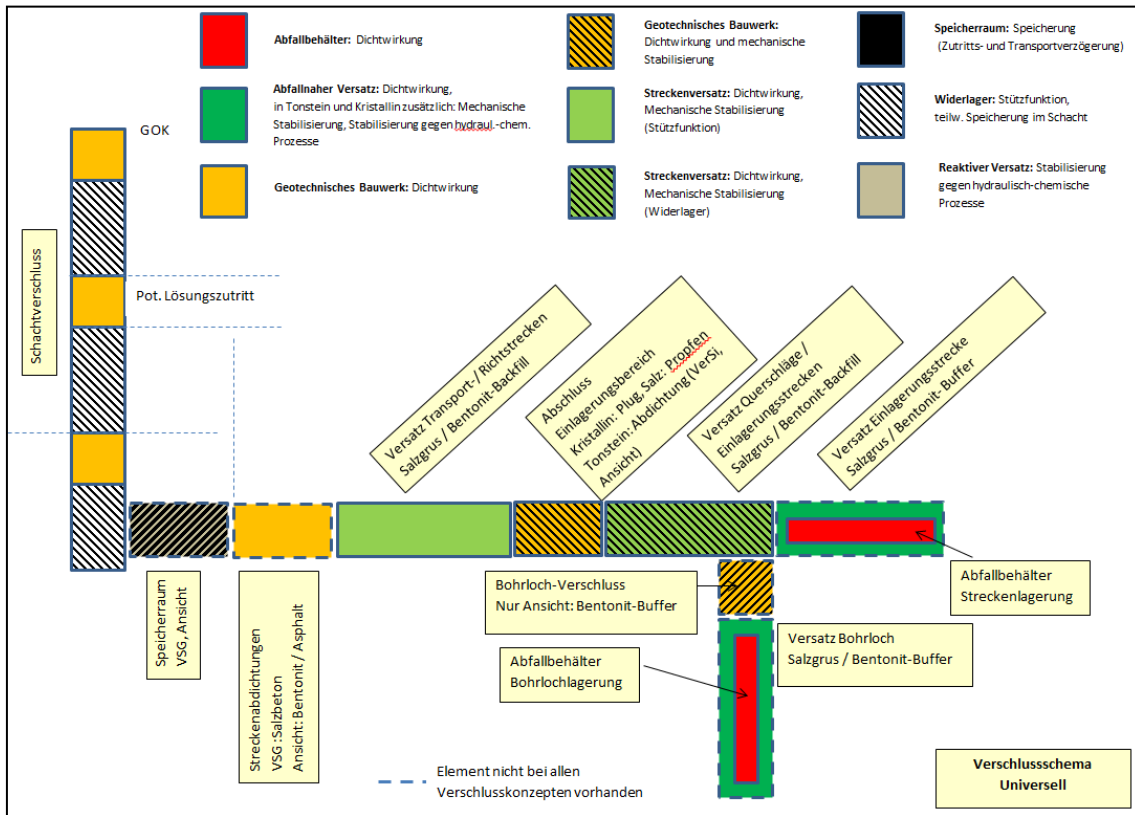


Abb. 4.2 Modulares Komponentenmodell des Vorhabens VerSi II / FIS 17/

### Verzicht auf Rangzahlen

Um die Gefahr unzulässiger Verrechnungen von Rangzahlen untereinander zu mindern, werden nun nicht-numerische Merkmalsausprägungen verwendet. Anstelle der Ausprägungen 1 bis 5 des Vorhabens VerSi I für die Spektren „niedrige Robustheit bis hohe Robustheit“ und „niedrige Relevanz bis hohe Relevanz“ wurden nun die Ausprägungen „E“, „D“, „C“, „B“ und „A“ (mit ansteigender Relevanz/Robustheit) festgelegt.

### Identifikation, Klassifizierung und Relevanzrichtung der Sicherheitsfunktionen

Die Liste der Sicherheitsfunktionen aus dem Vorhaben VerSi I wurde für das VerSi II Vorhaben mit der Liste der Sicherheitsfunktionen des schwedischen KBS-3 Konzeptes verglichen und entsprechend ergänzt. Diese erweiterte Liste wurde um weitere Sicher-

heitsfunktionen, wie dem *Erosionsschutz, Gewährleistung des Quellvermögens, der Begrenzung der Gasbildung, der Speicherung, der Hydrodynamischen Dispersion, der Matrixdiffusion* und der *Dichteschichtung im Grundwasser* ergänzt.

Außer der Dispersion konnten keine zusätzlichen kristallin-spezifischen Prozesse aus dem KBS-3-Konzept identifiziert werden, welche zur Ableitung zusätzlicher Sicherheitsfunktionen geführt hätten. Alle Prozesse waren bereits indirekt in den charakteristischen Parametern der Liste der Sicherheitsfunktionen des Vorhabens VerSi I berücksichtigt. Um die Bedeutung einzelner Prozesse zu betonen, wurden für diese in der neuen erweiterten Liste eigenständige Sicherheitsfunktionen definiert.

## **2. Überprüfung der Notwendigkeit der Modifikation der Abwägungsmethode infolge des Gebotes der Rückholbarkeit und der Bergbarkeit der Abfälle**

Die Untersuchungen kamen zu dem Schluss, dass eine Modifikation der VerSi-Methodik in Bezug auf die regulatorische Forderung nach Rückholbarkeit und Bergbarkeit aus den folgenden Gründen nicht erforderlich ist:

- Es wurden keine zusätzlichen Sicherheitsfunktionen identifiziert, welche aus der Rückholung/Bergung abgeleitet werden könnten. Im Wesentlichen beeinflussen die Modifikationen des Endlagerkonzeptes allenfalls die Robustheit der Sicherheitsfunktionen, die Prozesse bleiben die Gleichen.
- Eine Modifikation bestehender Sicherheitsfunktionen aufgrund von Maßnahmen zur Ermöglichung der Rückholung und Bergung ist nicht erforderlich. Einflüsse werden bei der Robustheitsbewertung der Sicherheitsfunktionen berücksichtigt.
- Bei der Relevanzbewertung der Sicherheitsfunktionen ist die Relevanz für die Langzeitsicherheit und nicht die Relevanz für die Rückholung und Bergung zu betrachten.

### 3. Anwendbarkeit der VerSi-Methode in der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens

Im Ergebnis wurde hierzu festgestellt:

- Die Abwägungsmethode wurde grundsätzlich für Standorte entwickelt. Sie ist nicht dazu angelegt auf größere Bereiche, d. h. Standortregionen mit möglicherweise variierenden geologischen Verhältnissen ausgedehnt zu werden. So erfordert die Methode **standortspezifische** Sicherheitskonzepte anhand derer die Ableitung der jeweiligen Sicherheitsfunktionen und die Bewertung ihrer Robustheit erfolgt.
- Die Abwägungsmethode setzt eine annähernd vergleichbare Qualität der Datenlage bei den zu vergleichenden Systemen voraus. In der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens, in welcher Standortregionen aus den Teilgebieten ermittelt werden sollen, ist eine vergleichbare Untersuchungstiefe der verschiedenen Standortregionen aller Wahrscheinlichkeit nach nicht gegeben. Die unterschiedlichen Untersuchungstiefen können auch nicht im Rahmen der ersten Phase durch Standortuntersuchungen angeglichen werden, denn in dieser Phase ist es gerade das Ziel, die Regionen auszuweisen, für die eine Erkundung vorgeschlagen wird (vgl. § 14 StandAG). Starke Unterschiede in der Untersuchungstiefe würden bei der Robustheitsbewertung diejenigen Systeme in unzulässiger Weise benachteiligen, bei denen die Datenlage schlechter ist, ohne dass die Möglichkeit eines diesbezüglichen Ausgleichs (z. B. durch gezielte Zusatzuntersuchungen) bestünde.
- Selbst wenn zwei Regionen die gleiche Untersuchungstiefe aufweisen würden, bereits generische Sicherheitskonzepte vorlägen und für jede komponentenspezifische Sicherheitsfunktion eine Relevanzbewertung durchführbar wäre, ließe sich die Abwägungsmethode dennoch nur mit Einschränkungen anwenden:
  - Wegen der in der Phase 1 noch hohen Datenungleichheit können Sicherheitsfunktionen keine hohe Robustheitsbewertung erhalten.
  - Die Bewertung der Relevanz ist vorläufig, da die Sicherheitskonzepte noch geändert oder konkretisiert werden können.
  - Die Gesamtbewertung kann nicht zum Ausschluss eines Teilgebietes bzw. einer Standortregion führen, da alternative generische Sicherheits- bzw. Endlagerkonzepte möglich sind.

Im Übrigen ist es nicht zwingend, dass in der Phase 1 Untersuchungsräume miteinander verglichen werden müssen, da das Hauptziel hier der Ausschluss von Gebieten gem. Ausschlusskriterien bzw. Mindestanforderungen bzw. der Verkleinerung der verbliebenen Untersuchungsräume durch anwenden der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ist.

#### **4.1.3 Optionenvergleich Asse**

Die Anwendung einer Methode für eine sicherheitsgerichtete Abwägung und vergleichenden Bewertung erfolgte bei dem Optionenvergleich Asse /BfS 10/. Diese führte zu der Entscheidung der Rückholung der Abfälle aus der Schachtanlage Asse.

Zunächst wurden als Voraussetzung für eine sicherheitsgerichtete Abwägung und vergleichenden Bewertung mögliche Stilllegungsoptionen identifiziert und deren Machbarkeit bewertet /BfS 19/. Für den eigentlichen Optionenvergleich wurden Beurteilungsfelder mit einzelnen Kriterien sowie Bewertungsgrößen und -maßstäbe benannt /BFS 09/. Die weitere Vorgehensweise beinhaltet einen **kriterienbezogenen Paarvergleich** der Varianten bzw. Optionen anhand von Indikatoren. Die abschließende Bildung der Gesamtrangfolge für eine Entscheidung wurde durch eine verbal-argumentative Wichtung der Beurteilungsfelder ermöglicht. Ergänzend erfolgte eine Sensitivitätsanalyse, die als wichtig angesehen wird, um den Einfluss von Ungenauigkeiten der Bewertung auf die Bildung einer Rangfolge erkennen zu können.

Das Verfahren soll in ähnlicher Weise für die Auswahl des Standorts eines Zwischenlagers für die zurückgeholten Abfälle angewendet werden. Daher wird die grundsätzliche Vorgehensweise im nachfolgenden Kap. 4.1.4 dargestellt.

#### **4.1.4 Auswahl eines Zwischenlagers für rückgeholte Abfälle**

Eine ähnliche Vorgehensweise wie beim Optionenvergleich Asse (Kap. 4.1.3) wurde für die Auswahl eines übertägigen Zwischenlagers für die rückgeholten radioaktiven Abfälle aus der Schachtanlage Asse II /BFS 14/ vorgeschlagen. Dafür wurden die Kriterien zur Bewertung potenzieller Standorte für übertägige Zwischenlager erarbeitet /BFS 14/. Der eigentliche Vergleich und die Auswahl eines Standorts sind nach gegenwärtigem Kenntnisstand der Autoren noch nicht erfolgt.



Grundsätzlich können für die Errichtung eines Zwischenlagers verschiedene Standortvarianten in Betracht gezogen werden. Das Lagergebäude und alle erforderlichen Anlagen und Einrichtungen könnten zum einen auf dem Gelände der Schachanlage bzw. unmittelbar angrenzend oder in direkter Umgebung (auf innerbetrieblichen Transportwegen erreichbar) errichtet werden. Des Weiteren wäre auch ein Zwischenlagerstandort am Zielendlager denkbar. Die dritte Variante wäre ein beliebiges Standortareal innerhalb der Bundesrepublik Deutschland. Ein Standort für die Gesamtanlage auf dem Gelände der Schachanlage oder unmittelbar angrenzend ist, aufgrund wesentlich geringerer Transportwege und durch Vermeidung von zusätzlichem Umgang mit radioaktiven Stoffen vor Nachqualifizierung der Abfälle und deren Transport auf öffentlichen Verkehrswegen, vorteilhaft.

Um eine einheitliche Untersuchung und spätere Vergleichbarkeit der potenziellen Standortareale zu gewährleisten, wurde in /BFS 14/ ein Kriterienkatalog aufgestellt nach dem die verschiedenen Standorte für ein Zwischenlager bewertet werden können. Die zugrunde gelegten Kriterien umfassten die Beurteilungsfelder:

- Technische Aspekte,
- Einwirkungen von außen,
- Genehmigungsaspekte,
- Landschaft und Erholung,
- Lebensräume, Flora und Fauna,
- Ressourcenschonung.

Die Bewertung und der Vergleich potenzieller Zwischenlagerstandorte sollen in einem mehrstufigen und schrittweisen Verfahren erfolgen. Das in /BFS 14/ ausgearbeitete und nachfolgend beschriebene Verfahren wurde bisher nicht für die Auswahl eines Zwischenlagerstandortes angewendet.

In der ersten Stufe des Auswahlprozesses werden anhand der alleinigen Anwendung von Ausschlusskriterien potenziell geeignete Zwischenlagerstandorte identifiziert.

In Stufe zwei werden diese grundsätzlich geeigneten Standorte auf Basis des vorliegenden Kriterien Berichtes vergleichend bewertet /BFS 14/. Im ersten Schritt der Stufe zwei

wird die Wahl und Wichtung der Beurteilungsfelder festgelegt, wie sie beispielsweise in Tab. 4.1 gezeigt ist.

**Tab. 4.1** Wahl und Wichtung von Beurteilungsfeldern

Beurteilungsfeld	Wichtung
Technische Aspekte	Hoch
Einwirkungen von außen	Hoch
Genehmigungsaspekte	Mittel
Landschaft und Erholung	Gering
Lebensräume, Flora und Fauna	Gering
Ressourcenschonung	Mittel

Im zweiten Schritt werden die Standorte jeweils bezogen auf verschiedene Kriterien, mit Bewertungsgrößen charakterisiert. Die Kriterien (ggfs. mit Bewertungsgrößen) sind neben der Wichtung der Beurteilungsfelder die wichtigste Grundlage der Methodik.

Im dritten Schritt erfolgt für jedes Kriterium ein Paarvergleich der charakterisierten Standorte. Ob Standorte besser zu bewerten sind oder ob diese gleich zu bewerten sind, wird verbal-argumentativ bestimmt.

**Tab. 4.2** Kriterienbezogener Paarvergleich

Kriterium 1	Standort A	Standort B	Standort C	Standort D	Ergebnis
Standort A		Schlechter	Schlechter	Besser	- - +
Standort B	Besser		Besser	Schlechter	+ + -
Standort C	Besser	Schlechter		Gleich	+ - 0
Standort D	Schlechter	Besser	Gleich		- + 0

In dem dargestellten Beispiel (Tab. 4.2) schneidet Standort A schlechter (-) ab als die Standorte B und C, jedoch besser (+) als Standort D. Standort A erhält somit 1 positive und 2 negative Bewertungen. Standort B wird besser bewertet als die Standorte A und C, jedoch schlechter als D. Damit erhält Standort B 2 positive und 1 negative Bewertung. Die Standorte C und D erhalten je 1 positive, 1 neutrale (0) und eine negative Bewertung.

Wie aus dem Beispiel ersichtlich wird, kann sich für die einzelnen Kriterien ein nicht eindeutiges Bild des Vergleiches ergeben. Vor diesem Hintergrund macht die Aufstellung einer kriterienbezogenen Rangfolge bei geringer Standortzahl keinen Sinn, da schon das Ergebnis eines einzelnen Paarvergleichs die Rangfolge beeinflussen kann. Die Rangfolgenbildung erfolgt daher auf nächst höherer Ebene der Beurteilungsfelder.

Hieraus ergibt sich im vierten Schritt die Rangfolge innerhalb der Beurteilungsfelder. Die Ergebnisse des kriterienbezogenen Paarvergleichs fließen in die Rangfolgenbildung für die Beurteilungsfelder ein. Für die jeweiligen Beurteilungsfelder werden auf den Ergebnissen des kriterienbezogenen Paarvergleichs jeweils Rangfolgen erstellt, in dem die Ergebnisse in Tabellenform dargestellt und verbal-argumentativ begründet werden. Mathematische Operationen finden dabei nicht statt.

In dem Beispiel (Tab. 4.3) ergibt sich für den Standort A ein ausgeglichenes Bild, da die Anzahl der negativen und positiven Bewertungen gleich ist. Bei dem Standort B ist die Anzahl der negativen Bewertungen geringfügig größer als die der positiven Bewertungen. Standort C erhält dagegen die meisten positiven Bewertungen. Standort D erhält die meisten negativen Bewertungen.

**Tab. 4.3** Rangfolgenbildung je Beurteilungsfeld

Beurteilungsfeld 1	Standort A	Standort B	Standort C	Standort D
Kriterium 1	-- +	- + +	- 0 +	- 0 +
Kriterium 2	+ + -	+ - -	+ + +	- - -
Kriterium 3	+ - 0	+ - -	+ + 0	+ - 0
Kriterium 4	- + 0	- + 0	- + +	- + -
<b>Rangfolge</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>	<b>1.</b>	<b>4.</b>

Die Rangfolgenbildung ergibt sich aus der Abwägung aller der für die einzelnen Standorte vorliegenden Bewertungen. Für das schematisch dargestellte Beispiel (Tab. 4.3) ergibt sich eine eindeutige Rangfolge nach der im Beurteilungsfeld 1 der Standort C vor A, B und D liegt. Diese Rangfolge ist ausführlich zu begründen, wobei auf Ungewissheiten und geringe Unterschiede der Bewertungen bei einzelnen Kriterien eingegangen wird. Bei dieser Form der Rangfolgenbildung findet keine Kompensation von Kriterien statt, sondern es erfolgt lediglich eine Abwägung der positiven und negativen Bewertungen, die verbal-argumentativ offengelegt wird. Der Prozess der Rangfolgenbildung bleibt

dadurch transparent und nachvollziehbar, da keine Gewichtungs- oder sonstigen numerischen Faktoren in die Bewertung einfließen.

Im fünften Schritt wird mittels der vorgeschlagenen Wichtung der Beurteilungsfelder eine Gesamtrangfolge ermittelt.

Im letzten Bewertungsschritt werden die Rangfolgen aller jeweiligen Beurteilungsfelder zu einer Gesamtrangfolge mit und ohne Wichtung zusammengefasst (Tab. 4.4). Es ist nicht zu erwarten, dass sich ein Standort in allen Beurteilungsfeldern als eindeutig optimale Lösung herausstellen wird. Es kommt somit in diesem Schritt auf die vorab in Schritt 1 festgelegte Gewichtung an.

An dem dargestellten Beispiel (Tab. 4.4) wird deutlich, dass die Rangfolgen in den verschiedenen Beurteilungsfeldern unterschiedlich ausfallen können. Ohne Wichtung der Felder zeigt sich lediglich, dass Standort D eindeutig als schlechteste Variante ausscheidet. Die Standorte A, B und C lassen sich ohne Wichtung nicht eindeutig in eine Rangfolge bringen, da z. B. die Variante C zwar bei 2 Beurteilungsfeldern als beste Variante abschneidet, bei Feld 4 jedoch als schlechteste. Sollten die Felder 1 und 3 für die Bewertung der Stilllegungsoptionen als von besonderer Bedeutung eingeschätzt werden und/oder die Beurteilung des Feldes 4 durch technische Rahmenbedingungen oder ersichtliche Faktoren beeinflusst werden, ergäbe sich ein deutlicher Vorteil von Standort C. Sollten jedoch die Felder 2 und 4 als besonders wichtig bewertet werden, ergäbe sich ein Vorteil für Standort A, der zudem bei keinem Beurteilungsfeld als schlechtestes abschneidet.

**Tab. 4.4** Bildung einer Gesamtrangfolge ohne und mit Wichtung.

	<b>Rang 1</b>	<b>Rang 2</b>	<b>Rang 3</b>	<b>Rang 4</b>
Beurteilungsfeld 1	C	A	B	D
Beurteilungsfeld 2	A	C	D	B
Beurteilungsfeld 3	C	B	A	D
Beurteilungsfeld 4	B	A	D	C
Beurteilungsfeld 5	A	B	C	D
Beurteilungsfeld 6	B	A	C	D
Gesamtrangfolge ohne Wichtung	A, B, C	A, B, C	A, B, C	D
Gesamtrangfolge nach Wichtung	C	A	B	D

Die sich durch die in Schritt 1 vorgeschlagene Wichtung ergebende Gesamtrangfolge ist für den beispielhaft durchgeführten Vergleich von vier potenziellen Zwischenlagerstandorten ebenfalls in Tabelle 5 dargestellt. Der Standort C belegt in den stärker gewichteten Beurteilungsfeldern 1 bis 3 zwei erste und einen zweiten Rang, ist somit nach Wichtung der beste Standort. Standort A belegt in den wichtigen Feldern die Ränge eins bis drei, ist somit insgesamt als am zweitbesten einzuschätzen. Standort B belegt in keinem der wichtigen Beurteilungsfelder einen ersten, dafür in Feld 2 den letzten Rang. Er schneidet in keinem wichtigen Feld besser als Standort C und nur in Feld 3 besser als Standort A ab. Hieraus ergibt sich insgesamt Rang 3 für Standort B. Der Gesamtrang für Standort D verändert sich in diesem Beispiel auch nach Wichtung der Beurteilungsfelder nicht.

Jedoch ist die Wichtung der Beurteilungsfelder hier dennoch von entscheidender Bedeutung. Das Verfahren liefert kein unzweifelhaft eindeutiges oder richtiges Ergebnis. Es erlaubt jedoch durch die systematische Vorgehensweise eine detaillierte Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsfindung.

#### **4.1.5 Verbundvorhaben ENTRIA**

Das interdisziplinäre Verbundvorhaben ENTRIA („Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen“), hatte die Aufgabe die Entsorgung radioaktiver, insbesondere hoch radioaktiver Reststoffe, als gesamtgesellschaftliche Aufgabe zu untersuchen. In dem Verbundvorhaben

waren zwölf Institute bzw. Fachbereiche deutscher Universitäten und Großforschungseinrichtungen sowie ein Partner aus der Schweiz, aus den Bereichen Natur-, Ingenieur-, Geistes-, Rechts-, Sozial- und Politikwissenschaften sowie aus dem Bereich Technikfolgenabschätzung beteiligt /RÖH 19/.

Eines der strategischen Ziele des Vorhabens war die Schaffung von Grundlagen für den bewertungsorientierten Vergleich von drei verschiedenen Entsorgungsoptionen, für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen:

- ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung),
- mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit (Tiefenlagerung mit Rückholbarkeit) und
- Oberflächenlagerung.

Hierfür sollte eine vergleichende Risikobewertung der unterschiedlichen Entsorgungsoptionen durchgeführt werden. Aus verschiedenen Überlegungen heraus wurde ein Vorschlag entwickelt, eine vergleichende Risikobewertung anhand von kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten vorzunehmen. Die für die jeweilige Entsorgungsoption verbundenen Risiken können sich mit der Zeit ändern, deshalb wurde für die vergleichende Risikobewertung, zeitlich gestaffelte Entwicklungsschritte der Referenzoptionen angenommen /RÖH 19/.

Neben der Berücksichtigung von Ungewissheiten und kalkulierbaren Risiken, welche direkt mit dem Endlager verbunden sind, wurden in der vergleichenden Risikobewertung auch weitere begleitende Aktivitäten berücksichtigt. Hierzu zählen die Zwischenlagerung und Transporte von hoch radioaktiven Abfällen. In die Risikobewertung fließt ein breites Spektrum an potentiellen Risiken, wie beispielsweise radiologische Risiken, Risiken aufgrund von Arbeitsunfällen oder psychosoziale Risiken im Zusammenhang mit konfliktbeladenen Situationen mit ein. Zudem wurden Störfallanalysen und eine Bewertung von Robustheitsdefiziten in Bezug auf Sicherheitsfunktionen durchgeführt. Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein Prozess, der die sicherheitsrelevanten Anforderungen in einem Endlagersystem oder einer Komponente (siehe /BMU 19c/) gewährleistet.

Durch die Bestimmung der Robustheit<sup>6</sup> der jeweiligen Sicherheitsfunktionen können risikobezogene Stärken und Schwächen von Entsorgungsoptionen ermittelt werden. Robustheitsdefizite werden aus der Relevanz der Sicherheitsfunktionen und ihrer jeweiligen Robustheit ermittelt. Für die vergleichende Bewertung wurden zudem Erkenntnisse aus dem Projekt „Vergleichende Sicherheitsanalysen“ (VerSi) verwendet /RÖH 19/.

Zur Durchführung eines aussagekräftigen Vergleiches der Entsorgungsoptionen wurden standortunabhängige „generische“ Referenzmodelle für die Wirtsgesteine Steinsalz und Tongestein entwickelt. Die vergleichende Bewertung erfolgte nicht quantitativ, sondern durchgehend verbal-argumentativ, mit einem strukturierten Vorgehen. Ein Vergleich der Entsorgungsoptionen erfolgte auf Grundlage der mit ihr verbundenen kalkulierbaren Risiken, Ungewissheiten und Robustheitsdefiziten /RÖH 19/. Die Ergebnisse der umfassenden Risikobewertung sind in verschiedenen ENTRIA-Arbeitsberichten dokumentiert.

Der ENTRIA-Arbeitsbericht-10 „Identifizierung von Robustheitsdefiziten für die vergleichende Bewertung von Referenzmodellen zur Tiefenlagerung“ /KRE 18/ stellt Untersuchungsergebnisse für die Entsorgungsoptionen „Endlagerung mit schnellem Verschluss des Tiefenlagers am Ende der Betriebsphase“ und „Tiefenlagerung mit Monitoring und der Möglichkeit der Rückholung von Abfällen“ dar.

Der ENTRIA-Arbeitsbericht-12 „Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle.“ /ECK 18/ dokumentiert die vergleichende Bewertung der drei unterschiedlichen Entsorgungsoptionen. Die Entsorgungsoptionen wurden anhand der Bewertung der Ungewissheiten in eine Rangfolge gebracht. Die Rangfolge sagt jedoch nichts über das absolute Maß an Ungewissheiten aus. Der Vergleich der Entsorgungsoptionen erfolgte **verbal-argumentativ**, da aufgrund des Mangels an quantitativen Informationen zu den weitgehend generischen Referenzmodellen und methodischer Schwierigkeiten bei der Einschätzung gesellschaftlich bedingter Ungewissheiten, eine rechnerische Aggregation nicht durchzuführen war. Die risikorelevanten Ungewissheiten für Einflüsse, Entwicklungen und Aktivitäten wurden zunächst für die jeweils untersuchte Phase der drei untersuchten Entsorgungsoptionen gegeneinander abgewogen. Im Anschluss wurden für jede Phase die Teilergebnisse zusammengeführt und in einer umfassenden Risikobewertung in einer s. g. Risikokarte dargestellt /ECK 18/.

---

<sup>6</sup> Nach /BMU 19c/ ist Robustheit: „die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen“

## **4.2 Vorhaben im Ausland**

International wurden seit den siebziger Jahren Standortauswahlverfahren durchgeführt. Nach /APP 09/ gab es bis 2009 nur wenige Länder, welche ein Standortauswahlverfahren für die Endlagerung (hoch)radioaktiver Abfälle in Betracht zogen, das auch die Ergebnisse von Sicherheitsuntersuchungen zum Vergleich vorab ausgewählter potenzieller Standorte anwendet, wie es in Deutschland vorgesehen ist. Zu diesen Ländern gehört insbesondere die Schweiz. In der Schweiz ist die Sicherheitsanalyse nicht nur ein wichtiges Element des Nachweises der Langzeitsicherheit für Endlagerstandorte, sondern auch für die Standortauswahl.

Im Folgenden werden ausgewählte Länder und deren Vorgehensweise in der Standortauswahl bzw. für den Vergleich von Untersuchungsräumen zusammenfassend dargestellt.

### **4.2.1 Schweiz**

Das Kernenergiegesetz /BUN 18/ und die Kernenergieverordnung /KEV 16/ legte im Jahr 2005 im sogenannten Sachplan geologische Tiefenlager (SGT oder Sachplan) die Vorgehensweise in der Schweiz zur Auswahl von Endlagerstandorten fest /BFE 08/. Der Sachplan sieht eine Gliederung des Standortauswahlverfahrens in drei Etappen vor. Nach der Ausweisung von Standortgebieten sollten provisorische Sicherheitsanalysen, Raumentwicklungsanalysen und sozioökonomische Studien für die Standortauswahl durchgeführt werden (siehe auch /EID 10/ und /ENSI 13/). Die bisherigen Arbeiten der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) und des Eidgenössischen Nuklear-Sicherheitsinspektorat (ENSI) sind ausführlich dokumentiert und weit vorangeschritten. Insofern sind die bisher erfolgten Arbeiten und Erfahrungen der Schweiz für die vorliegende Fragestellung von besonderem Interesse und Bedeutung.

Vor dem Sachplan wurde Kristallingestein als potentiell Wirtsgestein in der Schweiz untersucht /NAG 85a/, /NAG 85b/. Später wurden allerdings aus Gründen der Robustheit auch Standorte mit dem Wirtsgestein Tongestein im Rahmen des Sachplan zur Standortauswahl für hochradioaktive Abfälle berücksichtigt /BFE 08/. Kristallingesteine sieden bereits in der ersten Etappe des Sachplanverfahrens aufgrund von Mindestanforderungen zur Charakterisierbarkeit aus und es wurde nur noch das Wirtsgestein Ton-



gestein untersucht. Im Vergleich zum deutschen Standortauswahlverfahren entfallen daher in der Schweiz methodische Ansätze zum Vergleich von Konzepten und Standorten in den Wirtsgesteinen Kristallingestein oder Steinsalz.

Die für die Entsorgung radioaktiver Abfälle verantwortliche Nagra hat bereits im Jahr 1985 Entsorgungsnachweise für schwach- und mittelradioaktive Abfälle einerseits und für hochradioaktive Abfälle (einschließlich abgebrannter Brennelemente und langlebiger mittelaktiver Abfälle) andererseits vorgelegt. Die vom schweizerischen Bundesrat 1988 weitgehend akzeptierten Entsorgungsnachweise zeigten, dass die sichere und dauernde Endlagerung der Abfälle in der Schweiz grundsätzlich möglich ist.

Der Entsorgungsnachweis für hochradioaktive Abfälle bezog sich auf kristalline Gesteine in der Nordschweiz und war vom Bundesrat nur teilweise akzeptiert worden. Der Bundesrat hatte zudem (u. a.) die Einbeziehung von Sedimentgesteinen in die Nachweisführung gefordert. In der Folge hat die Nagra Sedimentgesteinsformationen nördlich der Alpen untersucht und schließlich im Jahr 2002 erneut einen Entsorgungsnachweis für hochradioaktive Abfälle vorgelegt. Der Nachweis wurde für das Wirtsgestein "Opalinuston" im Zürcher Weinland geführt und ist - gestützt auf die Prüfergebnisse der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK, heute: Eidgenössisches Nuklear-Sicherheitsinspektorat - ENSI) und weiterer beratender Institutionen - im Juni 2006 vom Bundesrat akzeptiert worden.

Die Wahl des von der Nagra vorgesehenen Standorts Wellenberg im Kanton Nidwalden als Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle ist in den Jahren 1988, 1995, 2002, 2011 und 2018 in Abstimmungen von der Bevölkerung abgelehnt worden.

In der Folge wurden von der HSK sicherheitstechnische Kriterien für den Sachplan hergeleitet /HSK 07/. Der Konzeptteil des Sachplans geologische Tiefenlager erschien 2008 /BFE 08/ und ist heute die Grundlage für das Auswahlverfahren in der Schweiz.

#### **4.2.1.1 Sachplan geologische Tiefenlager (SGT)**

In diesem hier grob skizzierten Auswahlverfahren sind in Etappen sicherheitstechnische Abwägungen und vergleichende Bewertungen wie folgt vorgesehen:

In **Etappe 1** schlagen die Entsorgungspflichtigen (Nagra) aufgrund von sicherheitstechnischen Kriterien geologisch geeignete Standortgebiete vor und begründen die getroffene Auswahl in einem Bericht (Erste Anwendung einer sicherheitstechnischen Abwägung und vergleichenden Bewertung mittels geologischer Kriterien).

In **Etappe 2** wird eine raumplanerische Beurteilung der in Etappe 1 vorgeschlagenen Standortgebiete vorgenommen und sozioökonomische Studien verfasst. Die Entsorgungspflichtigen erarbeiten Vorschläge zur Anordnung und Ausgestaltung der Oberflächeninfrastruktur, ordnen die untertägigen Teile des Lagers an und wählen pro Standortgebiet mindestens einen Standort. Für diese führen sie quantitative provisorische Sicherheitsanalysen und einen sicherheitstechnischen Vergleich durch, bevor sie für HAA (hochradioaktive Abfälle) und SMA (schwach- und mittelradioaktive Abfälle) je mindestens zwei Standorte vorschlagen (Zweite Anwendung einer sicherheitstechnischen Abwägung und vergleichenden Bewertung auf Basis von provisorischen Sicherheitsanalysen unter Berücksichtigung der Sicherheit und technischen Machbarkeit mit raumplanerischen, wirtschaftlichen und sozioökonomischen Aspekten).

Die Ergebnisse der quantitativen provisorischen Sicherheitsanalysen werden mit der qualitativen Bewertung der übrigen sicherheitstechnischen Kriterien und Aspekte (Etappe 1) zu einer **Gesamtbewertung** zusammengefasst und führen zum Vorschlag der Standorte für HAA- und SMA-Lager.

Bei der Erarbeitung von Standortvorschlägen sind folgende Vorgaben zu beachten /HSK 07/:

- Der Standort muss das Dosis-Schutzziel von 0,1 mSv pro Jahr der Richtlinie R-21 /HSK 93/ erfüllen können.
- Es darf kein Standort vorgeschlagen werden, der aufgrund der provisorischen Sicherheitsanalyse eindeutig als weniger geeignet bewertet ist als die anderen. Andererseits dürfen Standorte nicht aufgrund von Dosisdifferenzen ausgeschlossen werden, die nur durch Ungewissheiten der zugrunde gelegten Daten verursacht werden.
- Die Bewertung und der Vergleich der Standorte haben nach einem standardisierten Vorgehen zu erfolgen.
- Die wirtschaftlichen und sozioökonomischen Aspekte dürfen nur unter sicherheitstechnisch vergleichbaren Standorten für die Auswahl ausschlaggebend sein (Sicherheit hat oberste Priorität).

In **Etappe 3** werden die verbliebenen Standorte im Hinblick auf die Standortwahl und die Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuchs vertieft untersucht und die erforderlichen standortspezifischen geologischen Kenntnisse falls nötig mittels geowissenschaftlicher Untersuchungen vervollständigt (Dritte Anwendung einer sicherheitstechnischen Abwägung). Die Lagerprojekte werden unter Einbezug der Standortregionen konkretisiert und die sozioökonomischen Auswirkungen vertieft untersucht. Die Standortregionen schlagen Projekte zur regionalen Entwicklung vor und erarbeiten Grundlagen für allfällige Kompensationsmaßnahmen sowie für ein Monitoring von sozioökonomischen und ökologischen Auswirkungen. Allfällige Abgeltungen sollen in Etappe 3 ausgehandelt und transparent gemacht werden (Dritte Anwendung einer vergleichenden Bewertung zur Wahl eines Standortvorschlags). Die Entsorgungspflichtigen (Nagra) reichen schlussendlich Rahmenbewilligungsgesuche ein (je eines für HAA und SMA oder eines für ein gemeinsames Lager). Dieses Gesuch muss enthalten:

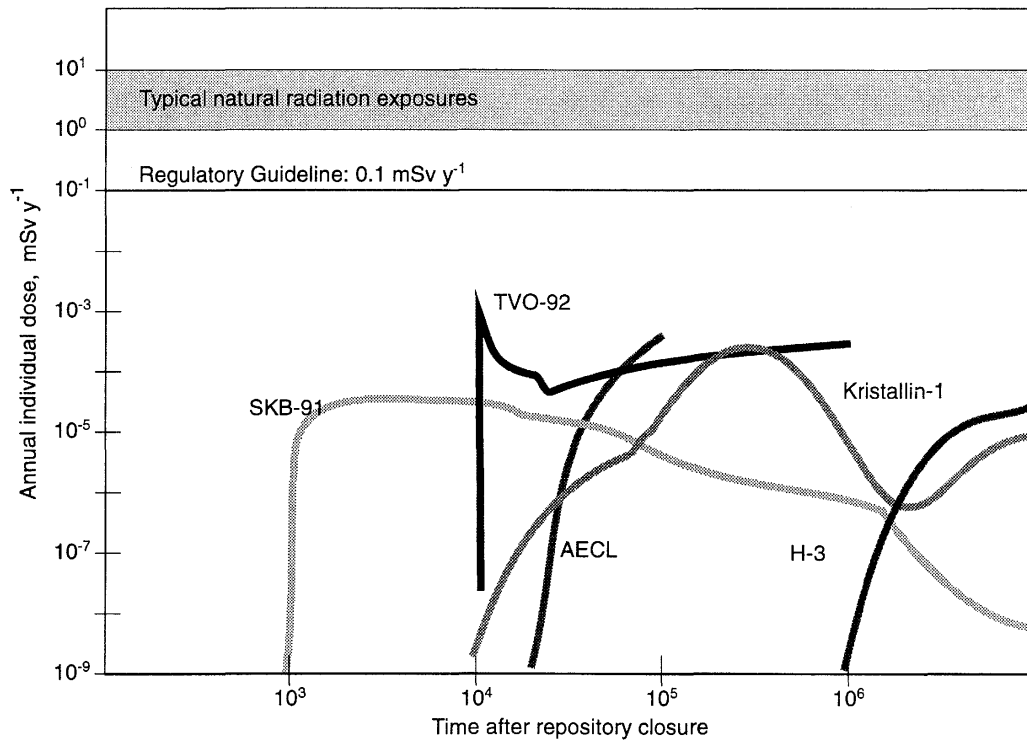
- einen Vergleich der zur Auswahl stehenden Optionen hinsichtlich der Sicherheit des geplanten Tiefenlagers,
- eine Bewertung der für die Auswahl des Standortes ausschlaggebenden Eigenschaften und
- die Höhe der Kosten.

Der Sachplan /BFE 08/ konkretisiert die Methoden für einen Vergleich nicht, benennt aber sicherheitstechnische Kriterien, raumplanerische und sozioökonomische Aspekte, die zu berücksichtigen bzw. zu erfüllen sind.

#### **4.2.1.2 Sicherheitstechnische Abwägungen und vergleichende Bewertungen**

##### **Vor dem Sachplan**

In /NEA 94/ wurde die Kristallin-I Sicherheitsanalyse eines HAA-Endlagers im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz mit anderen gleichartigen HAA-Studien, sowie mit drei weiteren Analysen zur direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente verglichen. Die Basis dieses Vergleichs waren sicherheitstechnische Modellierungen ähnlicher Konzepte in kristallinen Wirtsgesteinen mit einem technischen Fokus auf eine Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre (Abb. 4.3). Die vergleichende Bewertung unter der Annahme einer technischen Umsetzung bezog sich auf die Vor- und Nachteile der sicherheitstechnischen Analysen und einer Einschätzung der sich ergebenden Individualdosis im Vergleich zu anderen radiologischen Umweltrisiken. Die Bewertung zog somit nur radiologische Risiken auf Basis einer rechnerischen Modellierung in Betracht. Aussagen über eine bessere oder schlechtere Eignung anderer Methoden für ein Standortauswahlverfahren können hieraus nicht abgeleitet werden.



**Abb. 4.3** Rechnerische Individualdosen für Referenzfälle SKB-91 /SVE 92/, TVO 92 /VIE 92/, AECL /GOO 94/, Kristallin-I /CUR 94/, H-3 /PNC 92/

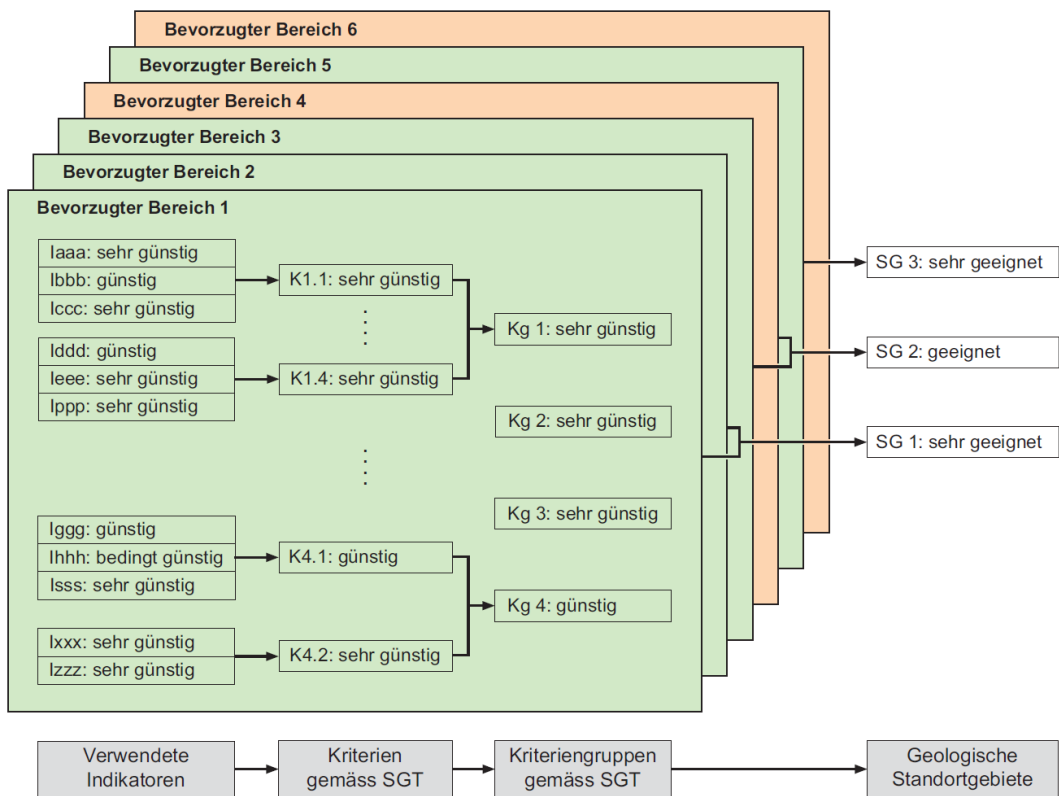
### Sachplanverfahren - Etappe 1

Im November 2008 hat die Nagra für Etappe 1 gemäß SGT /BFE 08/ geologische Standortgebiete für das geologische Tiefenlager für die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle (SMA) und drei für das geologische Tiefenlager für die hochradioaktiven Abfälle (HAA) vorgeschlagen, die unter Berücksichtigung der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit, sowie weiterer Vorgaben erarbeitet wurden /ZUI 08/. Die Erarbeitung dieser Vorschläge erfolgte in fünf Schritten. In den ersten beiden Schritten erfolgten grundlegende konzeptionelle Arbeiten um die Voraussetzung für ein solches Verfahren zu erstellen.

Die Schritte 3 bis 5 umfassten die Evaluation basierend auf der Geologie:

- Im **dritten** Schritt wurde die großräumige geologisch-tektonische Situation evaluiert. Dabei wurden die sicherheitsorientierten Kriterien und Kriteriengruppen z. B. 'Langzeitstabilität' (Indikatoren 'Großräumige Erosion im Betrachtungszeitraum', 'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik', 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)') und das Potenzial für geeignete Wirtgesteinskonfigurationen (Indikatoren 'Laterale Ausdehnung' und 'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse') – d. h. die geologisch-tektonische Komplexität mit Einfluss auf die räumlichen Verhältnisse und ihre Explorierbarkeit – bewertet. Die potenziell wichtigen Indikatoren wurden aus Sicherheitsfunktionen und Prinzipien abgeleitet. Diese Indikatoren wurden hinsichtlich der Sicherheit unterschieden in Merkmale, die unabdingbar sind, einen ausgeprägten Einfluss haben oder für die Charakterisierung notwendig sind. Damit wurde die potenziell möglichen, bevorzugten und prioritären Varianten bestimmt und die weiter zu betrachtenden Großräume eingengt.
- Im **vierten** Schritt wurden innerhalb der zu betrachteten Großräume die bevorzugten Wirtsgesteine ausgewählt. Dies erfolgte ebenfalls in verschiedenen Teilschritten unter Verwendung von Kriterien und den zugehörigen Indikatoren, an die Mindestanforderungen bzw. verschärfte Anforderungen gestellt wurden. Aufgrund der „Variabilität von Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit“ wurden kristalline Wirtsgesteine der betrachteten Großräume nicht als bevorzugtes Wirtsgestein eingestuft. Lediglich das Wirtsgestein „Opalinuston“ wurde in allen Kriterien als günstig bis sehr günstig für ein HAA-Lager eingestuft.
- Im **fünften** Schritt erfolgte die Evaluation der Konfigurationen, d. h. die räumliche Festlegung von geologischen Standortgebieten innerhalb der bevorzugten Wirtsgesteine der betrachteten Großräume. Unter Berücksichtigung der Indikatoren für regionale geologische Elemente (regionale Störungszonen, übertiefte Felsrinnen als Folge der glazialen Tiefenerosion, Zonen mit Anzeichen kleinräumiger tektonischer Zergliederung, konzeptionell zu meidende Zonen (Neotektonik)) wurden in Teilschritten bevorzugte Standortgebiete abgegrenzt, innerhalb derer die bevorzugten Wirtsgesteine in geeigneter Tiefe und Mächtigkeit und in genügender lateraler Ausdehnung vorliegen.

Diese Einengung erfolgte unter Verwendung von Indikatoren für die Kriterien und Kriteriengruppen des SGT mit einer Bewertung in vier Hierarchiestufen (sehr günstig, günstig, bedingt günstig, ungünstig) (Abb. 4.4).

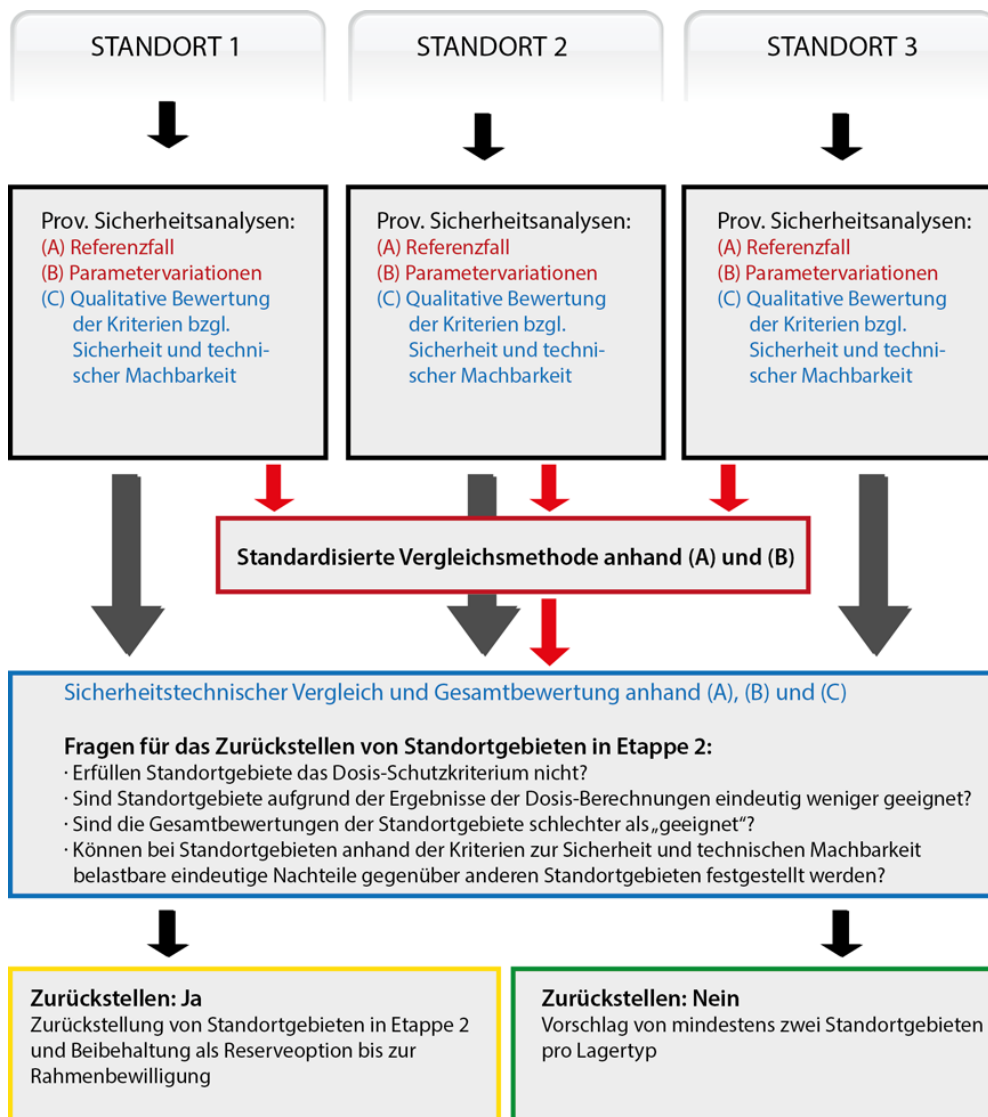


**Abb. 4.4** Schematische Darstellung des Vorgehens bei der zusammenfassenden Bewertung der bevorzugten Bereiche bzw. geologischen Standortgebiete /ZUI 08/ (I)

Damit wird offensichtlich, dass die Auswahl der Indikatoren und deren Aggregation bereits in der ersten Etappe des Sachplans zwar wichtige Bestandteile des Verfahrens zur Auswahl der Standortgebiete und Standorte aufzeigten, jedoch noch keinen sicherheitstechnischen Vergleich von Standorten darstellten.

## Sachplanverfahren - Etappe 2

Die Vorgaben des Sachplans /BFE 08/ und des ENSI /ENSI 13/ fordern provisorische Sicherheitsanalysen und einen sicherheitstechnischen Vergleich mit einer Gesamtbewertung der Standortgebiete (Abb. 4.5).



**Abb. 4.5** Schematischer Ablauf der sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten in Etappe 2 des Sachplans /ENSI 13/

Die in Etappe 2 geforderte provisorische Sicherheitsanalyse soll über die Wirkung und das Verhalten der einzelnen Barrieren nach ordnungsgemäßem Verschluss des geologischen Tiefenlagers Auskunft geben und zeigen, ob die berechneten Dosen unterhalb des Dosis-Schutzkriteriums der Richtlinie ENSI-G03 liegen /ENSI 09/. Numerische Berechnungen sind somit Teil der provisorischen Sicherheitsanalyse für den jeweiligen Standort. Die Ergebnisse dienen dem sicherheitstechnischen Vergleich von Standorten. Die Anforderungen sind in /EID 10/ genannt.



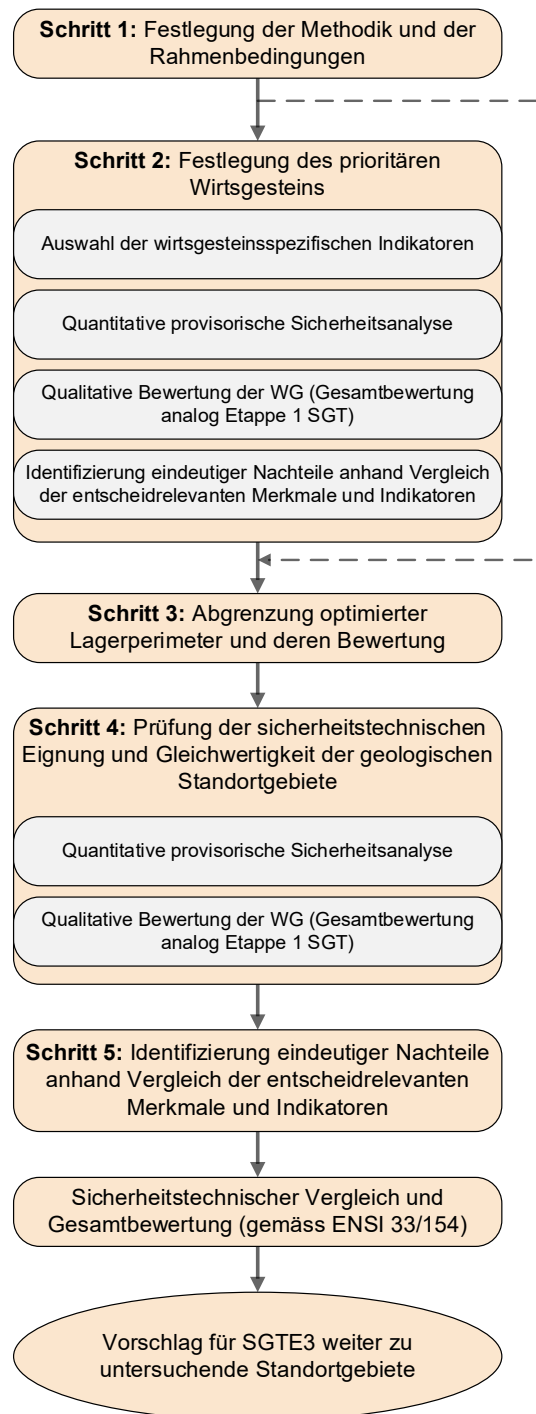
Nach /ZUI 14/ erfolgte der sicherheitstechnische Vergleich mit multikriteriellen Verfahren. Diese wurden von /RÖH 15/ im Rahmen eines Expertenauftrags anhand von Fragestellungen des ENSI beurteilt. Die in /ZUI 14/ für Etappe 2 beschriebenen und angewendeten Verfahren sind:

- Qualitative Bewertung mit **Nutzwertanalyse**: Qualitative Bewertung der Alternativen anhand von Nutzwerten.
- 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.
- **Malus-Bilanzierung**: Identifikation von eindeutigen Nachteilen anhand eines Vergleichs der Bewertungen für die Alternativen mit absoluten Schwellenwerten.

Die Auswahl der potenziellen Standorte erfolgte nach /ZUI 14/ in fünf Schritten (Abb. 4.6).

Im **ersten** Schritt wurde die in Etappe 1 verwendete Methodik an die veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Neben den Vorgaben im Sachplan und den Präzisierungen des ENSI wurden dazu auch die Behördenkommentare zu Etappe 1 und die spezifischen Eigenschaften der in Etappe 1 festgelegten Wirtsgesteine und geologischen Standortgebiete berücksichtigt. Wichtiges Element beim Vorgehen in Etappe 2 war der **Optimierungsgedanke**. Um die Vorschläge gemäß Etappe 1 möglichst gut zu nutzen, erfolgte eine dreistufige Optimierung (Festlegung des prioritären Wirtsgesteins in Standortgebieten mit mehr als einem Wirtsgestein, Abgrenzung von optimierten Lagerperimetern innerhalb der geologischen Standortgebiete, zurückstellen von geologischen Standortgebieten mit eindeutigen Nachteilen, vgl. Schritte 2, 3 und 5).

Im **zweiten** Schritt wurde in denjenigen Standortgebieten für das SMA-Lager mit mehr als einem Wirtsgestein, basierend auf einem **sicherheitstechnischen Vergleich** der Wirtsgesteine, das prioritäre Wirtsgestein in einem Standortgebiet festgelegt, welches für die weiteren Schritte verwendet wird. Für das HAA-Lager entfiel dieser Schritt, da bereits in Etappe 1 der Opalinuston als Wirtsgestein festgelegt wurde. Für das SMA-Lager wurde in diesem Schritt mit Ausnahme des Standortgebiets Wellenberg ebenfalls der Opalinuston als prioritäres Wirtsgestein festgelegt.



**Abb. 4.6** Methodisches Vorgehen zur Bestimmung der Standortgebiete für Etappe 3 (verändert nach /ENSI 17/)

Im **dritten** Schritt wurde innerhalb der in Etappe 1 festgelegten Standortgebiete eine **optimierte** räumliche Konfiguration der prioritären Wirtsgesteine ausgewählt (Abgrenzung von optimierten Lagerperimetern).

Im **vierten** Schritt erfolgte eine Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter, einerseits anhand von Dosisberechnungen (charakteristische Dosisintervalle) und andererseits durch eine qualitative Bewertung anhand der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit gemäß SGT.

Im **fünften** Schritt erfolgten der sicherheitstechnische Vergleich und die vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter anhand der vom ENSI festgelegten „entscheidrelevanten“ Merkmale (Identifikation geologischer Standortgebiete mit eindeutigen Nachteilen).

Der **fünfte** Schritt „Sicherheitstechnischer Vergleich der geologischen Standortgebiete“ ist hier von besonderem Interesse, da verschiedene Methoden zur Aggregation zum Einsatz kamen (Direkter Vergleich der Bewertung, Outranking und Malus-Bilanzierung).

### **Methodisches Vorgehen bei der vergleichenden Bewertung**

Als Grundlage der multikriteriellen Vergleiche diente ein hierarchischer Kriterienkatalog mit 4 bewertungsrelevanten Merkmalen und den zugehörigen Indikatoren. Bei den gemäß der Vorgaben in /ENSI 13/ betrachteten „entscheidrelevanten Merkmale“ handelt es sich um:

- *die Wirksamkeit der geologischen Barriere,*
- *die Langzeitstabilität der geologischen Barriere,*
- *die Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet,*
- *die bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale.*

Für die unterschiedlichen Merkmale wurden verschiedene Indikatoren ausgewiesen.

Zunächst wurde durch die Anwendung einer klassischen Nutzwertanalyse (qualitative Bewertung) die vorhandenen Alternativen bezüglich Sicherheit und Machbarkeit qualitativ bewertet. Es wurde zudem überprüft, ob sie eine Gesamtbewertung von mindestens 'geeignet' aufweisen (siehe Kap. 5.3.2) /ZUI 14/. Den Indikatoren wurden für jedes Standortgebiet Zahlenwerte („Nutzwerte“) auf einer Skala von 1 (ungünstig) bis 5 (sehr

günstig) (in Stufen von 0,2) zugeordnet. Die Indikatoren wurden für die einzelnen Merkmale aggregiert, um so genannte „aggregierte Nutzwerte“ zu erhalten. Anhand der Nutzwerte der Indikatoren und den abgeleiteten aggregierten Nutzwerten, können Hinweise auf eindeutige Nachteile bezüglich der Merkmale hergeleitet werden /RÖH 15/.

Der direkte Vergleich der Bewertungen der Indikatoren wie auch von Merkmalen, wurde zudem als „Stärken-Schwächen-Profil“ dargestellt. Mit dieser Methode sollten für die vorhandenen Alternativen, bezüglich der bewertungsrelevanten Merkmale und Indikatoren, eindeutige Nachteile identifiziert werden. Als Grundlage dient - wie bei der Nutzwertanalyse - der hierarchische Kriterienkatalog mit den zugehörigen Indikatoren. Die Nutzwerte für die bewertungsrelevanten Indikatoren wurden aus der Nutzwertanalyse übernommen /ZUI 14/.

Anschließend wurde mit alternativen Methoden (Outranking-Methode, Malus-Bilanzierung) überprüft, ob weitere Hinweise auf eindeutige oder vertieft zu prüfende Nachteile zu ermitteln sind. Zur Anwendung der Outranking-Methode wurden die Informationen (hierarchischer Kriterienkatalog, Nutzwerte aus der Nutzwertanalyse, Aggregation der Nutzwerte), welche für den „Direkten Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken-Schwächen-Profil“ ermittelt wurden, übernommen. Grundsätzlich wird bei der Durchführung der Outranking-Methode, ein paarweiser Vergleich der Alternativen bezüglich der bewertungsrelevanten Merkmale bzw. Indikatoren durchgeführt. Den einzelnen Indikatoren werden Präferenzwerte (Nutzwerte) zugeordnet. Durch die Bildung von Differenzen der Präferenzwerte und der Anwendung einer Präferenzfunktion erfolgt eine Bewertung. Die 'Outranking-Methode' soll relative Unterschiede zwischen Alternativen aufzeigen und auf Unvergleichbarkeiten hinweisen. Ergeben sich hohe Werte für den Schwäche-Präferenzfluss, wird dies als Hinweis auf eindeutige Nachteile interpretiert /ZUI 14/.

Für die Malus-Bilanzierung wurden ebenfalls die Informationen (hierarchischer Kriterienkatalog, Nutzwerte aus der Nutzwertanalyse, Aggregation der Nutzwerte) aus dem „Direkten Vergleich“ übernommen. Im Zuge der Malus-Bilanzierung erfolgt ein individueller Vergleich der Nutzwerte, für die unterschiedlichen Alternativen, auf der Hierarchiestufe der Merkmale und Indikatoren, mit absoluten Schwellenwerten. Wenn ein Schwellenwert unterschritten wird, ergibt sich ein Malus, welcher der Differenz zwischen Schwellenwert und Nutzwert entspricht. Wenn der Malus für ein Merkmal oder einen Indikator grösser als 0,4 ist (d. h. der Nutzwert liegt um mindestens 0,4 Bewertungspunkte unter dem Schwellenwert) und gibt es eine Vergleichsvariante ohne Malus für das entsprechende

Merkmal oder den Indikator, so wird dies als Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil interpretiert /ZUI 14/.

In der vergleichenden Gesamtbewertung werden auch die Dosisberechnungen und die Kriterien des ENSI einbezogen. Da alle Dosisberechnungen zu Ergebnissen führen, die unterhalb des Schutzkriteriums liegen und auch unterhalb eines verschärften Kriteriums liegen, werden die Standorte alle als sicherheitstechnisch gleichwertig betrachtet. Bereits aufgezeigte eindeutige oder vertieft zu prüfende Nachteile bleiben erhalten.

In der vergleichenden Gesamtbewertung wurde auf weitere Fragen eingegangen, die jedoch die Schlussfolgerungen nicht beeinflussten.

Die Bewertung der 2. Etappe durch das /ENSI 17/ schließt sich grundsätzlich der gewählten Methodik (direkter Vergleich der Bewertungen, Outranking, Malus-Bilanzierung) der Nagra an. Das ENSI hat in eigenen Sicherheitsanalysen ungünstigere Parameterwerte angesetzt, kommt aber dennoch zum Schluss das alle Standortgebiete das Dosiskriterium einhalten und daher entsprechend den Vorgaben als sicherheitstechnisch gleichwertig zu betrachten sind. Auch die qualitative Bewertung von Standortparametern führt zu keinen Unterschieden. Jedoch teilt ENSI nicht die Ergebnisse der Nagra hinsichtlich eindeutiger Nachteile für ein HAA-Lager bei der Anwendung der Verfahren der Outranking- und Malus-Bilanzierung, da einige Annahmen als nicht belastbar eingestuft werden.

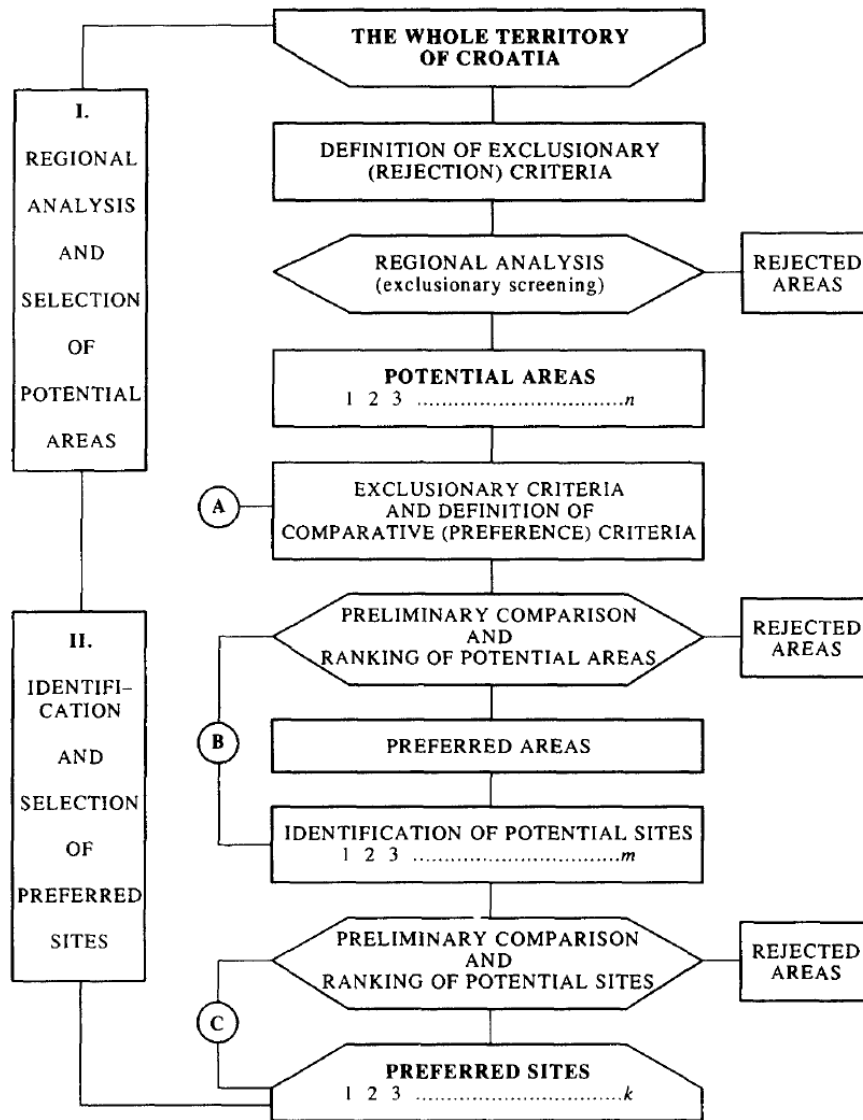
### **Sachplanverfahren - Etappe 3**

Die Etappe 3 beinhaltet vertiefte Untersuchungen der vorgeschlagenen Standortgebiete. Anhand der Resultate der geowissenschaftlichen Untersuchungen und eines sicherheitstechnischen Vergleichs erfolgt die Wahl des Standortgebiets. Die Etappe 3 wurde in 2018 gestartet /ENSI 18/. Der Vergleich der Standortgebiete muss gemäß den im Sachplan festgelegten sicherheitstechnischen Kriterien und den durch das ENSI präzisierten Anforderungen vorgenommen werden. Die Wahl einer Methode ist bisher nicht erfolgt.

#### **4.2.2 Kroatien**

In /PET 97/ wird ein Verfahren zur Identifizierung und Einstufung potenzieller Standorte für schwach und mittelradioaktive-Entsorgungseinrichtungen in Kroatien beschrieben.

Es werden vorläufige Ergebnisse der letzten Phase der Standortuntersuchung vorgestellt, d. h. vorläufiger Vergleich und Rangfolge potenzieller Standorte. Die Abb. 4.7 zeigt den schematischen Ablauf des Verfahrens.



**Abb. 4.7** Darstellung des Verfahrensablaufs nach /PET 97/

In der ersten Phase des Verfahrens wurden auf das gesamte kroatische Hoheitsgebiet Ausschlusskriterien angewendet. Bereiche, für die mindestens ein Merkmal zutraf, wurden abgelehnt. Anschließend wurden vergleichende Präferenzkriterien formuliert und auf die verbliebenen Gebiete angewendet, um potenzielle Standorte zu identifizieren. Dieselben Kriterien, jedoch mit detaillierteren Daten und Untersuchungen, wurden auch für das Ranking potenzieller Standorte angewendet. Die Vergleichskriterien wurden unter denselben Gesichtspunkten wie die Ausschlusskriterien formuliert, d. h. technische

Aspekte, sicherheitsbezogene Aspekte, Umweltauswirkungen und Akzeptanz im näheren und im weiteren Standortbereich.

Die vorläufige Rangfolge der Standorte wurde auf der Grundlage von Vergleichspräferenzkriterien durch die multikriterielle Methode PROMETHEE erstellt. Das Hauptmerkmal dieser multikriteriellen Methode ist der paarweise Vergleich von Alternativen mithilfe von Präferenzfunktionen, die für jedes Kriterium definiert werden.

Die relative Bedeutung eines bestimmten Kriteriums wird durch die Zuweisung eines Gewichtungsfaktors ausgedrückt. Die Werte der Gewichtungsfaktoren wurden nach einer heuristischen Bewertungsmethode, auf der Grundlage der Entscheidungen eines Expertenteams geschätzt. Hieraus wurde eine Rangliste aller Kriterien erstellt.

Die Skalierung der Gewichtungsfaktoren erfolgt in Prozent. Der Schwerpunkt der Gewichtung liegt auf sicherheits-spezifischen Kriterien des LILRW-Endlagers (30 %) und seiner näheren Umgebung (52,5 %). Die Akzeptanz in einem größeren Umfeld wurde mit einem Gewichtungsfaktor von 9,5 % bewertet, da davon ausgegangen wurde, dass das LILRW-Endlager fast keine Auswirkungen auf die größere Umgebung um den Standort hat. Ebenso wurde die Bedeutung der technischen Aspekte auf nur 8 % geschätzt, da davon ausgegangen wurde, dass das Endlager keine komplexen baulichen Eingriffe erfordern würde. Im Rahmen der Kriterienbewertung schlug der Autor vor, die Definition von Gewichtungsfaktoren und das Ranking von Kriterien nach dem mathematischen Algorithmus der AHP-Methode (Analytic Hierarchy Process) vorzunehmen. Das Expertenteam akzeptierte diesen Vorschlag jedoch nicht und war der Ansicht, dass in dem betrachteten Fall eine heuristische Bewertung der Kriterien durch das Expertenteam angemessener wäre.

#### **4.2.3 Sonstige Länder**

Im Folgenden sind weitere Länder aufgeführt, in denen eine Standortsuche durchgeführt wurde oder wird. Informationen ob Abwägungen oder vergleichende Bewertungen im Zuge der Standortsuche durchgeführt werden/wurden sind nicht verfügbar bzw. die Recherche führte nicht zu eindeutigen Ergebnissen. Die recherchierten Informationen sind trotzdem aufgeführt.

#### 4.2.3.1 Schweden/Finnland

In Schweden wurden in den 1980 und 1990er Jahren von der SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) verschiedene Ansätze zur Auswahl eines Standortes zur Endlagerung abgebrannter Brennelemente verfolgt. Diese führten nicht zu einem Erfolg. Im Jahr 1992 wurde ein neuer Anlauf gestartet. Das Verfahren sollte Machbarkeitsstudien und geologische Voruntersuchungen potentieller Standorte ausschließlich im Wirtsgestein Kristallin beinhalten. Entscheidend für die Auswahl der potenziellen Standorte war insbesondere die Akzeptanz in der Bevölkerung /APP 09/.

Zu diesem Zweck wurden zunächst alle schwedischen Kommunen gezielt darauf angesprochen, ob sie bereit wären, die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers auf ihrem Gebiet zuzulassen. Aus den Rückmeldungen wurden acht schwedische Kommunen ausgewählt, in denen Machbarkeitsstudien (auf Basis verfügbarer Informationen) zur Errichtung eines Endlagers durchgeführt wurden. Sechs der beteiligten Kommunen lehnten eine weitere Beteiligung an dem Verfahren ab. Seit dem Jahr 2002 konzentrieren sich die Untersuchungen auf die zwei Kommunen Östhammar und Oskarshamn mit den Standorten (bzw. Teilgebieten von Standorten) Forsmark (Östhammar) sowie Laxemar und Simpevarp (Oskarshamn) /APP 09/.

Nach /APP 09/ erfolgten an den Standorten Östhammar und Oskarshamn für die abschließende Standortfestlegung und die genehmigungsrelevante Bewertung der Langzeitsicherheit, Standortuntersuchungen in zwei Phasen (/SKB 00/):

- Durch die Ergebnisse der Erstuntersuchung der Standorte (Initial Site Investigation) wurden die Ergebnisse der Machbarkeitsstudien überprüft. Zudem dienten sie der Identifizierung des für die Errichtung des Endlagers am besten geeignet erscheinenden und damit besonders untersuchungswürdigen Teilbereichs im größeren Standortareal. Die Erstuntersuchungen lieferten zudem wesentliche Informationen für die sogenannte vorläufige Sicherheitsbeurteilung (Preliminary Safety Evaluation - PSE) eines Standortes. Auf dieser Grundlage wurde entschieden, ob die Untersuchung des jeweiligen Standortes fortgesetzt wird oder zugunsten eines anderen aufgegeben wird (/HED 03/).
- In einer vollständigen Standortuntersuchung (Complete Site Investigation) wurden die Informationen für die abschließende Standortfestlegung, für die Sicherheitsbewertung (Safety Assessment) und für die Erarbeitung der Antragsunterlagen für die Standortgenehmigung erhoben.



Im Juni 2009 entschied sich die SKB für den Standort Forsmark aufgrund einer besseren Wärmeleitfähigkeit (Abführung der Zerfallswärme), einer höheren Dichte und geringeren Klüftigkeit (geringerer Wassereintrag) der Gesteine als am Standort Oskarshamn. Im März 2011 reichte die SKB den Antrag zur Errichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle am Standort Forsmark bei den schwedischen Aufsichtsbehörden ein /KOM 16/.

Die letztendliche Festlegung auf den Standort Forsmark beruhte auf geowissenschaftlichen Kriterien /SKB 11/. Es gibt keine Informationen, ob ein sicherheitstechnischer Vergleich der untersuchten Standorte mit dem Ziel der abschließenden Standortfestlegung durchgeführt wurde. Eine Genehmigung wurde bis zum heutigen Zeitpunkt nicht erteilt.

In Finnland gelten ähnliche geologische Randbedingungen bezogen auf das Wirtsgestein, wie für die Standortsuche in Schweden. In Finnland wurde ebenfalls nur Kristallin-gestein zur Erstellung eines Endlagers berücksichtigt. In den Jahren 1993 bis 2000 wurden vier potenzielle Standorte sowohl übertägig als auch untertätig mit Bohrungen detailliert erkundet, darunter die beiden Kernkraftwerksstandorte Loviisa und Olkiluoto. Alle vier Standorte erwiesen sich als grundsätzlich geeignet. Letztendlich wurde vom Antragsteller Posiva Oy der Standort Olkiluoto ausgewählt. Als Grund wird die Minimierung der erforderlichen Abfalltransporte genannt /KOM 16/. Es gibt keine Informationen, ob ein sicherheitstechnischer Vergleich der untersuchten Standorte mit dem Ziel der abschließenden Standortfestlegung durchgeführt wurde. Im November 2015 wurde der Bau eines Endlagers in Olkiluoto genehmigt.

#### **4.2.3.2 Frankreich**

Die historische Standortsuche in Frankreich ist kurzgefasst in /CNE 95/ dargestellt. Die ersten Bewertungen von Ton-, Schiefer-, Salz- und Granitvorkommen in Bezug auf ihre Eignung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, erfolgten in Frankreich bereits in den 1970er Jahren. Da in Frankreich nur wenige, flach lagernde Salzvorkommen existieren, die entweder nicht den geforderten Kriterien entsprechen oder die wirtschaftlich genutzt werden sollten, wurde Steinsalz zunächst als Wirtsgestein ausgeschlossen.

Ein weiterer Schritt wurde auf Empfehlung der Castaing-Kommission (1982-1984) unternommen, der es notwendig erschien auch andere geologische Formationen als Granit zu untersuchen (Tone, Schiefer, Steinsalz). Bei salzhaltigen Formationen wünschte die

Kommission eine detaillierte Vorstudie über die Folgen des unbeabsichtigten menschlichen Eingriffs auf die Lagersicherheit, die vor der Prüfung dieser Formation durchgeführt werden sollte. Daraufhin beauftragte die Regierung die ANDRA 1987 mit der Durchführung eines Forschungsprogramms an vier potenziellen Standorten in den Departements Ain, Aisne, Maine-et-Loire und Deux-Sèvres. Diese Standorte enthalten Salz-, Ton-, Schiefer- und Granitformationen. Nach teilweise heftigem Widerstand der Bewohner dieser Regionen gegen diese Projekte beschloss die Regierung 1989, ein Moratorium zu verkünden, und wies Christian Bataille an, der Regierung eine umfassende Politik der Entsorgung radioaktiver Abfälle vorzuschlagen. Der Vorschlag und die Schlussfolgerungen wurden von Bataille in einem Bericht dokumentiert. Dessen Vorschlag wurde in einem Gesetzentwurf vom 30. Dezember 1991 umgesetzt /FRA 91/ und ein neues Standortauswahlverfahren initiiert.

Die Regierung beauftragte Christian Bataille mit einer Vermittlungsmission, die zur Auswahl von 4 potenziellen Lagerstätten in den Departements Maas, Haute Marne, Gard und Vienne führte. ANDRA war verantwortlich für die Untersuchung dieser 4 Standorte. Die ersten drei Standorte hatten Tonformationen und der vierte Standort Granitgestein unter einer sedimentären Überdeckung.

Die Empfehlungen der Goguel-Kommission von 1987, die die Kriterien benannte, die eine geologische Formation an einem bestimmten Standort erfüllen muss, um die Eindämmung der Radioaktivität sicherstellen zu können, wurden von der Regierung bei der Auswahl der vier oben genannten Standorte teilweise berücksichtigt.

Auch die Kommission /CNE 95/ verwies auf Kriterien für die Bewertung potenzieller Lagerstätten. Die Qualifikation eines Standorts, die Radioaktivität von Abfällen einzuschließen, sollte durch eine gründliche Analyse des vorhersehbaren Verhaltens des Standorts und der über einen sehr langen Zeitraum (zehn oder hunderttausende von Jahrtausenden) enthaltenen Abfälle erfolgen, die sogenannte "Sicherheitsanalyse". Dieser Ansatz hat wichtige Konsequenzen:

1. Eine solche Analyse ist standortspezifisch und kann nur diesen qualifizieren. Die Arbeit von ANDRA in Frankreich zielte darauf ab zwei mögliche Standorte qualifizieren und nicht geologische Formationen zu vergleichen. Die erzielten Ergebnisse sind daher nicht oder nur sehr moderat auf andere Standorte übertragbar.
2. Die Analyse musste das gesamte System umfassen (Abfallgebirge + technische Barrieren + natürliche geologische Barrieren), wobei Störungen und das Vorhandensein von Abfällen zu berücksichtigen sind. Daher musste die Standortfindung parallel zur Definition von Abfallgebirgen und technischen Barrieren sowie zur Gesamtkonzeption des Endlagers erfolgen. Es war klar, dass jede dieser drei Komponenten des Systems die Wahl der beiden anderen beeinflusst.
3. Da die Sicherheitsanalyse in die Zukunft projiziert wird, ist es notwendig, Annahmen (oder Versuche zur Vorhersage) über die Entwicklung des Gesamtsystems zu treffen.

ANDRA untersuchte entsprechend der Sicherheitsrichtlinie RFS N°III.2.f /ASN 08/ die Tongesteinsstandorte und einen Granitstandort. Das Kristallingestein wurde ausgeschlossen, da einerseits keine Einigung über die Führung des Langzeitsicherheitsnachweis für die ausgewiesenen Gebiete erreicht werden konnte /BOL 11/, wegen der möglichen hydrogeologischen Bedeutung von Klüften und andererseits wegen Bevölkerungsprotesten.

Folgende Meilensteine kennzeichnen das weitere Auswahlverfahren in Frankreich /BOL 11/:

- mögliche Standortregionen wurden im Konsens mit den Departements auf Freiwilligkeitsbasis gesucht,
- 1994 wurden anhand der bereits vorliegenden Daten ohne spezielle Standortuntersuchungen vier potenzielle Standortgebiete im Tongestein aus den jeweiligen Standortregionen ausgewählt (siehe oben),
- zwischen 1994 und 1996 wurden umfangreiche Voruntersuchungen in den Standortgebieten durchgeführt,
- im Dezember 1998 erfolgte nach Auswertung der geowissenschaftlichen Untersuchungen, der vorläufigen Endlagerkonzepte und erster Sicherheitsanalysen die politische Entscheidung für jurassische Tongesteine am östlichen Rand des Pariser Beckens (Standortregion Meuse/Haute Marne),
- nahe dem Dorf Bure wurde 2000 ein Untertagelabor zur untertägigen Erkundung der Wirtsgesteinseigenschaften und zur Optimierung bzw. Erprobung des Endlagerkonzeptes errichtet und die Endlagerung im Tonstein verfolgt (siehe Dossier 2005 Argile: /AND 05a/, /AND 05b/),
- ASN (Autorité de sûreté nucléaire) veröffentlichte eine Sicherheitsrichtlinie über die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Lagern im Februar 2008 /BOD 08/, die an die Standortauswahlkriterien der Sicherheitsrichtlinie /ASN 08/ angelehnt ist. Dieses Dokument definierte die Ziele nach Beginn der Standorterkundung,
- Die in 2009 und 2010 erstellten Berichte der ANDRA wurden von ASN und IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) bewertet /ASN 10/, /IRSN 12/ und die Ergänzungen für die Einreichung eines Genehmigungsantrags benannt /ASN 13/, /IRSN 13/,
- Die ANDRA reichte im Jahr 2016 die Sicherheitsberichte zum Betrieb, Verschluss und Rückholbarkeit bei ASN und IRSN ein,
- Das Genehmigungsverfahren startete 2017.

Zusammenfassend ist in Frankreich daher kein Vergleich von Standorten erfolgt, sondern der Nachweis, dass der im politischen Prozess gewählte Standort sicherheitstechnisch geeignet und machbar ist.

#### **4.2.3.3 Kanada**

Das Standortauswahlverfahren wird von der Nuclear Waste Management Organisation (NWMO) betrieben. Das in /NWMO 10/ beschriebene Prinzip beruht auf der Freiwilligkeit der Landkreise sich gegebenenfalls für einen Endlagerstandort zur Verfügung zu stellen. Voraussetzung ist, dass der jeweilige Standort nach allen geltenden Regelwerken hinsichtlich Gesundheit, Sicherung und Sicherheit für Mensch und Umwelt sicherheitstechnisch geeignet ist. Das NWMO wählt dann den bevorzugten Standort aus den Landkreisen aus, die geeignete Standorte aufweisen und schließt eine vertragliche Vereinbarung und startet das Genehmigungsverfahren. Das Verfahren sieht daher keinen sicherheitstechnischen Vergleich von Standorten vor, sofern diese der Mindestanforderung einer sicherheitstechnischen Eignung genügen.

Es werden von /NWMO 10/ weitere Kriterien genannt:

- mögliche soziale, wirtschaftliche und kulturelle Auswirkungen,
- Entwicklungsmöglichkeiten des Landkreises,
- Umweltauswirkungen,
- Infrastruktur und Transporte.

Diese sollen ebenfalls für die Auswahl eines Standorts berücksichtigt werden. Ein methodisches Verfahren zur Auswahl ist derzeit den Autoren nicht bekannt.

#### **4.2.3.4 USA**

Die DOE-Richtlinien zur Standortauswahl eines Endlagers für abgebrannte Brennelemente<sup>7</sup> wurden 1983 erstellt und 1984 als 10 CFR 960 veröffentlicht /DOE 16/. Diese

---

<sup>7</sup> In den USA wurde der WIPP-Standort vom DOE (Department of Energy) zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen aus der militärischen Nutzung ausgewählt und ein Sicherheitsnachweis gegenüber der Environmental Protection Agency (EPA) geführt. Es gab keinen öffentlich diskutierten Vergleich von Alternativen im Vorfeld der Entscheidung.

Standortauswahlkriterien qualifizieren nach günstigen, potenziell ungünstigen und ungünstigen Bedingungen, um eine relative Rangordnung für mehrere Standorte zu erhalten. Als Ausgangspunkt für die Kriterien diente die Erfahrung bei der Suche nach geeigneten Lagerstätten in Salzgestein. Eine Ergänzung um weitere Kriterien erfolgte, um andere Gesteine entsprechend der Richtlinie berücksichtigen zu können. Schließlich wurden die Kriterien für eine Gesetzgebung einer öffentlichen Überprüfung durch Staatsvertreter und anderen unterzogen /REC 14/.

Während die Richtlinie noch entwickelt wurde, führte das DOE bereits eine Standortauswahl durch. Neun Standorte, die verwaltungstechnisch in einem früheren Verfahren gefunden worden waren, wurden 1983 dafür in die engere Auswahl genommen. Ende 1984 gab das DOE die Entwürfe der Umweltverträglichkeitsprüfungen für alle Standorte heraus. Da entsprechend der entwickelten Richtlinie Standorte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen vorgeschlagen werden mussten /DOE 16/, wurden fünf Standorte für die weitere Erkundung ausgewählt: Davis Canyon, Utah; Deaf Smith, Texas; Richton Dome, Mississippi (jeweils Salzgestein); Hanford, Washington (Basaltgestein); Yucca Mountain, Nevada (Tuffgestein). Eine erste Ranganalyse wies Yucca Mountain, Deaf Smith und Hanford als bevorzugte Standorte aus. Eine weitere Multi-Attribut Analyse (Nutzwertanalyse mit dem Ziel ungünstige Auswirkungen zu minimieren) ergab 1986 als Rangfolge, wobei alle Standorte bei nur kleinen Abweichungen als sehr gut geeignet eingestuft wurden: Yucca Mountain, Richton Dome, Deaf Smith, Davis Canyon und Hanford /MER 87/. Diese Rangfolge entsprach auch der Rangfolge der geschätzten Gesamtkosten. Die Multi-Attribut Analyse wurde DOE als Entscheidungshilfe anempfohlen, obwohl nicht alle Faktoren und Zusammenhänge berücksichtigt werden konnten. Im Dezember 1987 entschied der US-Congress, dass der Standort Yucca Mountain weiter charakterisiert werden sollte. Derzeit ist das weitere Genehmigungsverfahren für Yucca Mountain aus politischen Gründen ausgesetzt.

In /NWT 15/ sind Empfehlungen zum weiteren Standortauswahlverfahren aufgeführt. Ausschlusskriterien, wirtsgesteinsspezifische und -übergreifende Kriterien werden als erforderlich angesehen. Empfehlungen für einen konkreten Vergleich- und Abwägungsprozess werden nicht gegeben.

#### 4.2.3.5 Japan

In Japan soll durch ein kriterienbasiertes, schrittweises Standortauswahlverfahren ein Standort zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen gefunden werden. Zunächst sollen Auswahlkriterien zur Identifizierung potenzieller Endlagerbereiche entwickelt werden. Durch die Anwendung der Kriterien in einem bundesweiten Screening-Verfahren plante das japanische Wirtschaftsministerium (METI) im Jahr 2016

- a) potenziell weniger geeignete Gebiete,
- b) potenziell geeignete Gebiete und
- c) potenziell besser geeignete Gebiete

zu ermitteln /OEC 16/. Die Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO) ist verantwortlich für die Standortsuche, die Erstellung und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers für hochradioaktive Abfälle in Japan. Für das Standortauswahlverfahren wurde zunächst ein „Freiwilligenprozess“ initiiert, wobei lokale Gemeinden aufgefordert wurden, sich freiwillig als potenzielle Standorte für ein Endlager zu melden. Zudem werden Standorte berücksichtigt, welche günstige stabile tektonische Bedingungen aufweisen /NUMO 13/, /CHA 12/.

Die Standortcharakterisierung umfasst erste Literaturrecherchen (LS), übertägige Voruntersuchungen (Preliminary Investigation Areas, PIAs) und detaillierte Untersuchungen (Detailed Investigation Areas, DIAs) sowohl an der Oberfläche als auch im Untergrund (Abb. 4.8). Zuletzt erfolgt die Untersuchung und Festlegung auf ein Endlager (Repository Site, RS). Vor den Felduntersuchungen wird NUMO eine detaillierte literaturbasierte Bewertung der Eignung für die Zulassung der Standorte als vorläufige Untersuchungsgebiete (PIAs) durchführen. Zur vorläufigen Bewertung der Untersuchungsgebiete wurden landesweite „Evaluation Factors for Qualification“ (EFQs) auf die Standorte angewendet /NUMO 04/. Die Kriterien sollen eindeutig ungeeignete Standorte aus der Betrachtung ausschließen. Sie können jedoch nicht garantieren, dass das Risiko einer tektonischen Gefährdung für einen ausgewählten PIA in den nächsten Zehntausenden von Jahren akzeptabel ist. Die EFQs waren nur als vorläufige Screening-Richtlinien gedacht, um zu verhindern, dass offensichtlich ungeeignete Kandidaten in den Auswahlprozess aufgenommen werden /CHA 17/.

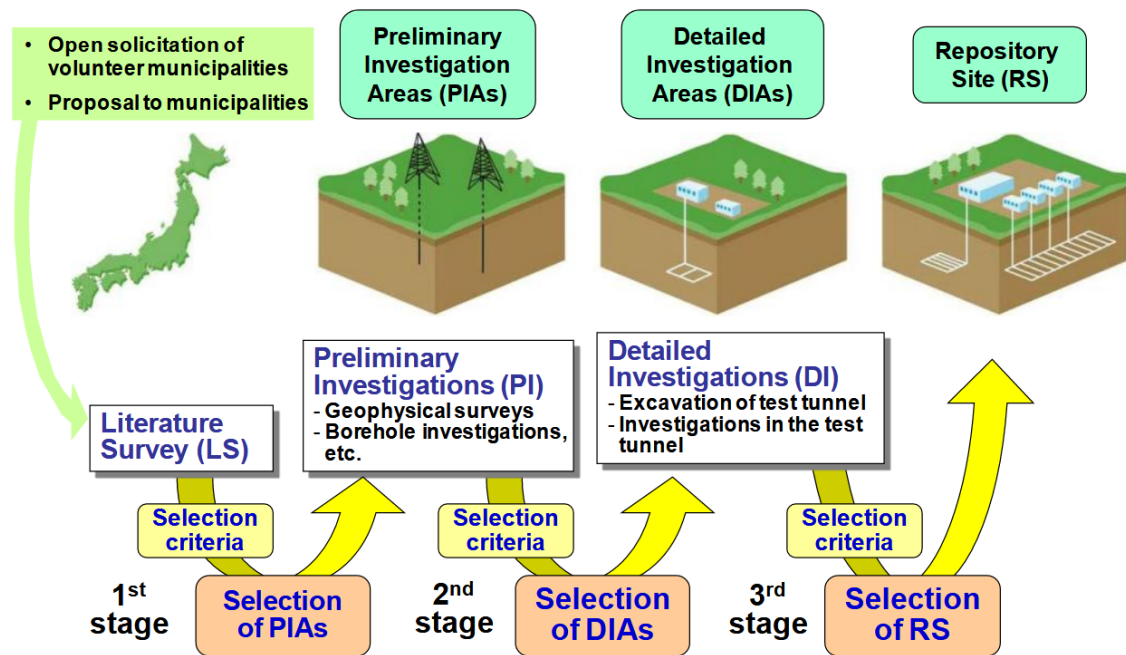


Abb. 4.8 Überblick über die einzelnen Schritte der Standortsuche /CHA 17/

Da Japan in einer tektonisch sehr aktiven Region am so genannten pazifischen "Feuer-ring" liegt, ist ein wesentlicher Aspekt der Standortsuche die Berücksichtigung der Anfälligkeit eines Standorts für zukünftige tektonisch getriebene Prozesse und Ereignisse. Bei der Bewertung der Endlagersicherheit liegt der Schwerpunkt vor allem auf langfristigen tektonischen Prozessen. Insbesondere wird berücksichtigt, inwieweit sich Vulkan- und Gesteinsdeformationen langfristig auf ein Endlager auswirken können.

Die NUMO erkannte, dass eine Integration zusätzlicher, weiterentwickelter und für die spezifischen Bedingungen Japans angepasste Techniken erforderlich sind, um Standorte, die den EFQ-Test bestehen, vertiefter bewerten zu können. Das ITM-Projekt (International Tectonics Meeting) entwickelte eine Methodik (die „ITM-Methodik“) auf der Grundlage international angewandter Ansätze /CHA 09/, mit der die Wahrscheinlichkeit und die möglichen Auswirkungen tektonischer Ereignisse und Prozesse bewertet werden können. Die ITM-Methodik ist ein probabilistischer Ansatz, um den Ungewissheiten bei der Vorhersage möglicher Risiken (Prozesse oder Ereignisse, die zu nachteiligen Auswirkungen führen könnten) bewerten zu können. Die räumliche Verteilung, der Zeitpunkt, die Intensität und die Art von tektonischen Ereignissen werden berücksichtigt.

Es wird zwar in /CHA 17/ erwähnt, dass ein Vergleich von Standorten durchgeführt werden soll. Die entwickelten Methoden machen jedoch zunächst „nur“ Aussagen zur Cha-



rakterisierung von Regionen und Standorten. Wie ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse methodisch durchgeführt werden soll, wird aus den gesichteten Unterlagen nicht ersichtlich.

#### **4.3 Bewertungsmethoden in anderen Themenbereichen**

Die Standortsuche bzw. das Problem zwischen verschiedenen Handlungsalternativen die „bestmögliche“ Entscheidung zu treffen, betrifft nicht nur die Endlagerung radioaktiver Abfälle, sondern auch viele andere Themenkomplexe. Aufgrund der Vielzahl an Methoden, deren Abwandlungen und deren potentieller Einsatzzwecke, wurden bereits mehrere Literaturreviews zur Anwendungsmöglichkeit multikriterieller Verfahren durchgeführt. Zum Beispiel wurde in /BEH 10/ eine Literaturrecherche zur Anwendung einer multikriteriellen Methode namens PROMETHEE (vgl. Kap. 5.4.1) durchgeführt (Stand 2007). Es wurden 195 Literaturstellen ausgewertet, welche in die folgenden neun Themenfelder eingeordnet wurden:

1. Umweltmanagement (insbesondere Nachhaltige Wasserressourcenplanung, Bewertung von Wassermanagementstrategien und Bewässerungsplanung),
2. Hydrologie und Wassermanagement (insbesondere Abfallmanagement, Life Cycle Assessment (LCA) bzw. Ökobilanz, Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) und Flächennutzungsplanung),
3. Geschäfts- und Finanzmanagement,
4. Chemie,
5. Logistik und Transportwesen,
6. Fertigung und Montage,
7. Energiemanagement,
8. Soziales und
9. andere Themen (Medizin, Landwirtschaft, Bildung, Design, Regierung und Sport).

Die Vielzahl an Themenkomplexen zeigt die universelle Anwendbarkeit multikriterieller Verfahren und speziell der PROMETHEE Methode. Im Folgenden werden weitere beispielhafte Vorhaben aus verschiedenen Themenkomplexen beschrieben.

#### 4.3.1 Standortsuche für Deponien

Das Standortsuchverfahren für Deponiestandorte erfolgt in Deutschland nach länderspezifischen Vorgaben /APP 09/. Es gibt einige übergeordnete Richtlinien mit Anforderungen, die bei der Standortsuche zu beachten sind. Diese Richtlinien stellen ein Gerüst für die Standortsuche dar, indem sie (grobe) Kriterien - insbesondere für die Untergrundverhältnisse - vorgeben. Zudem haben die Bundesländer Merkblätter, Hinweise, Empfehlungen u. ä. herausgegeben, in denen die Vorgehensweise und die zu berücksichtigenden Kriterien bei der Standortsuche festgelegt werden. Die oben genannten Unterlagen weisen folgende gemeinsame Merkmale auf /APP 09/:

- Festlegung der Verfahrensstruktur, Kriterien und sonstiger Bewertungsgrundlagen vor Beginn des Suchverfahrens.
- Das gesamte Entsorgungsgebiet wird flächendeckend berücksichtigt.
- Die Verfahren sind meist in drei Phasen unterteilt:
  - a) Bewertung der Untersuchungsräume unter Einsatz von Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen u. ä.,
  - b) standortbezogene Detailprüfung,
  - c) vergleichende Bewertung der verbliebenen Standorte mittels Abwägungskriterien zur Identifizierung des/der Standorte(s) mit der höchsten Priorität.

Um den potenziell „besten“ Deponiestandort aus vielen Möglichkeiten zu identifizieren, müssen Standorte einer vergleichenden Bewertung unterzogen werden. Hierzu können die Vor- und Nachteile der einzelnen Standorte unter Einhaltung einer einheitlichen und nachvollziehbaren Vorgehensweise bewertet und untereinander verglichen werden. Für die vergleichende Bewertung wird in der Regel die mögliche (negative) Beeinflussung von Schutzgütern (Mensch, Wasser, Boden, Luft usw.) und (konkurrierende) Nutzungen sowie die Einhaltung von (quantitativen) Schutzziele berücksichtigt.

Nach /APP 09/ wurden bei der vergleichenden Bewertung von Deponiestandorten fast ausschließlich folgende Methoden eingesetzt:

- Die Nutzwertanalyse (s. Kap. 5.3.2) oder
- Die verbal-argumentative Methode (s. Kap. 5.5.1).
- Die ökologische Risikoanalyse (s. Kap. 5.5.4) wird im Zusammenhang mit Arbeiten zur Umweltverträglichkeitsprüfung für Deponien vereinzelt angewendet.

Sicherheitsuntersuchungen bzw. sicherheitsanalytische Überlegungen und Modellbildungen waren und sind bei der Standortsuche für konventionelle Deponien von nachrangiger Bedeutung /APP 09/.

In /DEM 14/ wurde eine Literaturrecherche zur Anwendung von MCDA-Verfahren (engl. Multiple-criteria decision analysis, siehe Kap. 5) mit geografischen Informationssystemen (GIS) zur Standortsuche für Deponien durchgeführt. GIS-basierte MCDA ermöglichen die Einbeziehung von Zielkonflikten und Präferenzen von Entscheidungsträgern in räumliche Entscheidungsmodelle. Der Bericht beschreibt die Kriterien und Methoden, die bei der GIS-basierten Standortanalyse für Deponien angewendet werden können. Es wurden 36 Artikel ausgewertet, in denen die Bewertung von Deponiestandorten unter Verwendung von MCDA-Methoden (vgl. Kap. 5.2) durchgeführt wurde. Der Bericht konzentriert sich auf die Überprüfung von Kriterien, die in den verschiedenen Entscheidungsmodellen angewendet wurden.

Der Begriff „Entscheidungsregel“ wird in der MCDA verwendet, um den Prozess zu beschreiben, der die Aggregation der Kriterienausprägungen ermöglicht, um die Einstufung von Alternativen zu ermöglichen. Die Methode der gewichteten linearen Kombination (WLC) ist aufgrund der Einfachheit des additiven Gewichtsmodells der beliebteste Ansatz zur GIS-basierten Anwendung. WLC ermöglicht die vollständige Kompensation zwischen Kriterienausprägungen. Wenn Nutzfunktionen zur Standardisierung verwendet werden, wird die Methode als räumliches MAUT (Multi attribute Utility Theory) bezeichnet.

Der geordnete gewichtete Durchschnitt (OWA) ist ein weiterer Ansatz, der in der GIS-basierten Standortauswahl angewendet wurde. Die OWA-Methode liefert ein Erweiterungsprinzip der booleschen Überlagerungen und gewichteten Summationsansätze. In der Literatur zur Standortauswahl für Deponien werden keine Outranking-Methoden (vgl.

Kap. 5.4) wie ELECTRE und PROMETHEE angeführt, da ihre Implementierung in GIS mit Problemen verbunden sind.

In der Literatur wurde zudem eine Vielzahl von Verfahren zur Ermittlung von Kriterien-gewichten einschließlich Verhältnis- und Swing-Gewichten vorgeschlagen. Gleichge-wichtung, Verhältnisskalengewichtung und die Methode der analytischen Hierarchie (AHP, vgl. Kap. 5.3.3) monopolisieren jedoch die ausgewertete Literatur in /DEM 14/.

#### **4.3.2 Bewertung von Strategien im dynamischen Verkehrsmanagement**

In der Dissertation von /FOR 15/ werden Methoden zur Bewertung von Strategien im dynamischen Verkehrsmanagement dargestellt und bewertet. Als Strategien sind hier vordefinierte Maßnahmen gemeint, welche bei Störfallsituationen zum Einsatz kommen. Hierzu wurden zunächst verschiedenen Methoden beschrieben und nach der Definition in /FGS 12/ in „formalisierte“, „teilformalisierte“ und „nicht formalisierte“ Methoden unterteilt. Nach /FOR 15/ ist eine Zunahme der Formalisierung durch eine stringente Struktur und Vorgehensweise, sowie einen höheren Grad an Quantifizierung und Mathematisierung gekennzeichnet. Die Formalisierung von Methoden dient der Nachvollziehbarkeit und Transparenz getroffener Entscheidungen. Wobei die Übergänge zwischen den einzelnen Kategorien mitunter fließend sein können.

Die Vor- und Nachteile verschiedener Methoden bezüglich der Anforderungen bzw. Kri-terien zur Bewertung von Verkehrsmanagementstrategien wurden qualitativ untersucht. Bezüglich der Kriterien gibt es natürlich Unterschiede zwischen einer Standortsuche, die auf sicherheitstechnischen Anforderungen basiert und den Anforderungen an Strategien des Verkehrsmanagements. Hier liegt der Fokus im Wesentlichen auf den Kosten und dem Nutzen. Dennoch sind die grundsätzlichen, methodischen Fragestellungen ver-gleichbar und übertragbar.

Im Vorhaben wurden verschiedene Methoden, basierend auf ihrem Formalisierungsgrad miteinander verglichen (vgl. Abbildung 27 in /FOR 15/). Es zeigte sich, dass es Vor- und Nachteile zwischen formalisierten und nicht formalisierten Methoden gibt. Grundsätzlich ist die Durchführung von nicht formalisierten Methoden einfach und verständlich sowie ohne größeren Aufwand möglich. Im Vergleich zu den formalisierten Methoden sind sie jedoch ungenauer, durch subjektive Eindrücke geprägt und dahingehend mit Ungewiss-heiten behaftet. Die Vorteile der formalisierten Methoden liegt in der Genauigkeit und

Zuverlässigkeit, dafür sind sie aber aufwändiger, schwerer handhabbar und erfordern eine ausreichende Datenbasis.

Die teilformalisierten Verfahren bieten eine gute Mischung mit den Vor- und Nachteilen beider Ansätze. Bei den teilformalisierten Methoden kann insbesondere die Daten- und Werterhebung für die meisten Kriterien entweder qualitativ oder quantitativ (z. B. Berechnungen, Simulationen) erfolgen.

Es wird eine Auswahl an Methoden vorgestellt, welche die vorab definierten Anforderungen der Strategiebewertung im dynamischen Verkehrsmanagement erfüllen und sich grundsätzlich für die Strategiebewertung eignen. Die Methodenauswahl richtet sich nach dem Grad des Eintrittsrisikos der Störfallsituation. Bei einem geringen Risiko wird eine verbal-argumentative Bewertung als ausreichend erachtet. Bei einem mittleren bis hohen Risiko kann zudem die multikriterielle Wirkungsanalyse herangezogen werden. Zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit oder der Befragungen von beteiligten oder betroffenen Personen, wird zudem die Anwendung der Vorteil-Nachteil-Analyse, die Kosten-Nutzen-Analyse, die Wirksamkeits-Kosten Analyse (WKA) oder die Nutzwertanalyse (NWA, s. Kap. 5.3.2) empfohlen. Die wesentlichen Ergebnisse sind zudem in Form eines Leitfadentwurfs zusammengefasst.

#### **4.3.3 Analyse und Vergleich von Methoden zur integrierten Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen im Schienenverkehr**

In der Bachelorarbeit von /OTT 12/ werden Methoden zur Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen im Schienenverkehr dargestellt. Der Ausbau der Schieneninfrastruktur unterliegt den verschiedensten Randbedingungen. Zum einen steht in der Regel nur ein begrenztes Budget zur Verfügung und zum anderen haben die Infrastrukturmaßnahmen Auswirkungen auf verschiedene Aspekte in verschiedenen Bereichen, wie der Umwelt und Gesellschaft. Um die vorteilhafteste Maßnahme identifizieren zu können, werden Methoden zur Entscheidungsfindung in /OTT 12/ vorgestellt.

Für die in /OTT 12/ untersuchten Fragestellungen müssen ökonomische, ökologische und gesellschaftlichen Belange in einem Bewertungsverfahren berücksichtigt werden. Eine ähnliche Problemstellung, zumindest bezogen auf die vielen unterschiedlichen Kriterien mit unterschiedlichen Skalen, trifft auch für die sicherheitsgerichteten Kriterien der Standortsuche für Endlager zu.

Zur Einschätzung der Anwendbarkeit werden gängige bzw. konventionelle Methoden, welche zur Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen im Schienenverkehr bereits zur Anwendung kamen, beschrieben. Hierzu gehören u. a. die -Kosten-Nutzen-Analyse, die Nutzwertanalyse, die Umweltrisikoeinschätzung und die Raumwirksamkeitsanalyse.

Als wesentliche Eigenschaft des anzuwendenden Verfahrens wird hervorgehoben, dass „schlechte“ Kriterien nicht mit „guten“ Kriterien im Zuge der Aggregation kompensiert werden sollen. Zudem sollen ordinalskalierte, qualitative ökologische oder auch gesellschaftliche Kriterien berücksichtigt werden. Eine Berücksichtigung der verschiedenen Kriterien und Skalen ist mit multikriteriellen Methoden möglich. Zunächst erfolgt eine Beschreibung der Multi-Attribute Entscheidungsverfahren (MADM, vgl. Kap. 5.2) und insbesondere der Outranking-Verfahren Hasse-Diagramm-Technik, ELECTRE, PROMETHEE und ORESTE. Auf Basis eines Entscheidungsproblems im Schienenverkehr werden diese Verfahren angewendet. Die Untersuchung der Bewertungsergebnisse der verschiedenen Verfahren führte zu der Erkenntnis, dass die Verfahren ähnliche Ergebnisse liefern und die Darstellungen in den Hauptaussagen ähnlich sind.

#### **4.3.4 Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme**

In der Dissertation von /OBE 10/ wird untersucht, wie Entscheidungen hinsichtlich der zukünftigen Energieversorgung vor dem Hintergrund teilweise konfliktärer Zielsetzungen unterstützt werden können. Durch die unterschiedlichen Technologiepfade, zur Erzeugung, Verteilung und Speicherung von Energie, die auf erneuerbaren, fossilen oder nuklearen Energieträgern basieren und zentralisiert oder dezentral zum Einsatz kommen, ergeben sich unterschiedliche Alternativen. Herausforderungen ergeben sich zudem durch Ungewissheiten, welche auf der Energienachfrage, des Wettbewerbs aufgrund liberalisierter Energiemärkte und politische Maßnahmen und den Ausbau von erneuerbaren Energien beruhen. Zur Identifizierung einer geeigneten Methode werden zunächst multikriterielle Methoden hinsichtlich der zu untersuchenden Fragestellungen untersucht.

Als Ergebnis der Arbeit wurde ein Entscheidungsunterstützungssystem namens MAESTRO in Excel entwickelt. Als Methode wurde ein modifizierter PROMETHEE-Algorithmus in Excel implementiert. Der Ansatz berücksichtigt den technologischen Wandel in Form von Technologie-zyklus-abhängigen Gewichtungen, sowie entsprechende Sensitivitätsanalysen. Es wird hervorgehoben, dass das Excel Tool auch für multikriterielle

Fragestellungen außerhalb des Energiebereichs, mit einer flexiblen Anzahl an Kriterien und Alternativen eingesetzt werden kann.

#### **4.4 Zusammenfassende Darstellung der Literaturrecherche**

In /BOL 11/ wurden die weltweit praktizierten Vorgehensweisen bei der Standortsuche für Endlager analysiert. /BOL 11/ hebt hervor, dass die Übertragung der in anderen Ländern entwickelten Konzepte und Vorgehensweisen der Standortsuche auf Deutschland nur begrenzt möglich sind. Als Gründe werden die geologischen (verfügbare Wirtsgesteinsformationen) und politisch-gesellschaftlichen Gegebenheiten genannt. Mit Ausnahme der Schweiz wurde in allen mit Endlagerprojekten befassten Ländern (Stand 2009), nicht nach dem landesweit „besten“ Standort, sondern nach einem „hinreichend“ geeigneten Endlagerstandort gesucht, der eine Gefährdung von Mensch und Umwelt sicher ausschließen lässt.

Ein weiteres Ergebnis der Analyse in /BOL 11/ war zudem die Erkenntnis, dass die Auswahlprozedur häufig unter Zugrundelegung wirtschaftlicher Überlegungen durchgeführt wurde. Länder wie zum Beispiel Finnland, Schweden, Kanada oder Russland legten noch vor Beginn oder in einer sehr frühen Phase des Auswahlverfahrens durch politischen Beschluss fest, dass die radioaktiven Abfälle zur Vermeidung unnötiger Transporte und zur besseren Kontrolle des Umgangs mit ihnen, in unmittelbarer Nähe zu den Abfallverursachern (z. B. bestehenden kerntechnischen Anlagen) endgelagert werden sollen. Damit wurde bereits zu Beginn des Auswahlprozesses der mögliche Suchraum für potentielle Standorte stark eingegrenzt. Die endgültige Standortfestlegung erfolgte für viele Vorhaben nicht auf der Grundlage eines „objektiven“, kriteriengestützten Vergleichs von Alternativen, sondern wie z. B. in Frankreich oder in den USA durch Festlegungen. Auch legten sich viele Länder vor Beginn oder relativ früh in einem Auswahlprozesses auf einen bestimmten Wirtsgesteinstyp fest (z. B. Schweden/Finnland auf Kristallingestein, Niederlande und Polen auf Steinsalz, Belgien und Schweiz auf Tongestein) /BOL 11/.

Zudem erfolgte eine Eingrenzung der Untersuchungsräume insbesondere durch geowissenschaftliche „Ausschlusskriterien“. Ein methodischer Vergleich von Untersuchungsräumen ist in der Regel nicht vorgesehen bzw. geplant oder aber es sind hierzu keine Informationen verfügbar.

## **Ermittelte Methoden zur Durchführung von Abwägungen und vergleichenden Bewertungen**

Für einen sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagerstandorten in Deutschland, wurde im Vorhaben VerSi I und dessen Weiterentwicklung VerSi II, eine Methode auf Basis einer verbal-argumentativen Bewertung entwickelt. In dem so genannten Optionenvergleich Asse, wurde durch einen kriterienbezogenen Paarvergleich über die Rückholung der Abfälle aus der Schachanlage Asse entschieden. Hier ging es nicht um einen sicherheitsgerichteten Vergleich von Standorten, sondern um einen Vergleich von Handlungsoptionen. Im Verbundvorhaben ENTRIA erfolgte ein Vergleich von verschiedenen Entsorgungsoptionen verbal-argumentativ.

In der Schweiz wurde im so genannten „Sachplan geologische Tiefenlager“ sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertung auf Basis von provisorischen Sicherheitsanalysen, unter Berücksichtigung der Sicherheit und technischen Machbarkeit und mit raumplanerischen, wirtschaftlichen sowie sozioökonomischen Aspekten durchgeführt. Die in /ZUI 14/ für Etappe 2 beschriebenen und angewendeten Verfahren sind: Qualitative Bewertung mit Nutzwertanalyse, Stärken-Schwächen-Profil, Outranking-Methode und Malus-Bilanzierung. In /PET 97/ erfolgte auf Grundlage von Bewertungskriterien und der Anwendung der multikriteriellen Methode PROMETHEE, die Identifizierung und Einstufung potenzieller Standorte für schwach- und mittelradioaktive Entsorgungseinrichtungen in Kroatien.

In der Literaturrecherche von /BEH 10/ ist die Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten von multikriteriellen Methoden dargestellt. Auch aus den konkreten Vorhaben und Darstellungen in /APP 09/ (Nutzwertanalyse), /FOR 15/ (multikriterielle Wirkungsanalyse), /OTT 12/ (Hasse-Diagramm-Technik, ELECTRE, PROMETHEE und ORESTE), /OBE 10/ (modifizierter PROMETHEE-Algorithmus) werden die interdisziplinären Anwendungsmöglichkeiten von multikriteriellen Methoden ersichtlich. Häufig wird eine Kombination von mehreren Methoden zur Entscheidungsfindung herangezogen.

Des Weiteren gibt es Methoden, welche zur Bewertung oder schlichten Eingrenzung von Untersuchungsräumen aufgrund von Ausschlusskriterien angewendet werden können. Hierzu zählen die Umweltrisikoeinschätzung bzw. ökologische Risikoanalyse und die Raumwirksamkeitsanalyse/-untersuchung. Bei diesen Methoden handelt es sich jedoch nicht um Vergleichsmethoden, sondern um Werkzeuge zur Erarbeitung von Informationen, welche in die multikriteriellen Methoden einfließen können.



## **5 Multikriterielle Methoden**

Für die verschiedenen Aufgabenstellungen in den einzelnen Verfahrensschritten des StandAG (siehe Kap. 2) ist es notwendig Methoden zu identifizieren, um die Fülle an Informationen für eine (vergleichende) Abwägung/Bewertung im Zuge eines Entscheidungsprozesses zu verarbeiten. Entsprechende Methoden helfen dem Entscheidungsträger den Entscheidungsprozess transparenter und nachvollziehbarer zu gestalten. Für eine Prüfung der Anwendbarkeit von Methoden für die Aufgabenstellungen im StandAG, welche im Kap. 6 erfolgt, muss zunächst ein gewisses Verständnis der methodischen Vorgehensweisen bestehen. Deswegen werden in den folgenden Kapiteln beispielhafte Methoden näher erläutert. Bei der Vielzahl an Methoden und deren Modifikationen können nicht alle Methoden im MABeSt-Vorhaben beschrieben werden. Zunächst erfolgt eine allgemeine Einführung in die multikriterielle Unterscheidungsunterstützung. Anschließend werden insbesondere die in Kap. 4 identifizierten Methoden, beschrieben.

### **5.1 Zusammenstellung von multikriteriellen Methoden in der Literatur**

Die Formalisierung (Strukturierung) von Entscheidungsproblemen dient der Nachvollziehbarkeit und Transparenz getroffener Entscheidungen. Dieses Vorgehen ist insbesondere bedeutsam, wenn unterschiedlichste Akteure beteiligt sind und eine große Anzahl von Kriterien berücksichtigt werden müssen. Hierfür eignen sich entsprechend der Recherche in Kap. 4, Methoden aus dem Forschungsfeld der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (engl. Multi-Criteria Decision Making, MCDM). Da in multikriteriellen Methoden verschiedene Kriterien aus unterschiedlichen Themenbereichen berücksichtigt werden können, ist eine „realistische“ Abbildung von Entscheidungsproblemen möglich. Der Entscheidungsträger kann ein Entscheidungsproblem detailliert definieren und gliedern, wodurch eine Strukturierung von komplexen Alternativen erfolgen kann /GEL 14/.

Multikriterielle Methoden können für ein großes Spektrum von Entscheidungsproblemen und in einer Vielzahl unterschiedlicher Disziplinen eingesetzt werden. Dadurch wurden in den letzten Jahren eine Vielzahl von Methoden für unterschiedliche Fragestellungen entwickelt. Im Folgenden werden einige Beispiele genannt, in denen Methoden zur Bearbeitung von Entscheidungsproblemen angewendet oder dargestellt wurden. Zudem sind Studien aufgeführt, die sich mit der eigentlichen Auswahl von Methoden für gewisse Fragestellungen befassten bzw. hierzu Hilfestellungen geben.

In /WAȚ 19/ wurde aufgrund der Vielzahl an Methoden und deren verschiedenen Einsatzzwecken eine formale Richtlinie für die Auswahl von multikriteriellen Methoden für eine bestimmte Entscheidungssituation erstellt. Es wurden insgesamt 56 verfügbare Methoden analysiert und auf dieser Grundlage eine hierarchische Rangfolge auf Basis der Methodeigenschaften erstellt. Das vorgeschlagene Framework wurde auf einer Webplattform implementiert, die unter [www.mcda.it](http://www.mcda.it) öffentlich zugänglich ist. Da die Autoren einen Ansatz unabhängig vom Anwendungsbereich entwickeln wollten, basiert das vorgeschlagene Framework auf der Bestimmung einer Reihe von (Haupt)Merkmale der verfügbaren Methoden. Nach /WAȚ 19/ kann jedes Entscheidungsproblem unter Verwendung von maximal neun Deskriptoren in drei unterschiedlichen Hierarchieebenen beschrieben werden. Auf der ersten Hierarchieebene definiert der Entscheidungsträger nur die allgemeinen Deskriptoren des Entscheidungsproblems. Auf der zweiten Hierarchieebene können weitere Deskriptoren des Entscheidungsproblems festgelegt werden. Diese umfassen im Wesentlichen die Art bzw. den Typ der Eingabeparameter. Die verschiedenen Deskriptoren geben einen Einblick, welche Eingangsgrößen für die Auswahl einer geeigneten Methode wichtig sind:

1. Werden unterschiedliche Gewichte der einzelnen Kriterien im Entscheidungsproblem berücksichtigt?
2. Auf welcher Skala (qualitativ, quantitativ, relativ) werden die Kriterienausprägungen<sup>8</sup> der Varianten verglichen?
3. Ist das Entscheidungsproblem durch Ungewissheit (Eingabedatenungewissheit, Präferenzungewissheit des Entscheidungsträgers) gekennzeichnet?
4. Was ist das Entscheidungsproblem (Auswahl, Klassifizierung, Ranking, siehe Kap. 3)?

Bei einer relativen Skala (Punkt 2, Auswahlmöglichkeit „relativ“) werden die Daten in Relation zu anderen Daten dargestellt. Zum Beispiel kann das Gewicht des Kriteriums  $k_1$  in Relationen zu dem Kriterium  $k_2$  ausgedrückt werden (z. B.  $k_1$  ist dreimal wichtiger als  $k_2$ ).

Einen ähnlichen Ansatz wie in /WAȚ 19/ wurde von /HAD 18/ zur Auswahl von multikriteriellen Methoden entwickelt. In dem Vorhaben wurde eine neue Methodik vorgestellt,

---

<sup>8</sup> Eine Ausprägung eines Merkmals bzw. Kriteriums ist ein Wert, wie zum Beispiel „männlich“ oder „weiblich“ (nominale Skala), „sehr gut“, „gut“, „ungenügend“ für Schulnoten (ordinale Skala) und der Länge eines Objektes in Metern (kardinale Skala).

mit der die am besten geeignete MCDM-Methode ausgewählt werden kann, wenn Risiken und Ungewissheiten in dem Entscheidungsproblem zu erwarten sind.

In /HUA 11/ wurde die Anwendung der multikriteriellen-Entscheidungsanalyse auf die Anwendung im Umweltbereich untersucht. Es wurden über 300 relevante Artikel, die zwischen 2000 und 2009 veröffentlicht wurden identifiziert. Die Papiere wurden u. a. nach ihrem Anwendungsbereich klassifiziert. Darüber hinaus wurden die Arbeiten nach den in der Analyse verwendeten MCDM-Methoden (analytischer Hierarchieprozess, Multi-Attribut-Nutzen-Theorie und Outranking) klassifiziert.

MCDM-Methoden werden zudem zur Lösung von Entscheidungsproblemen im Energiebereich eingesetzt, da sie Alternativen mit unterschiedlichen Perspektiven im Hinblick auf mehrere einander widersprechende Kriterien bewerten können. Zum Beispiel wurde in /KAY 19/ eine Recherche zur Anwendung von Fuzzy-MCDM-Methoden im Energiebereich durchgeführt. Wenn das Entscheidungsproblem durch Ungewissheiten gekennzeichnet ist, können diese durch eine Art Verteilung (kontinuierlich oder diskret) dargestellt werden. Neue Methoden, die auf der Fuzzy-Theorie basieren, ermöglichen es unsichere Daten in einer s. g. Fuzzy-Form auszudrücken (siehe /ZAD 65/). Es wurde eine große Anzahl an Vorhaben gesichtet und nach bestimmten Kriterien sortiert (Arten von Fuzzy-Ansätzen, Jahr, Zeitschrift, Fuzzy MCDM-Methode, Land und Dokumenttyp). Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy-AHP), die am häufigsten verwendete MCDM-Methode, in Verbindung mit dem Fuzzy-Ansatz ist.

In /CAS 18/ wurde eine Literaturrecherche (bis 2015) zur Anwendung von MCDM-Methoden zur Bestimmung der Energieeffizienz von Fahrzeugen durchgeführt. Von 339 Veröffentlichungen wurden 45 Veröffentlichungen identifiziert, die eine MCDM-Methode und eine Korrelation zur Automobilindustrie beschreiben. Der analytische Hierarchieprozess (AHP) wurde als die in der Automobilindustrie übliche Methode identifiziert. Die Anwendung von Fuzzy-Ansätzen zur Behebung von Ungewissheiten in Daten wurde ebenfalls beobachtet.

In /SIT 19/ wurde eine Literaturrecherche zur Anwendung von MCDM-Methoden im Bergbau und in der Mineralverarbeitung durchgeführt. Es wurden 90 Artikel, die zwischen 1999 und 2017 veröffentlicht wurden ausgewertet. Die Recherche zeigte, dass das häufigste Entscheidungsproblem die Auswahl von Bergbaumethoden war, während

der analytische Hierarchieprozess (AHP) die am häufigsten verwendete MCDM-Methode ist.

/SCH 18/ führte ein Literaturreview durch, um methodische Ansätze zu identifizieren, mit denen dynamische Entscheidungskomponenten in einer multikriteriellen Methode berücksichtigt werden können. Dynamische Entscheidungskomponenten sind zum Beispiel zukünftige bzw. sich zeitlich ändernde strategische Planungsentscheidungen. Die Untersuchungen ergaben, dass es grundsätzlich drei Gruppen von Ansätzen gibt, um eine Dynamik in einer multikriteriellen Entscheidungsunterstützung zu integrieren:

- Szenario-basierte Ansätze,
- Eine Kombination von Methoden mit Lebenszyklusmodellen (LCA), sowie
- die direkte Einbeziehung von Dynamik in der Problemformulierung über mehrere Datensätze.

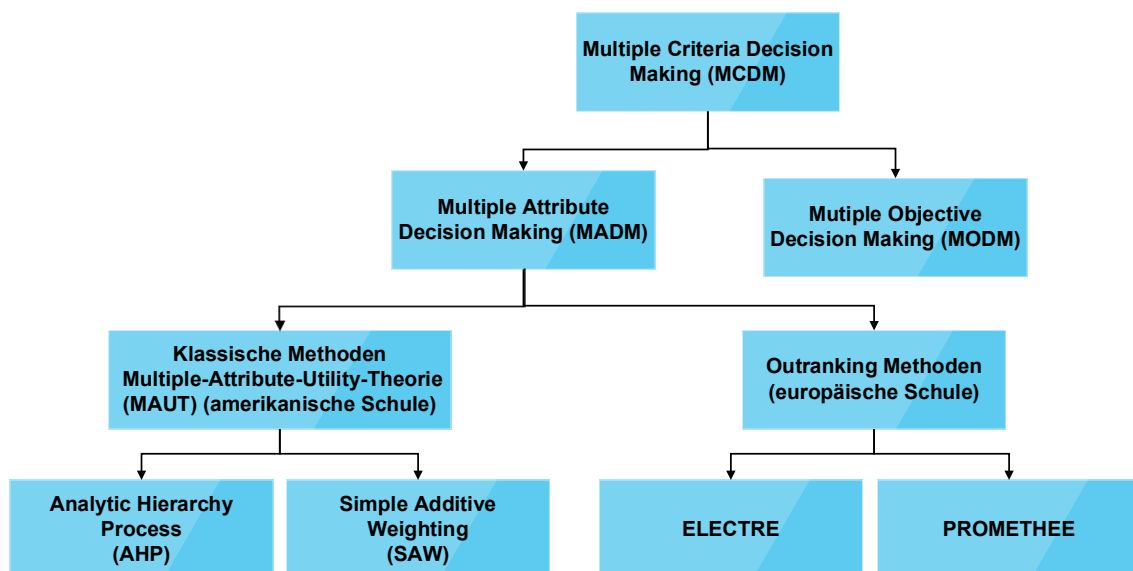
Zudem wird ein Vergleich für die Methoden MAUT, AHP, ELECTRE und PROMETHEE dargestellt.

## **5.2 Klassifizierung (Kategorisierung) der Methoden(-kategorien)**

In den vergangenen Jahrzehnten wurden bestehende multikriterielle Verfahren angepasst oder neu entwickelt, so dass es eine Vielzahl von Verfahren für verschiedene Fragestellungen gibt. Für den Anwender bzw. Entscheidungsträger ist es dadurch schwierig zu entscheiden, welche Methode am besten für die jeweilige Fragestellung anwendbar ist. Grundsätzlich existieren keine Verfahren, die für alle Entscheidungssituationen uneingeschränkt anwendbar sind /HAA 04/.

Je nach Literatur werden die multikriteriellen Methoden (MCDM) nach verschiedenen Unterscheidungsmerkmalen klassifiziert. Grundsätzlich werden MCDM-Methoden in die folgenden beiden Kategorien (siehe Abb. 5.1) unterteilt /GEL 14/:

- „Multi Objective Decision Making“ (MODM). **MODM-Methoden** zielen darauf ab, aus einer **nicht bestimmten (stetigen)** Menge an Alternativen (Lösungsraum) unter Berücksichtigung von Randbedingungen eine im Sinne des Entscheidungsträgers optimale Alternative zu bestimmen
- „Multi Attributive Decision Making“ (MADM) oder auch Multi Criteria Decision Analysis (MCDA). **MADM- bzw. MCDA-Methoden** zielen darauf ab, eine Menge bereits **bekannter (diskreter)** Alternativen auf Basis der simultanen Betrachtung mehrerer Attribute (Kriterien) zu bewerten.



**Abb. 5.1** Klassifizierung multikriterieller Methoden

Für die Standortsuche für Endlager erscheinen **MADM-Methoden** als geeignet, da der Fokus auf der vergleichenden Bewertung einer diskreten Anzahl von bekannten Alternativen liegt. Die Anwendung von MODM-Methoden scheint hingegen besser geeignet zur Systemoptimierung, wenn aus einer großen Anzahl möglicher Kombinationen von Einflussgrößen das optimale System ermittelt werden soll /OBE 10/. Aus den oben genannten Gründen werden MODM-Methoden im Folgenden nicht weiter beschrieben. Die MADM-Methoden können weiter in Klassische- und Outranking-Methoden unterteilt werden (siehe Abb. 5.1 und Tab. 5.1):

Die **klassischen MADM-Verfahren** werden auch nutzenbasierte Verfahren genannt und gehören zur Familie der „Multiple Attribute Utility Theory“ (MAUT). Beispielhafte klassische Verfahren werden im Kap. 5.3 beschrieben. **Outranking Methoden** wurden entwickelt, um die Nachteile der klassischen Verfahren zu optimieren. Dem Entscheidungsträger müssen seine Präferenzen nicht klar bewusst sein. Die Vorteile liegen somit in dem erweiterten Präferenzbegriff und dem damit verbundenen Aufzeigen von Unvergleichbarkeiten (Inkonsistenz) zwischen Alternativen /GEL 14/. Beispielhafte Outranking Verfahren werden im Kap. 5.4 beschrieben.

**Tab. 5.1** Abgrenzung der klassischen Verfahren und Outranking-Methoden (verändert nach /GEL 14/ und /OBE 10/)

<b>MCDM (Multi-Criteria Decision Making)</b>		
<b>MODM</b> Multi Objective Decision Making		Aus einer stetigen Menge an Alternativen wird mittels mathematischer Verfahren (z. B. Vektoroptimierungsmodellen), unter Berücksichtigung mehrerer Zielfunktionen, eine optimale Lösung ermittelt.
<b>MADM</b> Multi Attribute Decision Making		Aus einer begrenzten Auswahl an Alternativen – (diskreter Lösungsraum), wird auf Grundlage bewertungsrelevanter Kriterien die „bestmögliche Alternative ausgewählt.
	Klassische Ansätze (Amerikanische Schule)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Annahme: eine <b>optimale</b> Entscheidung existiert und der ET hat <b>klare Präferenzen</b>,</li> <li>• Erstellung einer <b>absoluten</b> Rangfolge</li> </ul>
	Outranking Ansätze (Europäische Schule)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Annahme: optimale Entscheidung existiert nicht, sondern es wird nach „<b>bestmöglichen</b>“ Alternativen gesucht.</li> <li>• <b>Präferenzen</b> des ET <b>müssen nicht klar definiert werden</b>.</li> <li>• Erstellung von <b>partiellen und absoluten</b> Rangfolgen (siehe Kap. 3, Abb. 5.5).</li> </ul>

### Weitere Möglichkeiten der Methoden-Klassifizierung

Outranking Verfahren führen einen paarweisen Vergleich der Alternativen auf Basis der jeweiligen Kriterien durch. Unter der Berücksichtigung der Präferenzen wird somit ermittelt, ob eine Alternative eine andere dominiert („besser“ ist). Durch die paarweisen Bewertungen können Konkordanz- und Diskordanz aufgedeckt und die Alternativen zu einer partiellen oder vollständigen (absoluten) Rangfolge kombiniert werden. Im Gegensatz zu den Methoden der MAUT-Methoden, bei denen die Alternative mit dem besten aggregierten Gesamtwert, als die am besten angesehene Alternative gilt, ist für eine

partielle Rangfolge die beste Alternative möglicherweise nicht sofort ersichtlich. Ziel ist es, eine (günstige) Teilmenge zu ermitteln innerhalb derer durch weitere Überlegungen oder Methoden eine gute Kompromissalternative gefunden werden kann.

Mit MAUT-Methoden können auch Bewertungen von Alternativen ohne Vergleiche erfolgen (z. B. durch SAW, Kap. 5.3.1). Bei Outranking Methoden wird immer ein paarweiser Vergleich durchgeführt. In /LI 14/ wird deshalb eine Unterteilung der Methoden in „Elementary Methods“, (einfache Gewichtungsmethoden wie z. B. SAW oder OWA, Kap. 4.3.1), „Single Synthesizing Criterion“ (Methoden die einen aggregierten Wert, bzw. ein Synthesekriterium verwenden, wie z. B. SMART oder AHP) und „Outranking Synthesizing Approach“ (Outranking Methoden, wie z. B. ELECTRE und PROMETHEE) gewählt. Zusätzlich wird noch die Kategorie „Interactive Approach“ ausgewiesen (z. B. die Methode MACBETH).

In /CHE 06/ wird eine ähnliche Unterteilung der Methoden, wie in /LI 14/ aufgezeigt. Die Unterteilung der Methoden erfolgt im Wesentlichen auf der Annahme, ob „eine“ (Single alternative-based methods) oder „mehrere“ (Binary alternatives-based methods) Alternativen untersucht werden. Zudem werden noch linguistische Methoden (Linguistic rules-based methods) unterschieden. Mit den „Single alternative-based methods“ wird eine bestimmte Alternative bewertet, ohne Berücksichtigung anderer Alternativen. Methoden der Kategorie „Binary alternatives-based methods“ führen eine Bewertung durch Vergleiche zweier Alternativen auf Basis ihrer Kriterien durch. Hierzu werden z. B. ELECTRE, PROMETHEE und der Analytic Hierarchy Process (AHP) gezählt. Bei den linguistischen Methoden werden Kriterienpräferenzen über sprachliche Regeln, die meist als „Wenn ..., dann ...“ ausgedrückt werden, ausgewiesen.

Nach /APP 09/ können multikriterielle Verfahren zudem anhand ihrer Kompensationseigenschaften in Verfahren mit kompensatorischem und nichtkompensatorischem Ansatz unterschieden werden.

Bei den **kompensatorischen** Verfahren können sich unterschiedliche Ausprägungen der entscheidungsrelevanten Kriterien gegenseitig ausgleichen. Ein niedriger Erfüllungsgrad bei einem Kriterium kann mit einem hohen Erfüllungsgrad bei einem anderen Kriterium verrechnet und damit kompensiert werden. Zu den Verfahren mit kompensatorischem Ansatz gehört vor allem die häufig angewendete Nutzwertanalyse. Insbesondere

die Nutzwertanalyse weist gravierende methodische Probleme (z. B. Nutzenunabhängigkeit der Zielerträge, Aggregation) sowie häufig auch anwenderorientierte Probleme auf /APP 09/.

Bei den Verfahren mit **nicht-kompensatorischem** Ansatz erfolgt keine Verrechnung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Alternative. Zudem wird kein Gesamt(nutz)wert, der über das rechnerische Zusammenführen einzelner Teilergebnisse ermittelt wird, bestimmt. Die jeweiligen Kriterien-Ausprägungen bleiben unaggregiert. Durch die sukzessive Abwägung der Alternativen anhand der einzelnen Kriterienausprägungen, werden für jede Alternative die Vor- und Nachteile abgewogen. Für die Abwägung bzw. vergleichende Bewertung vieler Alternativen kann je nach gewählter Methode ein erheblicher (Abwägungs-) Aufwand resultieren. Andererseits ist das Verfahren nachvollziehbar und liefert valide Ergebnisse. Zu den Methoden mit nicht-kompensatorischem Ansatz gehört zum Beispiel der verbal-argumentative Abwägungsprozess /APP 09/.

Interaktive und linguistische Methoden stellen Sonderformen dar und werden im Folgenden nicht weiter beschrieben, der Fokus liegt auf den Nutzenbasierten- und den Outranking-Methoden. Im Folgenden werden beispielhafte Methoden gemäß der Klassifizierung in der Abb. 5.1 beschrieben.

### **5.3 Nutzenbasierte Methoden**

Für die klassischen bzw. nutzenbasierten Verfahren gilt die Annahme, dass der Entscheidungsträger (ET) eine genaue Vorstellung über den Nutzen der Kriterienausprägungen und der Kriteriengewichtungen bzw. seiner Präferenzen (Wertvorstellungen) besitzt. Die einzelnen Kriterienausprägungen werden in der Regel zu einem Gesamt(nutz)wert (z. B. Kosten eines Produktes) aufaddiert (additiver Nutzen). Demnach kann eine Menge von Alternativen in eine komplette Rangordnung gebracht werden und es existiert eine optimale Entscheidung bzw. Alternative /WIL 12/. Folgende Methoden werden näher beschrieben:

- die Simple additive Weighting (SAW) Methode,
- die Nutzwertanalyse (NWA),
- der Analytic Hierarchy Process (AHP) und
- die Weiterentwicklung Analytic Network Process (ANP).



### 5.3.1 Additive Methoden: SAW (Simple Additive Weighting) und SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique)

Die additive Gewichtungsmethode SAW (im engl. auch weighted linear combination, WLC genannt), stellt das einfachste der nutzenbasierten Verfahren dar. Die Methode versucht eine globale Wertfunktion einer Alternative zu ermitteln, anhand dessen ein Ranking der Alternativen erfolgen kann. Hierzu werden zunächst die Kriterienausprägungen normiert ( $x_{1,n}$ ) um verschiedene Kriterien-Skalen miteinander verrechnen zu können. Dann werden die normierten Werte mit den Gewichten multipliziert. Zur Ermittlung einer Gesamtbewertung werden die gewichteten Einzelwertfunktionen aller Kriterien addiert /REE 09/ /ABD 14/. Die Tab. 5.2 zeigt schematisch die Schritte zur Ermittlung einer Gesamtbewertung.

**Tab. 5.2** Berechnung eines Gesamtwertes (verändert nach /SCH 12/)

Kriterien	Gewichtung ( $\omega$ )	Ausprägung	Normalisierung	Multi Attribute Wert
<b>C1</b>	$\omega_1$	$X_1$	$X_{1,n}$	$\omega_1 \cdot X_{1,n}$
<b>C2</b>	$\omega_2$	$X_2$	$X_{2,n}$	$\omega_2 \cdot X_{2,n}$
<b>C3</b>	$\omega_3$	$X_3$	$X_{3,n}$	$\omega_3 \cdot X_{3,n}$
<b>C<sub>k</sub></b>	$\omega_k$	$X_k$	$X_{k,n}$	$\omega_k \cdot X_{k,n}$
<b>Summe</b>				$\sum_{k=1}^K \omega_k \cdot x_k^n$

Zur Ausweisung von Gewichtungsfaktoren für Kriterien, wird häufig die SMART-Methode eingesetzt. Deshalb wird die Methode im Folgenden näher beschrieben. Bei der **SMART-Methode** wird dem vom Entscheidungsträger als am wichtigsten erachteten Kriterium die höchste Punktzahl (z. B. 100 Punkte) zugeteilt. Diese Punktezahlgilt nun als Referenz für alle anderen (unwichtigeren) Kriterien, denen im Verhältnis dazu weniger Punkte zugeordnet werden. Es wird beispielhaft angenommen, dass eine Alternative drei Kriterien besitzt, welchen folgende Punktezahlgeworden wird: Kriterium-1 (wichtigstes Kriterium) = 100, Kriterium-2 = 80 und Kriterium-3 = 20.

Die Gewichtung errechnet sich dann folgendermaßen /GEL 14/:

- Gewichtung Kriterium-1 =  $100 / (100+80+20) = 100 / 200 = 0,5$  bzw. 50 %
- Gewichtung Kriterium-2 =  $80 / (100+80+20) = 80 / 200 = 0,4$  bzw. 40 %
- Gewichtung Kriterium-3 =  $20 / (100+80+20) = 20 / 200 = 0,1$  bzw. 10 %

Für die Ermittlung der Kriteriengewichte kann zudem hierarchisch oder nicht-hierarchisch vorgegangen werden. Bei einem hierarchischen Vorgehen werden alle Elemente innerhalb einer Ebene gewichtet, das bedeutet das für jede Ebene 100 % bzw. 100 Punkte auf sämtliche Unterziele oder Kriterien verteilt werden. Somit kann das endgültige Gewicht eines Attributes über die Multiplikation der jeweiligen Gewichte aller Vorgänger (Pfad entlang der Hierarchie) bestimmt werden. Bei einem nicht hierarchischen Vorgehen werden sämtliche Attribute gleichzeitig gewichtet /GEL 14/.

Nachteile der additiven Verfahren ist die Normalisierung der verschiedenen Kriterienausprägungen, um vergleichbare Werte zu erhalten. Dies kann zu deutlich unterschiedlichen Rangfolgen führen, je nachdem welche Normalisierungsmethode gewählt wird /TOF 14/.

### **5.3.2 Nutzwertanalyse (NWA)**

Durch die Nutzwertanalyse /BEC 78/, /ZAN 71/ soll der Nutzen unterschiedlicher Alternativen untersucht werden. Die Nutzwertanalyse gehört zu den qualitativen, nicht-monetären Analysemethoden der Entscheidungstheorie. Die Nutzwertanalyse ist eine Methodik, die die Entscheidungsfindung bei komplexen Problemen rational unterstützen soll. Zahlreiche Investitionsvorhaben wie z. B. die Entscheidung für einen neuen Standort können nicht ausschließlich durch Zahlen (Kosten, Gewinne, Rentabilität etc.) erfasst werden. Hier integriert die Nutzwertanalyse auch qualitative Faktoren. Mit ihrer Hilfe wird die Effektivität bewertet.

Es wird ein hierarchisches Zielsystem durch Indikatoren, welche auf ein Gesamtnutzen bezogen werden, aufgebaut. Durch Nutzenfunktionen wird der Zielerfüllungsgrad jedes Indikators einer Alternative ermittelt /SCH 06/. Der höchste Gesamtnutzwert spiegelt am besten die formulierten Zielvorstellungen wider.

Bei einer Nutzwertanalyse sind folgende Schritte erforderlich:

### **1. Festlegung der Alternativen bzw. Entscheidungsvarianten:**

Die verschiedenen Alternativen, von denen eine ausgewählt werden soll, werden festgelegt. Dabei ist auch der aktuelle Ist-Zustand als „Null-Alternative“ in die Bewertung einzubeziehen. Diese wird benötigt, um zu überprüfen, ob die neuen Alternativen tatsächlich einen höheren Nutzen aufweisen, als der aktuelle Zustand. Die Null-Alternative kann entfallen, wenn der Ist-Zustand ein vorab definiertes Ausschlusskriterium erfüllt.

### **2. Definition von Bewertungskriterien:**

Zunächst sollten Ausschlusskriterien definiert werden, welche nicht in die NWA einfließen, sondern zum sofortigen Ausschluss einer Alternative führen, wenn das Kriterium erfüllt ist (z. B. das Überschreiten einer maximalen Investitionssumme). Danach werden die Kriterien festgelegt, anhand derer eine Entscheidung getroffen werden soll (Bewertungskriterien). Diese Kriterien sind häufig Anforderungen an das Produkt oder zu erreichende Ziele. Dabei sollte unter Beachtung folgender Regeln möglichst systematisch und präzise vorgegangen werden:

- Die Bewertungskriterien können häufig bestimmten Kategorien zugeordnet werden (z. B. Leistungs-, Kosten- und Terminkriterien). Bewertungskriterien, die einer gemeinsamen Kategorie angehören, sind gemeinsam anzuordnen.
- Wenn möglich, ist eine Kriterienhierarchie zu erstellen, da diese unter Umständen die Gewichtung vereinfacht und die Beziehung der Kriterien verdeutlicht. Mit abnehmender Hierarchie-Ebene verlieren die Ziele aufgrund der additiven Methodik für den Gesamtnutzwert an Bedeutung.
- Alle Kriterien sollten entweder qualitativ oder quantitativ erfassbar sein. Die Formulierung der Ausprägungen sollte möglichst präzise sein („Personaleinsparung von 10 %“ ist präziser als allgemein „Personaleinsparung“). Dies ist insbesondere für die nachfolgende Wichtung von Bedeutung.
- Unterschiedlichkeit: Verschiedene Bewertungskriterien müssen unterschiedliche Merkmale beschreiben.
- Nutzenunabhängigkeit: Die Erfüllung eines Kriteriums darf nicht die Erfüllung eines anderen voraussetzen.

### 3. Gewichtung der Bewertungskriterien:

Jedem Kriterium wird ein Prozentsatz hinterlegt, der die Wichtigkeit des Kriteriums für das Ziel der NWA (d. h. die zu ermittelnde beste Alternative) belegt. Die Summe aller Einzelgewichtungen muss 100% ergeben.

### 4. Festlegung des Bewertungsmaßstabes:

Die einzelnen Kriterien werden mit in Abhängigkeit von ihrem Zielerfüllungsgrad mit Punkten bewertet. Um hier eine Eindeutigkeit sicherzustellen, muss der Bewertungsmaßstab genau definiert werden. Verwendbar sind hier Nominalskalen (i. d. R. nur bei Ausschlusskriterien, z. B. „weiter zu betrachten“ / „zu verwerfen“), Ordinalskalen (notenähnliche Bewertung, z. B. 10 Punkte = „sehr gut“, 1 Punkt = „schlecht“) oder Kardinalskalen (z. B. „Ersparnis in xxx EUR“) (vgl. hierzu Kap. 3). Die Skalen können innerhalb einer NWA gemischt verwendet werden. Für ein und dasselbe Kriterium muss jedoch die gleiche Skalenart verwendet werden.

### 5. Bewertung der Alternativen:

Hier erfolgt die eigentliche Bewertung des Zielerfüllungsgrades. Pro Kriterium und Alternative werden, wie oben erläutert, Punkte vergeben.

### 6. Summierung und Auswahl:

Durch Multiplikation der Einzelgewichtungen mit den zugehörigen Bewertungen des Zielerfüllungsgrades (Punkten) werden Teilnutzwerte errechnet. Deren Summe ergibt den Gesamtnutzwert einer Alternative  $A$ . Die Alternative mit der höchsten Punktzahl entspricht den definierten Kriterien am besten. D. h., der Gesamtnutzwert wird nach der Beziehung

$$\text{Gesamtnutzwert } (A_1) = \sum_{r=1}^2 \text{Gewichtung}_r \cdot \text{Bewertung}_r (\text{Kriterium})$$

mit  $r$ : Anzahl der Alternativen

errechnet. Die Tab. 5.3 zeigt beispielhaft die Berechnung von Teil- und Gesamtnutzwerten.

**Tab. 5.3** Beispiel für die Berechnung von Teil- und Gesamtnutzwerten

Auswahlkriterien	Gewichtung	Alternative 1		Alternative 2	
		Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert	Zielerfüllungsgrad	Teilnutzwert
Kriterium A	10 %	5	0,5	6	0,6
Kriterium B	35 %	8	2,8	3	1,05
Kriterium C	20 %	1	0,2	7	1,4
Kriterium D	30%	5	1,5	9	2,7
Kriterium E	5 %	6	0,3	1	0,05
<b>Summe</b>	100%		5		6

Nach /ZAM 02/ liegen die Vorteile der Nutzwertanalyse in:

- der Anschaulichkeit und leichteren Vermittelbarkeit der Ergebnisse,
- der Offenlegung von individuellen Wertschätzungen des Bearbeiters durch Gewichtungen der Kriterien,
- der einfachen, mit relativ geringem Aufwand verbundenen Durchführung.

Die wesentlichen Kritikpunkte an der Nutzwertanalyse sind demgegenüber nach /ZAM 02/, die bei der Aggregation der Einzelnutzen zugrunde gelegten Annahmen:

- die einzelnen Kriterien seien unabhängig voneinander und es gäbe keine Zielkonflikte,
- die Addition von Einzelwerten, durch die suggeriert wird, dass die Einzelwerte verrechenbar sind. Eine Gesamtverrechnung von Einzelnutzen kann allerdings umgangen werden, indem die Einzelnutzen weitgehend aggregiert gelassen und am Ende verbal-argumentativ gegeneinander abgewogen werden,
- die Tendenz, über exakte Zahlenwerte wissenschaftliche Genauigkeit vorzutäuschen.

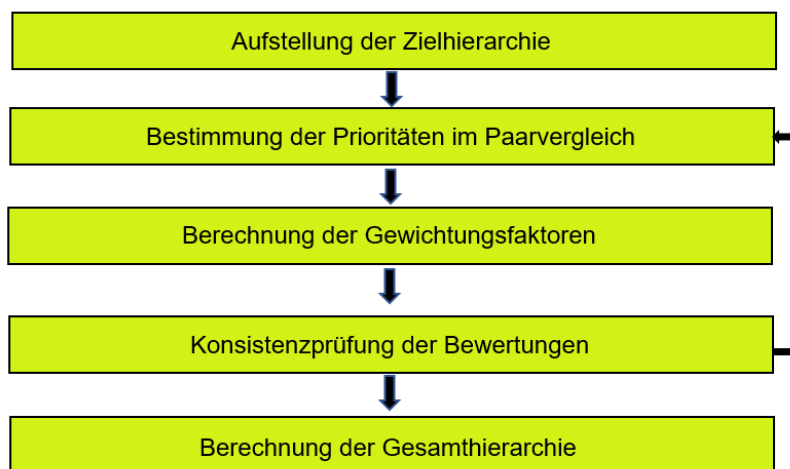
### 5.3.3 AHP (Analytic Hierarchy Process)

Der Analytic Hierarchy Process (auch Saaty-Methode /SAA 96/ genannt) ist ein weiteres formalisiertes Verfahren, um Entscheidungsprozesse zu strukturieren sowie komplexe Entscheidungen zu vereinfachen und rationaler zu treffen. AHP ist als Weiterentwicklung der Nutzwertanalyse mathematisch aufwändiger als diese, dafür allerdings auch präziser. Bei der AHP-Methode wird im Gegensatz zum NWA das Alternativen-Ranking durch

einen paarweisen Vergleich von Kriterien und Alternativen ermittelt. AHP kann sowohl als Analyseinstrument als auch als Erhebungsinstrument (insbesondere Marktforschung) eingesetzt werden /LÜT 08/. Die Intension des Entwicklers war es, speziell die subjektiven Wünsche und Einschätzungen der Entscheidungsträger, zur Grundlage der Bewertung zu machen /SIM 03/. Beispiel Vorhaben zur Anwendung der AHP-Methode im Umweltbereich finden sich u. a. in /KIK 05/.

Mit Hilfe von AHP wird ein multikriterielles Entscheidungsproblem in Einzelkriterien zerlegt (Dekomposition) und anschließend hierarchisch strukturiert analysiert. Mit Hilfe systematischer Paarvergleiche werden alle Elemente einer Hierarchie untereinander in Beziehung gesetzt und unter Anwendung von Algorithmen in Vektoren umgewandelt. Das Entscheidungsproblem wird dadurch in seiner Gesamtheit erfasst und in den Einzelbestandteilen bewertet /LÜT 08/.

In der Abb. 5.2 ist der Verfahrensablauf zur Durchführung des AHP Verfahrens skizzierte. Es wird vorausgesetzt, dass die Erstellung der Zielhierarchien und der zugehörigen Alternativen mit den entsprechenden Kriterien bzw. Indikatoren bereits erfolgte.



**Abb. 5.2** Ablaufschema eines AHP (verändert nach /LÜT 08/)

Zunächst werden den Indikatoren - in Bezug auf ihren paarweisen Vergleich - Präferenzen zugewiesen. Eine Präferenz wäre zum Beispiel: Indikator  $I_1$  ist um den Faktor  $x$  wichtiger als Indikator  $I_2$ . Die Indikatoren zur Bewertung der Alternativen können sowohl qualitative als auch quantitative Daten sein. Als Ergebnis wird eine Matrix mit den Präferenzen für alle Indikatorenpaare erstellt. Die Präferenzvergabe kann unter Umständen inkonsistent sein (siehe Beispiel in /SIM 03/). Zudem kann bei einer großen Anzahl von

Indikatoren eine konsistente Präferenzvergabe schwierig sein. Es wird empfohlen, stets nur 9 Präferenzen im Vergleich zu vergeben.

Eine konsistente Indikatorenmatrix (Tab. 5.4) würde sich aus den folgenden Präferenzen bilden lassen:

- 1. Präferenz:  $I_1 = 2 * I_2$
- 2. Präferenz:  $I_2 = 3 * I_3$
- 3. Präferenz:  $I_1 = 6 * I_3$

**Tab. 5.4** Konsistente Matrix der Indikatorenpräferenzen (verändert nach /SIM 03/)

	$I_1$	$I_2$	$I_3$
$I_1$	1	2	6
$I_2$	1/2	1	3
$I_3$	1/6	1/3	1

Aus der Indikatorenpräferenzenmatrix kann nun die Gewichtung jedes einzelnen Indikators errechnet werden. Hierzu werden die Zahlenwerte normiert. Zunächst werden die Spalten, durch die Division mit der Spaltensumme, normiert. Anschließend werden die Zeilen summiert und durch die Anzahl der Indikatoren (Spalten) geteilt. Die resultierenden Zahlenwerte sind die Gewichte ( $I_1 = 0,6$ ,  $I_2 = 0,3$  und  $I_3 = 0,1$ ) (siehe Beispiel in /SIM 03/).

Im nachfolgenden Schritt werden vom Entscheidungsträger nach dem gleichen Prinzip wie zur Ermittlung der Indikatorpräferenzen, Präferenzen für die einzelnen Alternativen vergeben. Hieraus resultiert für jeden Indikator eine Matrix mit den Präferenzen der einzelnen Alternativen. Ebenfalls wird für die ermittelten Matrizen die oben beschriebene Normierung durchgeführt. Die resultierenden Matrizen werden als lokale Präferenzen der Alternativen, bezogen auf einen bestimmten Indikator, bezeichnet /SIM 03/.

Aus den lokalen Präferenzen kann nun die globale Präferenz berechnet werden. Zunächst werden die lokalen Präferenzen mit den Gewichten der Indikatoren multipliziert. Nachfolgend werden die gewichteten lokalen Präferenzen zur so genannten globalen Präferenz addiert. Die Alternative mit der höchsten globalen Präferenz wird als am besten bewertet /SIM 03/.

Ergebnis eines AHP-Modells ist ein Nutzen(Utility)Vektor, der die Bedeutung der einzelnen Komponenten für das Erreichen des Gesamtziels beschreibt. Ziel der Bewertung ist das Auffinden dieses Ergebnisvektors, der die quantifizierte Bedeutung der Handlungsalternativen auf der untersten Hierarchieebene in Bezug auf das oberste Hierarchieziel angibt /TSC 99/.

Die AHP-Methode hat gegenüber der Nutzwertanalyse folgende **Vorteile**:

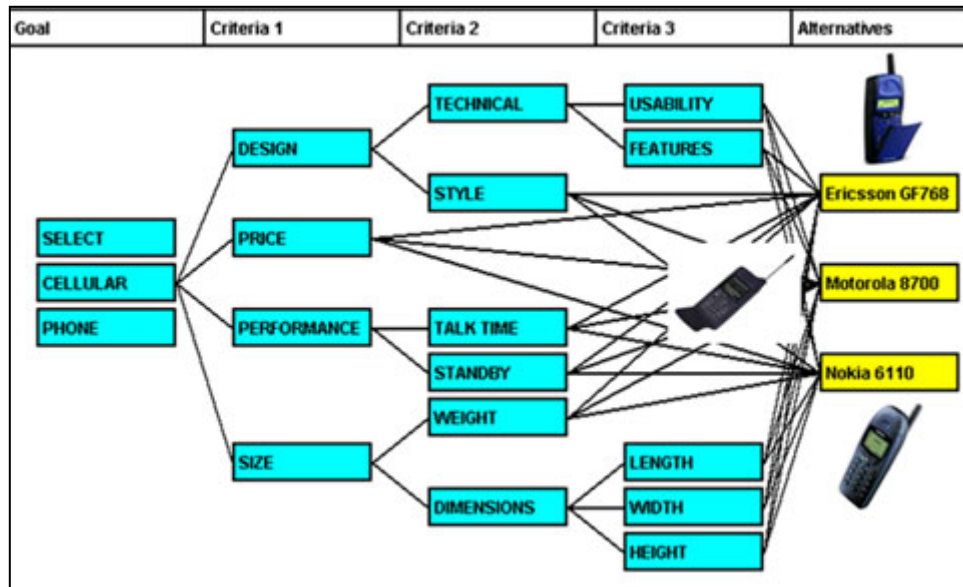
- kann die Konsistenz der Einzelvergleiche überprüfen (Aufdeckung von Zirkelbewertungen),
- erzwingt einen bewussten, dokumentierten Bewertungsprozess,
- differenziert präziser mit höherer Trennschärfe zwischen den Alternativen,
- beherrscht komplexe, hierarchisch voneinander abhängige Entscheidungsvorgänge.

Trotz der weitverbreiteten Anwendung der AHP-Methode, hat sie auch einige **Nachteile**:

- Die Konsistenzbedingung (konsistente Präferenzvergabe) ist schwer zu erreichen.
- Bei AHP besteht das Problem der Rangumkehr („Rank Reversal“). Dies bedeutet, dass sich bei Anwendung des AHP die Rangfolge der ursprünglich betrachteten Alternativen ändern kann, wenn dem Entscheidungsmodell Alternativen hinzugefügt bzw. Alternativen gestrichen werden, bei gleichzeitiger Beibehaltung aller anderen Bedingungen /FRE 09/, /OBE 10/.
- Eine weitere Schwäche ist die Ungenauigkeit und Ungewissheit der (subjektiven) Skala zur Bildung der paarweisen Vergleichsmatrizen /TER 15/.

Als **Anwendungsbeispiel** für AHP ist in Abb. 5.3 die Dekomposition der Problemstellung bei der Kaufentscheidung für ein Mobiltelefon dargestellt. Die dargestellten Kriterien (z. B. design) und Subkriterien (z. B. technical, style) werden sequentiell miteinander in Beziehung gesetzt. Als Alternativen stehen drei Produkte zur Auswahl, die anhand dieser Kriterien bewertet werden. Als Ergebnis wird die Entscheidung für eine der zur Verfügung stehenden Alternativen berechnet.





**Abb. 5.3** Auswahlentscheidung für ein Mobiltelefon /LÜT 08/

### 5.3.4 ANP (Analytic Network Process)

Eine bekannte Erweiterung des AHP stellt die ANP-Methode (Analytic Network Process) dar /SAA 01/, die häufig zur vergleichenden Bewertung der Nutzen („Benefits“), Chancen („Opportunities“), Kosten („Costs“) und Risiken („Risks“) angewendet wird. ANP ist eine allgemeinere Form des analytischen Hierarchieprozesses (AHP).

Im Gegensatz zu den hierarchisch angeordneten Kriterien vom Analytic Hierarchy Process (AHP), ermöglicht der ANP die Erstellung von Entscheidungsnetzen, die als Basis für die Berechnung von Supermatrizen dienen /CUR 19/. Durch die Netzwerkstruktur können alle denkbaren Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen abgebildet werden.

In AHP wird jedes Element der Hierarchie unabhängig von den anderen - die Entscheidungskriterien und Alternativen jeweils unabhängig voneinander - betrachtet. Jedoch besteht in vielen realen Fällen eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen den Elementen und den Alternativen, so dass der ANP in diesen Fällen als effektives Werkzeug eingesetzt werden kann.

Die Gründe zur Anwendung des ANP entsprechen weitgehend den Vorteilen des AHP. Dass beim ANP darüber hinaus Wechselbeziehungen und Feedback-Schleifen zulässig sind, wird als zusätzlicher Vorteil hinsichtlich der Flexibilität der Methode angesehen (siehe auch /HÄM 96/).

## 5.4 Outranking Methoden

Die im folgenden dargestellten Verfahren, gehören überwiegend zur Kategorie der Outranking-Verfahren. Wie die klassischen MADM-Verfahren haben Outranking-Verfahren das Ziel, die beste Option aus einer diskreten Anzahl an Alternativen zu bestimmen bzw. alle untersuchten Alternativen in eine (partielle) Rangfolge zu bringen. Outranking Methoden wurden entwickelt, um die Nachteile der klassischen Verfahren zu optimieren. Dem Entscheidungsträger müssen seine Präferenzen nicht vollständig bewusst sein. Die Vorteile liegen somit in dem erweiterten Präferenzbegriff und dem damit verbundenen Aufzeigen von Unvergleichbarkeiten (Inkonsistenz) zwischen Alternativen /GEL 14/. Outranking Methoden bieten zudem die Möglichkeit eine vollständige Kompensation von Kriterien-Ausprägungen zu vermeiden /OBE 10/. Die Verfahren ermöglichen die Berücksichtigung von Ungewissheiten sowohl bezüglich der Kriterien-Ausprägungen, als auch hinsichtlich menschlicher Präferenzvorstellungen. Zudem werden im Vergleich zu den klassischen Ansätzen in der Regel weniger Informationen vom Entscheidungsträger benötigt /OBE 10/.

Nach /HAR 06/ liegt das grundsätzliche Ziel der Outranking-Verfahren nicht in der Berechnung einer "optimalen" Planungsalternative oder Rankings, sondern im Aufzeigen von so genannten "Outranking-Relationen" zwischen den Planungsalternativen. Beispielfhaft werden die folgenden Methoden vorgestellt:

- PROMETHEE und
- Hasse-Diagramm.

### 5.4.1 PROMETHEE

Das PROMETHEE (**P**reference **R**anking **O**rganisation **M**ethod for **E**nrichment **E**valuations) Verfahren wurde in den 80er Jahren als Weiterentwicklung des Nutzwertverfahrens entwickelt /BRA 82/, /BRA 85/. Eine weitere wichtige Outranking-Methode neben PROMETHEE ist die ELECTRE- Methode (**E**limination **E**t **C**hoix **T**raduisant la **R**ealität). Dieses Kapitel beschränkt sich jedoch auf die Beschreibung der PROMETHEE Methode. Nach der ersten Vorstellung von PROMETHEE im Jahr 1982 /BRA 82/ existierten einige Jahre später schon verschiedene Abwandlungen der PROMETHEE-Methode, deshalb wird in /BEH 10/ auch von einer Methodenfamilie gesprochen. Grundsätzlich wird mit der **PROMETHEE I**-Methode eine partielle Rangfolge und mit **PROMETHEE-II** eine vollständige Rangfolge der Alternativen ermittelt.

In /GEL 14/ wird das grundsätzliche Vorgehen zur Anwendung des PROMETHEE Verfahrens vorgestellt. Zur Anwendung des Verfahrens muss bereits eine vollständige Entscheidungsmatrix (Tab. 5.8) vorliegen. Die für die Anwendung des Verfahrens erforderliche Entscheidungsmatrix, wird aus verschiedenen Alternativen und deren charakterisierenden Kriterien gebildet. Das heißt die Ermittlung der Alternativen, des Zielsystems, der Bewertungskriterien und deren Kriterienausprägungen sind bereits erfolgt. Grundsätzlich können folgende Verfahrensschritte zur anschließenden Anwendung des Verfahrens ausgewiesen werden /GEL 14/:

1. Definition und Ermittlung von Präferenzen.
2. Bestimmung der Outranking-Relation.
3. Erzielen einer Rangfolge.

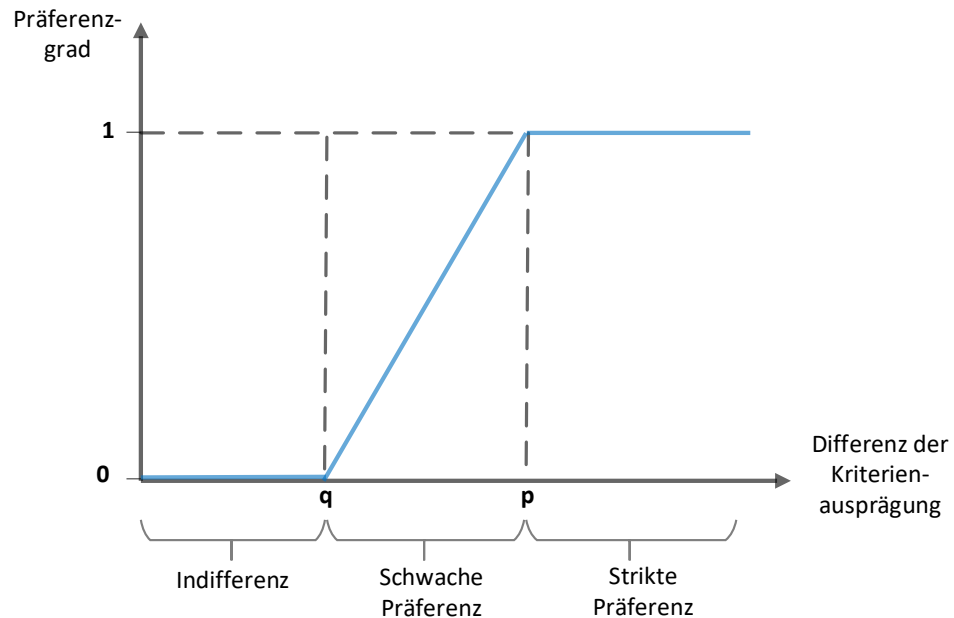
#### **1. Definition und Ermittlung von Präferenzen:**

Zunächst werden die einzelnen Alternativen paarweise verglichen und die Differenzen der einzelnen Kriterienausprägungen bestimmt /SIM 03/, /GEL 14/. Danach wird aus den Differenzen der Kriterienausprägungen die jeweilige Präferenz ermittelt. Präferenzen legen fest, wann ein mögliches Resultat eines Entscheidungsprozesses einem anderen vorgezogen wird. Diese Abhängigkeiten können durch Präferenzfunktionen ausgedrückt werden. Die Differenz der Kriterienausprägungen wird anhand einer Präferenzfunktion (Abb. 5.4) in einen Zahlenwert, welcher zwischen 0 (min. Bevorzugung bzw. Indifferenz) und 1 (max. Bevorzugung bzw. strikte Präferenz) liegt, umgewandelt. In Abhängigkeit der Differenz der Ausprägungen kann zwischen folgenden Präferenzbegriffen unterschieden werden:

- Indifferenz: beide Alternativen werden als gleichwertig betrachtet.
- schwache Präferenz: eine Alternative wird als mindestens gleichwertig betrachtet.
- strikter Präferenz: eine Alternative wird einer anderen konkret vorgezogen.

Der Schwellenwert, bis zu der eine Indifferenz vorliegt, wird in der Abb. 5.4 mit  $q$  und der Schwellenwert, ab der eine strikte Präferenz vorliegt, mit  $p$  gekennzeichnet. Es können zudem Wertspannen (Ungewissheiten) der Kriterienausprägungen zwischen diesen beiden Punkten in den Präferenzfunktionen ausgewiesen werden (schwache Präferenz).

Eine steigende Präferenz entspricht einer steigenden Differenzausprägung. Die Präferenzfunktion legt somit die Bevorzugung zwischen den Alternativen unter Berücksichtigung eines bestimmten Kriteriums bzw. dessen Differenzausprägung fest /GEL 14/.



**Abb. 5.4** Aufbau einer Präferenzfunktion (verändert nach /GEL 14/)

Die Auswahl der Präferenzfunktion und deren Schwellenwerte durch den Entscheidungsträger, stellt eine wesentliche Herausforderung im PROMETHEE Verfahren dar. Nach /GEL 14/ existieren verschiedene Ansätze, die Schwellenwerte der Funktion zu bestimmen. Zum Beispiel kann der Schwellenwert  $p$  aus der Differenz der besten und schlechtesten Ausprägung eines Kriteriums ermittelt werden. Der Indifferenzwert  $q$  kann anhand der Standardabweichung der Differenzen im Rahmen der einzelnen paarweisen Vergleiche bestimmt werden.

Grundsätzlich werden folgende sechs allgemeine Präferenzfunktionen vorgeschlagen (Für weitere Informationen siehe /GEL 14/).

1. Gewöhnliches Kriterium,
2. Quasi-Kriterium,
3. Kriterium mit linearer Präferenz,
4. Stufen-Kriterium,
5. Kriterium mit linearer Präferenz und Indifferenzbereich,
6. Gauß'sches Kriterium.

Die Tab. 5.5 zeigt beispielhaft eine Entscheidungsmatrix für die PROMETHEE-Methode. Aus den jeweiligen Kriterienausprägungen der einzelnen Alternativen müssen durch einen paarweisen Vergleich die Kriteriendifferenzen errechnet werden.

**Tab. 5.5** Beispielhafte Entscheidungsmatrix mit Beispielwerten (ohne Bedeutung)

<b>Kriterien</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
<b>Gewichtung</b>	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3
<b>Präferenzfunktion</b>	Type 3	Type 1	Type 4	Type 5	Type 2
<b>q</b>	3	1	4	20	0,1
<b>p</b>	22	6	7	30	0,7
<b>Alternative A</b>	33	2	5	15	0,6
<b>Alternative B</b>	7	10	12	25	1,05
<b>Alternative C</b>	15	5	2	28	0,4
<b>Alternative D</b>	29	0,5	6	12	0,2
<b>Alternative E</b>	10	11	22	7	0,05

## 2. Bestimmung der Outranking-Relationen

Aus dem paarweisen Vergleich der unterschiedlichen Alternativen und der Bestimmung der Präferenzwerte wird zunächst eine so genannte lokale Präferenzmatrix erstellt.

Aus den lokalen Präferenzen werden nachfolgend globale Präferenzen, sog. Outranking Relationen erzeugt, siehe Gleichung (5.1). Die Outranking-Relationen  $\pi(a, b)$  werden durch die Multiplikation der lokalen Präferenzen  $P$  mit den ermittelten Kriteriengewichten  $\omega$  und der nachfolgenden Addition mit der entsprechenden lokalen Präferenz erhalten /SIM 03/.

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n \omega_j P_j(a, b) \quad (5.1)$$

Zur Bestimmung der Kriteriengewichte empfiehlt es sich zunächst eine Kriterienhierarchie, basierend auf dem erstellten Zielsystem zu erstellen. Dadurch kann eine erste Unterteilung der Kriterien in Bezug auf die Zielerreichung untersucht werden.

Zur Ermittlung der Kriteriengewichtung gibt es eine Reihe an verschiedenen Methoden, die alle ihre Vor- und Nachteile haben und mehr oder weniger mit der Anwendung einer bestimmten Methode verbunden sind. Zur Bestimmung von (subjektiven) Kriteriengewichtungen können zum Beispiel Methoden, wie SMART, SWING oder SIMOS angewendet werden /GEL 14/. Die **SMART-Methode** wird im Kap. 5.3.1 beschrieben.

Gewichte haben einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Entscheidungsfindung und sind zudem subjektiv beeinflusst. Zur Überprüfung der Annahmen sollten daher Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden /GEL 14/, /RÖH 15/.

## 3. Erzielen einer Rangfolge

Um zu einem Gesamtvergleich der Alternativen zu gelangen, werden die Zeilen und Spalten der Outranking-Relationen (siehe Tab. 5.6) zu einem positiven ( $\Phi^+$ ) und einem negativen ( $\Phi^-$ ) Outrankingfluss zusammengefasst. Die Diagonale ist aufgrund der vorherigen Differenzenbildung 0.

**Tab. 5.6** Beispielhafte Matrix für die Outranking Relationen und die Präferenzflüsse

	A1	A2	A3	A4	A5	$\Phi^+$
A1	0					
A2		0				
A3			0			
A4				0		
A5					0	
$\Phi^-$						

Nach /SIM 03/ wird durch die Bildung der Zeilensumme (positiver Outrankingfluss  $\Phi^+$ ) die Dominanz einer Alternative zu anderen ermittelt, bzw. welche Alternative die am wenigsten schlechten Ergebnisse gegenüber den anderen Alternativen aufweist, siehe Gleichung (5.2).

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{1-n} \cdot \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (5.2)$$

Die Spaltensumme (negativer Outrankingfluss  $\Phi^-$ ) macht Aussagen darüber welche Alternative die am wenigsten schlechten Ergebnisse aufweist, siehe Gleichung (5.3).

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{1-n} \cdot \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (5.3)$$

Grundsätzlich wird durch die PROMETHEE I-Methode eine partielle Rangfolge der Alternativen ermittelt. Die Besonderheit einer partiellen Rangfolge ist, dass neben einer Präferenz und Indifferenz auch Unvergleichbarkeiten zwischen Alternativen dargestellt werden können. Eine Unvergleichbarkeit resultiert aus dem parallelen Vergleich der Outrankingflüsse. Eine Präferenz liegt vor, wenn eine Alternative sowohl einen positiven als auch negativen Outrankingfluss aufweist. Sollte der Outrankingfluss zwischen zwei Alternativen zwar positiv aber nicht negativ ausfallen (oder umgekehrt), so liegt Unvergleichbarkeit vor /GEL 14/.

Die **PROMETHEE II**-Methode gibt anstatt einer partiellen Rangfolge eine absolute Rangordnung der Alternativen aus. Die zunächst „partielle“ Ordnung aus Zeilen- und Spaltensumme wird in eine „absolute“ Ordnung überführt. Dies geschieht durch die Subtraktion der Spaltensummen mit den Zeilensummen für jede Alternative. Hieraus resultiert die eigentliche Rangfolge der Alternativen (für Beispiele siehe /SIM 03/ oder /HAR 06/). Die

partielle Ordnung kann zur besseren Übersicht zudem in einem Hasse-Diagramm (Kap. 5.4.2) dargestellt werden.

Es wird empfohlen immer beide Varianten PROMETHEE I und II anzuwenden. Für die Berechnung der Rangordnung findet in PROMETHEE II ein höheres Aggregationsniveau statt und es können Kompensationseffekte zwischen positiven und negativen Kriterien-Ausprägungen auftreten. Die vollständige Rangfolge nach PROMETHEE II kann somit nur dann unmissverständlich interpretiert werden, wenn auch die partielle Rangfolge nach PROMETHEE I bekannt ist /OBE 10/.

Es ist zu beachten, dass bei Methoden wie z. B. dem PROMETHEE Verfahren, welche auf paarweisen Vergleichen beruhen, eine Hinzu- oder Wegnahme von Alternativen zu einer Änderung des relativen Rankings (Rank Reversal) zwischen den Alternativen führen können /GEL 14/. Dies wäre auch im Standortauswahlverfahren möglich, weil sich durch die fortentwickelnde Datenlage in den einzelnen Phasen möglicherweise die Bewertung einzelner Alternativen ändert. Insbesondere sollte nach erfolgter Aggregation bzw. Erstellung einer Rangfolge die Ergebnisse mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen auf ihre Stabilität hinsichtlich der getroffenen Annahmen und der subjektiven Einschätzungen des Entscheidungsträgers überprüft werden. Sie stellen eine wichtige Grundlage zur Entscheidungsunterstützung dar. Subjektive Entscheidungen betreffen insbesondere die Ausweisung von Gewichtungen und der Präferenzfunktion. Im Zuge der Sensitivitätsuntersuchungen empfiehlt es sich zum Beispiel Bandbreiten von Gewichtungen für unterschiedliche Kriterien anzuwenden und deren Einfluss auf das Ergebnis zu untersuchen. Zudem können unterschiedliche Präferenzfunktionen angewendet werden /GEL 14/.

Es wurden zudem weitere Methoden in der PROMETHEE-Familie entwickelt /BRA 86/:

- In **PROMETHEE III** werden Intervalle anstelle der Flüsse berücksichtigt, um die Rolle der Indifferenz in den Rankings hervorzuheben. Die Methode erstellt entweder Präordnungen oder allgemein Intervallordnungen für eine endliche Menge von Alternativen.
- Die **PROMETHEE IV**-Methode löst ein Entscheidungsproblem für eine unendliche Reihe von Alternativen.



## 5.4.2 Hasse-Diagramm

/GUT 15/ untersucht den Einsatz multikriterieller Analysemodelle für den Vergleich von Endlagerstandorten. Nach /GUT 15/ können grundsätzlich zwei Gruppen von multikriterieller Analysemodellen unterschieden werden:

- Verfahren der Entscheidungsfindung und
- Verfahren der Entscheidungsunterstützung.

Bei der Entscheidungsfindung wird eine einzige (absolute) Rangfolge der Alternativen erstellt. Der Entscheidungsträger muss keine Abwägungen mehr durchführen. Bei der Entscheidungsunterstützung wird die Komplexität der Informationen abgebaut und aufbereitet, die letztendliche Entscheidung wird vom Entscheidungsträger getroffen.

Als Beispiel für ein Verfahren, mit dem auf Basis einer Entscheidungsmatrix eine Entscheidungsunterstützung erfolgen kann, wird die so genannte Hasse-Diagrammtechnik vorgestellt. Sie wird den Outranking-Verfahren zugerechnet. Nach /OTT 12/ werden mit dem Verfahren Alternativen allein durch deren Eigenschaften sortiert und es werden keine Gewichtungsfaktoren benötigt.

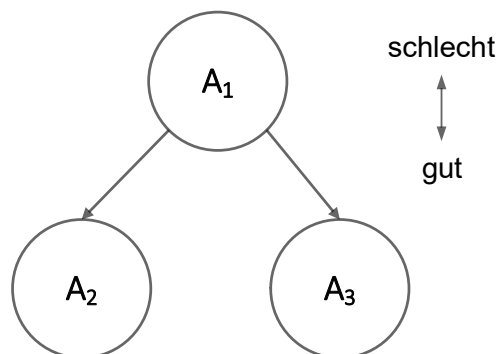
Die vergleichende Bewertung erfolgt anhand einer Entscheidungsmatrix (Tab. 5.7), welche die zu bewertenden Alternativen  $a_1, a_2, \dots, a_n$  mit den charakterisierenden Bewertungskriterien bzw. Indikatoren  $q_1, q_2, \dots, q_n$  enthält. Die Alternativen werden mit den Bewertungskriterien als so genannte Tupel  $q(a) = (q_1(a), q_2(a), \dots, q_n(a))$  definiert. Es werden Paarvergleiche durchgeführt, welche die Alternativen in der Reihenfolge von „gut“ nach „schlecht“ ordnen. Eine Alternative wird in einem Vergleich als besser ausgewiesen, wenn sie in allen Kriterien besser oder gleich bewertet wurde. Wird eine Alternative bezüglich eines Kriteriums besser und bezüglich eines anderen Kriteriums schlechter als eine andere Alternative bewertet, so werden beide Alternativen als miteinander unvergleichbar nebeneinander gestellt /GUT 15/. Aus diesen Vergleichen wird dann eine so genannte partielle Rangfolge der Alternativen erstellt.

Unter der Voraussetzung, dass hohe Zahlenwerte eine ungünstige Beurteilung eines Kriteriums darstellen, ist die Alternative  $A_1$  als schlechter im Gegensatz zu  $A_2$  und  $A_3$  einzuordnen (Tab. 5.7). Die Alternativen  $A_2$  und  $A_3$  sind unvergleichbar, da keine Aussage über besser oder schlechter gemacht werden kann /SIM 03/.

**Tab. 5.7** Beispiel einer Entscheidungsmatrix

Optionen	Kriterien		
	q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	q <sub>3</sub>
A <sub>1</sub>	1	2	1
A <sub>2</sub>	1	1	0
A <sub>3</sub>	0	1	1

Die Daten können zudem zur Veranschaulichung in einem Hasse-Diagramm dargestellt werden (Abb. 5.5). Ein Kreis repräsentiert in dem Diagramm eine Alternative. In einer vertikalen Ausrichtung befinden sich oben die schlechtesten und unten die besten Alternativen. Eine Verbindungslinie bringt zum Ausdruck, dass zum Beispiel A<sub>2</sub> oder A<sub>3</sub> in allen Kriterien besser bewertet wurden als A<sub>1</sub>. Alternativen, die nicht durch Linien verbunden sind, können laut Definition nicht miteinander verglichen werden bzw. es müssen andere Verfahren zur weiteren Einordnung gewählt werden. Wenn alle Alternativen unvergleichbar nebeneinanderstehen, liegt eine so genannte Antikette vor. Sie bietet keine Hilfestellung und es müssen andere Verfahren zur Bewertung gewählt werden /SIM 03/.



**Abb. 5.5** Beispiel eines Hasse-Diagramms (basierend auf Tab. 5.7)

Mit der Zunahme an Bewertungskriterien nimmt auch die Menge an Unvergleichbarkeiten zu bis zu einem Punkt, an dem keine Vergleichbarkeiten mehr bestehen. Anhand der Bewertungsgröße „Stabilität“ kann das Verhalten unter Hinzunahme oder dem Entfernen von Bewertungskriterien untersucht werden. Zudem kann durch eine Sensitivitätsanalyse, die unterschiedliche Bedeutsamkeit der Kriterien auf die Rangfolge der Alternativen untersucht werden. Zur Erstellung und Auswertung von Hasse-Diagrammen kann die Software PyHasse-exp oder PyHasse-inet verwendet werden /GUT 15/. Sie bietet zudem die Möglichkeit die Beeinflussung der Bewertungsergebnisse durch die Größe und das Vorhandensein der unterschiedlichen Kriterien zu beurteilen.

## 5.5 Weitere Methoden und Verfahren

Im Folgenden werden weitere Verfahren beschrieben, welche zur Identifizierung von Vor- und Nachteilen von unterschiedlichen Handlungsalternativen angewendet werden können. Diese gehören methodisch nicht in die vorherigen Klassifizierungen. Die verbal-argumentative Methode zum Beispiel kann zu den „nicht-formalisierten“ Methoden gezählt werden (siehe Kap. 4.3.2). Die Malus-Bilanzierung und der direkte Vergleich und Darstellung als Stärken-Schwächen-Profil, wurden im schweizerischen Standortauswahlverfahren angewendet. Die ökologische Risikoanalyse stellt einen Sonderfall dar. Sie ist keine eigentliche Abwägungs-/Vergleichsmethode, sondern sie wird in der Regel für Umweltverträglichkeitsuntersuchungen herangezogen. Da diese Methode im Umweltbereich häufig angewendet wird, wird sie hier trotzdem beschrieben. Folgende Methoden werden beschrieben:

- Direkter Vergleich,
- Malus-Bilanzierung,
- Verbal-argumentative Methode und die
- Ökologische Risikoanalyse.

### 5.5.1 Direkter Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken-Schwächen-Profil

In /ZUI 14/ wird ein Verfahren beschrieben, welches einen direkten Vergleich von Bewertungsergebnissen durchführt, um für die vorhandenen Alternativen - bezüglich der bewertungsrelevanten Merkmale und Indikatoren - eindeutige Nachteile zu identifizieren. Anhand der Bewertungsergebnisse werden zusätzlich die Stärken und Schwächen der Alternativen identifiziert (Stärken-Schwächen-Profil). Das verwendete Verfahren in /ZUI 14/ lässt sich wie folgt beschreiben.

Zunächst wurden Nutzwerte durch eine Nutzwertanalyse für verschiedene Kriterien bestimmt. Danach erfolgt eine Aggregation der Nutzwerte für die bewertungsrelevanten Indikatoren, siehe Gleichung (5.4). Die Aggregation erfolgt zum einen mit einer Gleichgewichtung aller Indikatoren innerhalb eines Merkmals und zum anderen wird das Minimum der Bewertungen aller Indikatoren innerhalb eines Merkmals bestimmt.

Aus den Ergebnissen können Hinweise auf eindeutige Nachteile (von unterschiedlichen Kriterienausprägungen) durch einen direkten Vergleich der Alternativen, wie folgt bestimmt werden: Wenn die Bewertung einer Alternative für ein Kriterium oder für einen Indikator (z. B. um mindestens zwei Bewertungsstufen) tiefer liegt als die Bewertung der besten Vergleichsalternative für dasselbe Kriterium oder für denselben Indikator, so wird dies als Hinweis auf einen (eindeutigen) Nachteil interpretiert.

Aus den Bewertungsergebnissen können zusätzlich auch Stärken-Schwächen-Profile abgeleitet werden. Diese werden folgendermaßen ermittelt: Die beste Bewertungsstufe wird als Stärke interpretiert, die beiden schlechtesten als Schwächen. Die mittlere Bewertungsstufe wird indifferent, d. h. weder als Stärke noch als Schwäche, interpretiert.

Es wird keine Kompensation beim Vergleich der Bewertungen für die als wichtig angesehenen Indikatoren vorgenommen. Für einen Vergleich der Bewertungen für die als wichtig angesehenen Merkmale, kann bei der vorherig durchgeführten Aggregation der Bewertungen für die zugehörigen Indikatoren, volle Kompensation zugelassen sein.

Mathematisches Modell:

$$V_{n,m} = \sum_{i=1}^{I_m} w_{m,i} v_{n,i} \quad (5.4)$$

$V_{n,m}$  Aggregierter Nutzwert der Alternative  $n$  für das bedeutende Merkmal  $m$  [-]

$v_{n,i}$  Nutzwert der Alternative  $n$  für den Indikator  $i$  [-]

$w_m$  Gewichtungsfaktoren [-]

Annahme bei Gleichgewichtung:  $w_{m,i} = I_m^{-1}$  (Anzahl Indikatoren, die dem Merkmal  $m$  zugeordnet sind).

Eine Alternative  $n'$  weist gegenüber einer Alternative  $n$  bezüglich des bedeutenden Indikators  $i$  einen Hinweis auf einen eindeutigen (bzw. einen vertieft zu prüfenden) Nachteil auf, falls  $v_{n,i}^* - v_{n',i}^* \geq 2$  (bzw.  $\geq 1$ ). Analog weist eine Alternative  $n'$  gegenüber einer Alternative  $n$  bezüglich des bedeutenden Merkmals  $m$  einen Hinweis auf einen eindeutigen (bzw. einen vertieft zu prüfenden) Nachteil auf, falls  $V_{n,m}^* - V_{n',m}^* \geq 2$  (bzw.  $\geq 1$ ). Die mit \* versehenen Größen bezeichnen abgerundete (trunkierte) Werte.

Eine Alternative  $n$  weist bezüglich des Indikators  $i$  bzw. Merkmals  $m$  eine Stärke auf, falls  $v_{n,i} \geq 4$  bzw.  $V_{n,m} \geq 4$ . Analog weist eine Alternative  $n$  bezüglich des Indikators  $i$  bzw. Merkmals  $m$  eine Schwäche auf, falls  $v_{n,i} < 3$  bzw.  $V_{n,m} < 3$ .

## 5.5.2 Malus-Bilanzierung

Die von der Nagra in /ZUI 14/ (Anhang D) neu entwickelte und verwendete Malus-Bilanzierung diente dem Ziel, für die vorhandenen Alternativen bezüglich der bedeutenden Merkmale und Indikatoren eindeutige Nachteile zu identifizieren.

Das Verfahren lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Die ersten 3 Teilschritte (hier nicht aufgeführt) entsprechen exakt dem Vorgehen beim direkten Vergleich der Bewertungen (vgl. Kap. 5.5.1).
- Bei der Malus-Bilanzierung - siehe Gleichung (5.5) und (5.6) - erfolgt ein individueller Vergleich der Nutzwerte für die Kriterien der Alternativen mit absoluten Schwellenwerten. Bei Unterschreitung eines Schwellenwerts ergibt sich ein Malus, welcher der Differenz zwischen Schwellenwert und Nutzwert entspricht. Wenn der Malus für ein Merkmal oder Indikator grösser als 0,4 ist (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 kann basierend auf einer Expertenbeurteilung gewählt werden.
- Es findet keine Kompensation der Bewertungen auf Stufe der „bedeutenden“ Indikatoren statt. Für die Aggregation der Bewertungen der bedeutenden Indikatoren auf der Stufe der bedeutenden Merkmale kann eine volle Kompensation zugelassen werden.

Mathematisches Modell:

$$\Omega_{n,m} = \begin{cases} S_m - V_{n,m} & \text{falls } S_m > V_{n,m} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\omega_{n,i} = \begin{cases} s_i - v_{n,i} & \text{falls } s_i > v_{n,i} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.6)$$

$\Omega_{n,m}$  Malus der Alternative  $n$  bzgl. des entscheidrelevanten Merkmals  $m$  [-]

$\omega_{n,i}$  Malus der Alternative  $n$  bzgl. des entscheidrelevanten Indikators  $i$  [-]

$S_m$  Schwellwert für das Merkmal  $m$  [-]

$s_i$  Schwellwert für den Indikator  $i$  [-]

Eine Alternative  $n$  weist bezüglich des entscheidrelevanten Indikators  $i$  einen Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil auf, falls  $\omega_{n,i} \geq 0,4$  und falls eine Alternative  $n'$  mit  $\omega_{n',i} \geq 0$  existiert. Analog weist eine Alternative  $n$  bezüglich des entscheidrelevanten Merkmals  $m$  einen Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil auf, falls  $\Omega_{n,m} \geq 0,4$  und falls eine Alternative  $n'$  mit  $\Omega_{n',m} = 0$  existiert.

### 5.5.3 Verbal-argumentative Methode

Die Bewertung durch eine verbal-argumentative Abwägung erfolgt ausschließlich durch Argumentation und nicht durch arithmetische oder logische Aggregation /FOR 15/. Für diese Methoden ist kein ausformuliertes Zielsystem erforderlich (vgl. /HÜB 89/ S. 131 und /EBE 89/, S. 264). Die Bewertung erfolgt aus der Erfahrung und dem persönlichen Wertesystem des Entscheidungsträgers und beruht auf rein subjektiven, individuellen und teils emotional beeinflussten Einschätzungen und Überzeugungen. Dies birgt die Gefahr, dass nicht alle Wirkungsdimensionen und -zusammenhänge beachtet oder zumindest entsprechend gewürdigt werden. Ein weiteres Problem ist die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen, da Argumente, die zur Urteilsbegründung geführt haben, u. U. nicht immer nachvollziehbar sind (vgl. /SCH 05/). Verschiedene Alternativen können anhand einer verbal-argumentativen Methode in Klassen wie ‚geeignet‘, ‚bedingt geeignet‘, ‚weniger geeignet‘ oder ‚nicht geeignet‘ unterteilt werden (vgl. /MÜL 07/ S. 24). Verbal-argumentative Methoden eignen sich insbesondere für die Bewertung von nicht oder kaum quantifizierbaren Kriterien (z. B. der Robustheit). Es erfolgt keine quantitative Aggregation von Einzelwerten. Somit wird keine Genauigkeit durch exakte Zahlenwerte vorgetäuscht, die sich durch eine unzureichende Datenlage und einem Mangel an Wissen über Wirkungszusammenhänge nicht rechtfertigen lässt.

Die **Nachteile** der verbal-argumentativen Methode liegen in der bewussten oder unbewussten Überbewertung einzelner Kriterien (z. B. in Bezug auf die Robustheit) und durch eine mehr oder weniger begründete Auswahl von Kriterien. Aufgrund der geringen Formalisierung sind die Vollständigkeit und Objektivität des Bewertungsprozesses stark abhängig von dem Know-how der bewertenden Personen. Zudem ist aufgrund des geringen Formalisierungsgrades eine Reproduzierbarkeit des Bewertungsprozesses, zum Beispiel durch einen weiteren Entscheidungsträger, nicht gewährleistet. Eine Kombination von verbal-argumentativen Methoden mit quantitativen Methoden, kann für die abschließende Gesamtbewertung sinnvoll und hilfreich sein /ZAM 02/.

Nach /FÜR 08/ ist die heutige Bewertungspraxis gekennzeichnet durch einen Methodenmix. Dieser besteht aus Checklisten, Bilanzierung, Relevanzbaum, Präferenzmatrix, Raumempfindlichkeitsuntersuchung, Ökologischer Risikoanalyse und verbal-argumentativen Methoden. Zudem können bei Bewertungen mit verbal-argumentativen Methoden, verschiedene Verfahrensschritte zur Anwendung kommen, wie Rangordnung, schrittweise Rückstellung und Paarvergleich. Die Auswahl der Methoden ist abhängig von der Komplexität und der Datenverfügbarkeit. Die verbal-argumentative Methode ist in der Regel ein wichtiges Mittel zur Nachvollziehbarkeit von zusammenfassenden Bewertungen im Sinne einer integrativen Gesamtbewertung.

Forschungsvorhaben in Deutschland, welche sich mit einer verbal-argumentativen Abwägung von konkreten Standorten für die Wirtsgesteine Salz- und Tonstein befassen, sind VerSi /FIS 10/ (s. Kap. 4.1.1) und das Nachfolgeprojekt VerSi 2 /FIS 17/, in dem zusätzlich eine Anwendung der Methode auf kristalline Standorte überprüft wurde (s. Kap. 4.1.2). In der Entscheidungstheorie hat sich für verbal argumentative Methoden ein eigenes Forschungsfeld entwickelt (siehe hierzu /MOS 16/).

#### **5.5.4 Ökologische Risikoanalyse**

Die ökologische Risikoanalyse nach /BAC 78/ wird u. a. zur Beurteilung der ökologischen Nutzungsverträglichkeit bei unvollständiger Information eingesetzt. Das Verfahren wird verwendet, um Gefahren bei Eingriffen in die Natur und den Landschaftshaushalt (das Beziehungs- und Wirkungsgefüge zwischen Lebewesen und Geoökofaktoren in einer Landschaft und zwischen benachbarten Landschaftsräumen) abschätzen zu können. Mit Hilfe der ökologischen Risikoanalyse soll ermittelt werden, wie sich das Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes durch Beeinträchtigungen verändert und das Risiko dauerhafter Umweltfolgen steigt.

Es erfolgt eine Beurteilung durch die Bildung der drei Aggregationsgrößen Beeinträchtigungsintensität, Beeinträchtigungsempfindlichkeit und Risiko der Beeinträchtigung. Unter Beeinträchtigungen werden Änderungen von Quantitäten und Qualitäten natürlicher Ressourcen verstanden, die nach Art und Ausmaß die Befriedigung der Ansprüche an natürliche Ressourcen erheblich erschweren oder unmöglich machen. Um den Zusammenhang zwischen „Verursacher-Auswirkung-Betroffener“ zu untersuchen, teilt sich das Verfahren in die Untersuchung der Betroffenen und der Verursacher auf.

Dabei werden zunächst die Betroffenen (die natürlichen Faktoren), dann die Verursacher (die Nutzungsansprüche) untersucht. Die Einschätzung der Beeinträchtigungsintensität und Beeinträchtigungsempfindlichkeit wird durch die Bildung von Relevanzbäumen oder Begründungstabellen hergeleitet. Das Risiko der Beeinträchtigung ergibt sich aus der Verknüpfung der beiden hergeleiteten Größen anhand einer Präferenzmatrix /SCH 06/.

Die ökologische Risikoanalyse, wird z. B. im Zuge der Umweltverträglichkeitsprüfung als Standardmethode in der Verkehrsplanung eingesetzt /ZAM 02/.

## **5.6 Berücksichtigung von Unsicherheiten/Ungewissheiten**

Für Entscheidungssituationen, in denen die zukünftigen Umweltzustände nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden können, sind die möglichen Auswirkungen bestimmter Alternativen nicht vollständig bekannt. Zudem ist die Aussagefähigkeit eines Vergleiches von Alternativen, insbesondere abhängig von der Qualität der Eingangsdaten, welche zur Bewertung der Entscheidungssituation verwendet wurden. Es können folgende Unsicherheiten unterschieden werden /GEL 14/:

- Die Datengrundlage ist u. U. mit Unsicherheiten behaftet,
- Empirische erhobene Daten können aufgrund subjektiver Einflüsse oder unvollständigem Wissen mit Unsicherheiten behaftet sein (z. B. Erhebung der Präferenzen und Kriteriengewichte) und
- Messfehler.

Aus den oben genannten Unsicherheiten ergeben sich unterschiedliche Erwartungshaltungen bezogen auf eine Entscheidungssituation. Nach /LAU 12/ werden deshalb folgende Erwartungsstrukturen unterschieden, nämlich Entscheidung unter:



- **Sicherheit:** Die Ausprägungen also die entscheidungsrelevanten Daten sind bekannt. Für jede Alternative ist das Ergebnis bekannt.
- **Unsicherheit:** Mindestens zwei Zustände sind möglich. Es werden drei Grenzfälle unterschieden:
  - **Ungewissheit** – Der Entscheider kann kein Wahrscheinlichkeitsurteil über die möglichen Umweltzustände angeben. Es können nur Aussagen gemacht werden ob Zustände überhaupt eintreten.
  - **Risiko** – der Entscheider kann den denkbaren Zuständen Eintrittswahrscheinlichkeiten zuordnen.

Als Beispiel zur Unterscheidung von Ungewissheit und Risiko wird in /GEL 14/ folgendes Beispiel aufgeführt:

*„Ein gutes Beispiel zur Verdeutlichung stellt eine Tombola dar: Ein Behälter ist mit zwanzig Kugeln gefüllt, die entweder rot (Gewinn) oder schwarz (Niete) sind. Wird im vornherein gesagt, dass jeweils 10 Kugeln rot und 10 Kugeln schwarz sind, so liegt Risiko vor. Wir wissen um die Wahrscheinlichkeit, mit der wir gewinnen können. Sie liegt in diesem Falle bei 50%. Ist die Anzahl roter und schwarzer Kugeln jedoch gänzlich unbekannt, so besteht Ungewissheit.“*

In der einschlägigen Literatur (vgl. z. B. /LAU 12/) wird in der Regel von Unsicherheiten gesprochen. In der Verordnung nach /BMU 19c/ wird von Ungewissheiten gesprochen, welche jedoch in der Entscheidungstheorie eine spezielle Bedeutung hat. In /BMU 19c/ ist keine genaue Definition der Ungewissheit aufgeführt. Für dieses Kapitel werden die in /LAU 12/ beschriebenen Definitionen verwendet. Für den Bericht wird grundsätzlich der Begriff „Ungewissheit“ verwendet, auch wenn dieser unter Umständen von der Definition in der Entscheidungstheorie abweicht.

Zur Berücksichtigung von Ungewissheiten in der Anwendung von MADM-Methoden, wird der Ansatz der Szenarienanalyse angewendet. In der Szenarienanalyse werden zukünftige Entwicklungen der Umweltbedingungen und deren potentielle Auswirkungen auf die Kriterienausprägungen untersucht. Umweltbedingungen bzw. **Umweltzustände** sind Größen, die die Ergebnisse der Alternativen beeinflussen aber keine Entscheidungsvariablen des Entscheidungsträgers darstellen, bzw. die der Entscheider nicht be-

einflussen kann. Nach /LAU 12/ werden zur Beschreibung der Umweltzustände „entscheidungsrelevante Daten“ unterschieden. Entscheidungsrelevante Einflüsse können zum Beispiel Wetterereignisse in der Landwirtschaft sein. Es werden unterschiedliche Szenarien erstellt, für die in der Regel bestimmte Kriterienausprägungen variiert werden. Für die konkrete Ermittlung von Szenarien existiert laut /GEL 14/ kein allgemein gültiger Ansatz.

In der Tab. 5.8 ist beispielhaft eine Ergebnismatrix mit der Eintrittswahrscheinlichkeit der betreffenden Umweltzustände  $w(S_s)$  aufgeführt (Entscheidungsproblem bei Risiko). Die einzelnen Handlungsalternativen werden mit  $A_1, A_2, \dots$  und die Anzahl der möglichen Alternativen mit  $N_A$  bezeichnet. Die Menge der relevanten Alternativen wird mit  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{N_A}\}$  ausgedrückt. Unterschiedliche Umweltzustände werden mit  $S_1, S_2, \dots$  und die (endliche) Anzahl der „möglichen“ Umweltzustände mit  $N_S$  bezeichnet. Die Menge der möglichen Umweltzustände wird durch  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_S}\}$  ausgedrückt /LAU 12/.

**Tab. 5.8** Ergebnismatrix /GIL 18b/

	$w(S_1)$	$w(S_2)$	...	$w(S_s)$	...	$w(S_{N_S})$
	$S_1$	$S_2$	...	$S_s$	...	$S_{N_S}$
$A_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1s}$	...	$x_{1N_S}$
$A_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2s}$	...	$x_{2N_S}$
.	.	.		.		.
.	.	.		.		.
$A_a$	$x_{a1}$	$x_{a2}$	...	$x_{as}$	...	$x_{aN_S}$
.	.	.		.		.
.	.	.		.		.
$A_{N_A}$	$x_{N_A1}$	$x_{N_A2}$	...	$x_{N_As}$	...	$x_{N_A N_S}$

$A_a$  = Alternative  $a$  ( $a = 1, 2, \dots, N_A$ ),  $S_s$  = Umweltzustand  $s$  ( $s = 1, 2, \dots, N_S$ ),  $w(S_s)$  = Eintrittswahrscheinlichkeit des betreffenden Zustands,  $x_{as}$  = Ergebnis der Alternative  $A_a$  im Zustand  $S_s$ .

Neben der Ungewissheit und dem Risiko kann eine weitere Definition der Ungewissheit ausgewiesen werden, die Unschärfe (engl. Fuzzy). Wenn der Entscheider sich sicher ist, dass eine Auswirkung eintritt, sich aber unsicher über die Ausprägung ist, dann liegt Unschärfe vor (z. B. liegt ein Wert zwischen 0 und 10).

Es können verschiedene „Unschärfen“ unterschieden werden /GEL 14/:

- Intrinsicische Unschärfe: bezüglich eines Kriteriums kann die Ausprägung und deren Messung nicht klar voneinander abgegrenzt werden.
- Informationelle Unschärfe: die relevanten Daten sind zur exakten Bestimmung nicht exakt messbar (Messfehler). Weiterhin können sich durch einen dynamischen Prozess (zeitliche Veränderung) die Daten ändern und daher nicht exakt vorhergesagt werden.

Für die Berücksichtigung von Unschärfe in multikriteriellen Methoden, kann der so genannte Fuzzy-Ansatz angewendet werden. Diese Methode wurde erstmals von Zadeh /ZAD 65/ entwickelt, um Unsicherheiten in Bezug auf Kriterienausprägungen zu identifizieren und zu beschreiben. Mit dem Ansatz soll es ermöglicht werden, scharfe ("non fuzzy") und unscharfe ("fuzzy") Daten formal exakt zu behandeln. Der Grundgedanke der Fuzzy-Theorie basiert auf der Annahme, dass jedes Element mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu einer bestimmten Menge gehört oder nicht. Damit kann jedes Element mit einem Zugehörigkeitswert (Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit) bzw. einer Zugehörigkeitsfunktion zwischen Null und Eins charakterisiert werden /GRA 19/, /ZAD 65/. In diversen MCDM-Methoden wurde der Fuzzy-Ansatz bereits integriert bzw. kombiniert (z. B. Fuzzy-PROMETHEE oder Fuzzy-AHP).

Von /HAD 18/ wurde zudem ein Ansatz zur Auswahl von multikriteriellen Methoden entwickelt, mit der die am besten geeignete Methode ausgewählt werden kann, wenn Risiken und Unsicherheiten in dem Entscheidungsproblem zu erwarten sind.

### **Sensitivitätsanalyse**

Die Sensitivitätsanalyse ist zwar keine Vergleichsmethode, sie ist jedoch ein wichtiges Hilfsmittel zur Überprüfung der Bewertungsergebnisse. Mit der Sensitivitätsanalyse kann grundsätzlich der Zusammenhang zwischen Ergebnissen und den Eingangsparametern untersucht werden. Eine Überprüfung der Ergebnisse ist insbesondere bei unsicheren Daten erforderlich. Diese umfassen zum einen subjektive Entscheidungen des Entscheidungsträgers, wie zum Beispiel die Ausweisung von Kriteriengewichtungen und Präferenzen und zum anderen können Datenunsicherheiten analysiert werden /GEL 14/.

Durch eine Variation der Eingangsparameter (Vorgehen bei einer Sensitivitätsanalyse) kann zum Beispiel der Einfluss der einzelnen Kriterien auf die Lösung (Sensitivität) und

die Stabilität der erzielten Rangfolge untersucht werden. Als Stabilität ist die Robustheit der ermittelten Rangfolge der Alternativen in Bezug auf die Variation der Eingangsdaten gemeint. Wenn zum Beispiel bereits kleine Abweichungen bzw. Variationen der gewählten Eingangsdaten zu einer gravierenden Veränderung der Rangfolge führen, dann sollte die erzielte Rangfolge kritisch hinterfragt werden /GEL 14/.

Die Durchführung von Sensitivitätsanalysen dient nicht nur zur Ermittlung der Sensitivität einzelner Kriterien oder der Stabilität der Rangfolge, sondern auch der Möglichkeit der Ermittlung von so genannten Insensitivitätsintervallen. Ein Insensitivitätsintervall gibt an, in welchem Rahmen die Gewichtung eines Kriteriums in Bezug zum ursprünglich gewählten Wert verändert werden kann, ohne dass sich die ursprünglich erzielte Rangfolge ändert. Zum Beispiel lässt sich aus einem engen Insensitivitätsintervall um die gewählte Gewichtung herum interpretieren, dass sich die Rangfolge leicht verändern lässt. Anhand der Veränderung der Gewichtung kann ermittelt werden, wie Alternativen durch Kriterien beeinflusst werden und wie stark der relative Einfluss ist. Hierdurch kann die Relevanz der Kriterien für das Ergebnis untersucht werden /GEL 14/.

## 5.7 Zusammenfassende Darstellung der multikriteriellen Methoden

Wie bereits im Kap. 3 erläutert, sind für eine sicherheitsgerichtete Bewertung von Handlungsalternativen bzw. Untersuchungsräumen, Methoden der präskriptiven Entscheidungstheorie geeignet. Die **MADM-Methoden** werden in klassische Verfahren (Kap. 5.3) und Outranking-Verfahren (Kap. 5.4) unterschieden. Im Folgenden werden Vor- und Nachteile dieser beiden Kategorien und zum Teil einzelner Methoden untereinander diskutiert.

In /APP 09/ werden unterschiedliche Methoden der Entscheidungstheorie beschrieben und deren Anwendbarkeit auf Auswahlverfahren im Planungs- und Umweltbereich diskutiert. Als Schlussfolgerung werden formalisierte **Methoden<sup>9</sup> mit kompensatorischem Ansatz** (klassische Methoden) als weniger geeignet eingestuft, da sie von einem übergeordneten Nutzwert (oder Kompensierbarkeit) aller Kriterien ausgehen. Ihr Einsatz ist eher für ökonomische Fragestellungen geeignet. Ähnliche Schlussfolgerungen wurden auch von /RÖH 15/ aufgestellt. Er bemängelt zum Beispiel für die Nutzwertanalyse die volle Kompensierbarkeit von besseren mit schlechteren Kriterienausprägungen auf allen

---

<sup>9</sup> Nach /FOR 15/ ist eine Zunahme der Formalisierung durch eine stringente Struktur und Vorgehensweise, sowie einen höheren Grad an Quantifizierung und Mathematisierung gekennzeichnet (Kap. 4.3.2).

Aggregationsebenen. Bei der Nutzwertanalyse werden die qualitativen und quantitativen Informationen in einer Kennzahl (Nutzwert) zusammengefasst, anhand derer sich das Gesamtergebnis der Bewertung unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren und ggfs. Gewichtungen widerspiegelt. Durch diese Aggregation lässt sich zwar die Übersichtlichkeit steigern und eine Rangordnung zwischen verschiedenen Alternativen herstellen, doch dies geschieht auf Kosten der Transparenz. Eine direkte Rückkopplung auf die einzelnen Bewertungsschritte, Teil- bzw. Einzelergebnisse und mögliche Gewichtungen geht unter Umständen verloren /FOR 15/.

Formalisierte **Verfahren mit nicht-kompensatorischem Ansatz** (z. B. Outranking-Methoden) werden als „methodisch überzeugendster Ansatz“ für eine Anwendung im Planungs- und Umweltbereich identifiziert /APP 09/. Als Vorteile dieses Ansatzes wird insbesondere der niedrige Aggregationsgrad hervorgehoben. Die Herangehensweise bietet zudem die Möglichkeit, sich mit den Kriterien „auseinanderzusetzen“, bei gleichzeitiger Möglichkeit von Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Mit diesem Ansatz können auch Elemente der verbal-argumentativen Methode berücksichtigt werden /FOR 15/.

Nach /HAR 06/ ist die Kompensation zweier Ausprägungen unterschiedlicher Bewertungskriterien bei den Outranking-Verfahren im Gegensatz zu den klassischen Verfahren (Nutzwertanalyse) nur „eingeschränkt“ möglich. Nach /WIL 12/ sind alle Outranking-Methoden - bezogen auf die Kompensation - besser geeignet als die klassischen Verfahren. Zudem werden bei den Outranking-Methoden die Differenzen der Kriterienausprägungen bzw. die Präferenzen eines Paarvergleichs weiterverarbeitet und nicht die absoluten Werte der Zielertragsmatrix (Nutzwertanalyse). Dadurch besteht auch ein geringerer Anspruch an die Datenqualität, so dass s. g. Unvergleichbarkeiten der Daten möglich sind. Eine Unvergleichbarkeit besteht, wenn bei einem Vergleich zweier Alternativen keine Alternative „dominiert“ (Diskordanz bei ELECTRE und „Outrankingflüsse“ bei PROMETHEE). Bei der Nutzwertanalyse wird diese eingeschränkte Kompensationsmöglichkeit nicht berücksichtigt. Grundsätzlich wird bei den Outranking-Methoden ein paarweiser Vergleich zweier Alternativen bezüglich je eines Bewertungskriteriums durchgeführt. Die Alternativen werden somit immer nur im Vergleich bewertet, im Gegensatz zur isolierten Bewertung bei der Nutzwertanalyse /HAR 06/.

Nach /HAR 06/ können in Outranking-Verfahren unscharfe, unvollständige oder gar widersprüchliche Informationen über Planungsalternativen und damit verbundene zukünftige Entwicklungen berücksichtigt werden. Durch die Verwendung von Präferenzfunktionen (z. B. PROMETHEE) erfolgt eine „elegante“ Berücksichtigung von Ungewissheiten.

Somit werden „reale“ Entscheidungsprozesse besser abgebildet, als bei anderen Verfahren, wie z. B. der Nutzwertanalyse. In der PROMETHEE Methode können unscharfe Präferenzvorstellungen und Ungewissheiten in den Kriterien-Ausprägungen durch Präferenzfunktionen abgebildet werden /OBE 10/. Letztendlich kann durch Sensitivitätsanalysen der Einfluss unterschiedlicher Präferenzfunktionen und Kriteriengewichte analysiert sowie Stabilitätsintervalle bestimmt werden.

Nach /OTT 12/ unterscheiden sich die drei Outranking-Verfahren ELECTRE, PROMETHEE und ORESTE hauptsächlich in der Art der Vergleiche der Alternativen. Das ORESTE Verfahren verknüpft eine Nutzwertanalyse mit einer Konfliktanalyse. Der Unterschied zu ELECTRE und PROMETHEE ist, dass in ORESTE die Gewichte in Rängen anzugeben sind. Die Konfliktanalyse teilt die Paarvergleiche in Präferenzen, Indifferenzen und Unvergleichbarkeiten ein. Die Darstellung der Gewichte in Rängen ist mit einem höheren Detailverlust der Informationen im Gegensatz zu ELECTRE und PROMETHEE verbunden. Zudem ist nach /BRA 86/ ein Vorteil der PROMETHEE Methode, im Gegensatz zum Beispiel zu ELECTRE III, die Stabilität der Ergebnisse (Rangfolge).

Die Ergebnisse der PROMETHEE Methode können zum Beispiel mit Hilfe der **Hasse-Diagramm-Technik** dargestellt werden. Die Hasse-Diagramm Technik ist ein einfaches und transparentes Verfahren. Sie stellt die Beziehungen der Alternativen aufgrund der Daten ohne jegliche Gewichtung der Kriterien dar /OTT 12/.

Es wird in vielen Literaturziten der Eindruck erweckt, dass die klassischen Verfahren (in der Regel Bezug auf die Nutzwertanalyse) grundsätzlich von einem übergeordneten Nutzwert ausgehen. Dies trifft jedoch für die AHP- und ANP-Methode nicht zu. Insbesondere durch diese Methoden wird versucht den additiven Ansatz der Nutzwertanalyse zu verbessern. Bei der AHP-Methode wird im Gegensatz zum NWA das Alternativen-Ranking durch einen paarweisen Vergleich von Kriterien und Alternativen ermittelt. Jedoch bestehen auch für die AHP-Methode Nachteile, wie z. B. das Problem der Inkonsistenz der Konsistenzbedingung (widerspruchsfreie Präferenzen, siehe Kap. 5.3.3). Somit besteht keine klare Abgrenzung der klassischen Verfahren zu den Outranking-Verfahren, in Bezug auf kompensatorisch und nicht-kompensatorisch.

Nach /TER 15/ berücksichtigen Outranking-Methoden nicht die hierarchische Struktur von Kriterien (AHP und ANP berücksichtigen eine hierarchische Struktur). Beispielsweise werden alle Kriterien in ELECTRE- und PROMETHEE-Methoden ohne eine Struktur von Teilzielen berücksichtigt. Dies kann ein Problem für den Entscheidungsträger bei

komplexen Entscheidungsproblemen sein. Zum Beispiel impliziert die Analyse von Entscheidungsproblemen unter Einbeziehung wirtschaftlicher und sozialer Wirkungskriterien mit einer übergeordneten Methode die folgenden Situationen:

- Definieren der relativen Wichtigkeit jedes Kriteriums in Bezug auf die restlichen Kriterien. Wie kann ein Entscheidungsträger die relative Bedeutung eines ökonomischen Kriteriums nicht nur in Bezug auf andere ökonomische Kriterien, sondern auch in Bezug auf die sozialen Auswirkungen klar definieren?

Es scheint intuitiver zu sein, dieses Problem so zu strukturieren, dass die wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen in zwei Teilprobleme unterteilt werden, sodass die relativen Gewichte auf der Grundlage gemeinsamer oder verwandter Kriterien (hierarchisch) definiert werden. Dann kann in einem allgemeineren Kontext bestimmt werden, wie wichtig das wirtschaftliche Unterproblem in Bezug auf das Unterproblem der sozialen Auswirkungen ist.

- Wenn die Aggregationsmethode keine hierarchische Gliederung berücksichtigt, hat der Entscheidungsträger zwei starke Einschränkungen.
  - Erstens beim Aufbau des Entscheidungsmodells,
  - und zweitens, wenn ein vereinfachtes Gesamtergebnis ermittelt werden soll.

In /TER 15/ wird die Meinung vertreten, dass die Unterteilung des Entscheidungsproblems (Hauptziele) in Subebenen (Nebenziele) flexiblere und realistischere Entscheidungsmodelle ermöglicht. Nach /TER 15/ berücksichtigen jedoch nur sehr wenige Methoden die Zerlegung von Entscheidungsproblemen unter Verwendung einer Hierarchie von Kriterien. Die bekannteste Methode zur Verwaltung hierarchischer Strukturen ist der Analytic Hierarchical Process (AHP). Die von der AHP abgewandelte ANP-Methode (Analytic Network Process) verwendet Netzwerke anstelle von Hierarchien. Der Unterschied zwischen AHP und ANP besteht darin, dass ANP die Alternativen nicht unabhängig voneinander betrachtet. Zudem haben die Methoden auch weitere Nachteile (siehe z. B. Kap. 5.3.3).

In den letzten Jahren wurde eine Methode vorgeschlagen, die als Multiple Criteria Hierarchy Process (MCHP) bezeichnet wird und sich mit hierarchischen Strukturen von Kriterien befasst (siehe /COR 12/). Der Ansatz kann auf jede MADM-Methode angewendet werden, einschließlich klassischer und Outranking-Methoden. Für die Outranking-Me-

thoden wird dieser Prozess in /COR 13/ für die ELECTRE-III-Methode erläutert. Es werden an jedem Knoten der Hierarchie klare Outranking Relationen aufgebaut. Zuerst wird die ELECTRE-III-Methode auf der untersten Ebene der Hierarchie angewendet, um eine binäre Outranking-Präferenzbeziehung für jede Untermenge von Kriterien aufzubauen. Als nächstes wird die Bildung der binären Outranking Relationen für die nächst höheren Ebenen fortgesetzt. Die Präferenzinformationen, die zum Aufbau der Outranking Relationen verwendet werden, können entweder direkt vom Entscheidungsträger (in Form von Outrankingmodellparametern wie Kriteriengewichten und Vergleichsschwellenwerten) oder indirekt (in Form paarweiser Vergleiche einiger Alternativen) vom Entscheidungsträger bereitgestellt werden /TER 15/.

In /AIR 18/ wird zudem das Problem der s. g. Rangumkehr („Rank Reversal“) beschrieben. Eine Rangumkehr bedeutet, dass die relativen Rangfolgen zweier Entscheidungsalternativen, bei einer Hinzu- und Wegnahme von Alternativen oder Kriterien, sich unter Umständen umkehren könnten. Es werden fünf Möglichkeiten unterschieden, die zu einer Rangumkehr bzw. Verletzung der Transitivität (siehe Kap. 3) führen können /AIR 18/.

1. Die Rangfolge der Alternativen ändert sich, wenn eine nicht optimale Alternative hinzugefügt (oder daraus entfernt) wird.
2. Die Angabe der besten Alternative ändert sich, wenn eine nicht optimale Alternative durch eine andere schlechtere Alternative ersetzt wird.
3. Die Transitivitätseigenschaft wird verletzt, wenn dem Problem eine nicht optimale Alternative hinzugefügt (oder daraus entfernt) wird.
4. Die Transitivitätseigenschaft wird verletzt, wenn das anfängliche Entscheidungsproblem in Unterprobleme zerlegt wird und die Rangfolgen der Unterprobleme in Konflikt mit der Gesamtrangfolge der Alternativen stehen.
5. Die endgültige Rangfolge der Alternativen ändert sich, wenn ein nicht unterscheidendes Kriterium aus dem Problem entfernt wird.

Als Ergebnis der Studie in /AIR 18/ wird unter anderem hervorgehoben, dass das Problem der Rangumkehr am häufigsten für die AHP-Methode untersucht wurde (z. B. in /BEL 83/). Generell tritt dieses Phänomen aber auch bei den Outranking-Methoden (als Beispiele werden ELECTRE und PROMETHEE genannt) auf.



Es liegt nahe für die Auswertungen bzw. die Aggregation der Analyseergebnisse entsprechende Software zu verwenden. Eine Möglichkeit ist zum Beispiel die Implementierung der Methoden in einem Tabellenkalkulationsprogramm. Die Berechnungen können je nach Methode jedoch sehr aufwendig sein. Es gibt für verschiedene multikriterielle Methoden bereits fertige Softwarelösungen, die die Eingabe der Daten vereinfachen und die Analyseergebnisse darstellen. Eine beispielhafte Auswahl von Softwareanwendungen für MADM-Methoden findet sich in /GEL 14/ S. 14 und /YAT 15/ /MUS 13/ (siehe auch Tab. 5.9).

**Tab. 5.9** Beispielhafte Software zur Anwendung multikriterieller Methoden /GEL 14/, /YAT 15/

Methoden	Software	Beschreibung
AHP	Expert Choice	Unterstützung der hierarchischen Struktur, bietet eine Gewichtssensitivitätsanalyse und eine Entscheidungsunterstützung für Gruppen (Team Expert Choice).
	Web-HIPRE	Ermittlung einer Rangfolge aus diskreten Alternativen, Gewichtung, Gruppenentscheidungen.
	Criterion Decision-Plus	Strukturierung mit Hilfe von „Value Trees“, Gewichtssensitivität und (eingeschränkte) Unsicherheitsanalyse, Versionen für Gruppenentscheidungen.
MAVT, Kosten-Nutzenanalyse, Outranking	DEFINITE	Berücksichtigung unscharfer Präferenzinformationen, Lösung bei diskreten Lösungsräumen.
PROMETHEE und nutzwertbasierte Methoden	D-Sight	Online Plattform zur Unterstützung bei Gruppenentscheidungen.
PROMETHEE	Decision Lab 2000	Anwendung von PROMETHEE und Visualisierung mittels der GAIA-Ebene.
	Visual PROMETHEE	Anwendung von PROMETHEE und Visualisierung mittels der GAIA-Ebene.
ELECTRE	ELECTRE TRI	Unterstützung zur Ermittlung der Präferenzen, Anwendung ELECTRE III.
TOPSIS, ELECTRE I, PROMETHEE-II	SANNA	Anwendung für MS-Excel.
Hasse Diagramme	PyHasse-exp oder PyHasse-inet	Erstellung von Hasse-Diagrammen.

Die Tab. 5.10 und Tab. 5.11 zeigen eine zusammenfassende tabellarische Darstellung der im Kap. 5 beschriebenen Methoden

Tab. 5.10 Beispielhafte MAUT-Methoden

Methoden-kategorien	Merkmale bzw. Methodik	Skala	Kompen-sation	Rangumkehr möglich?	Berücksichtigung von Präferenzen und Ungewissheiten	Ergebnis, (Art von Ranking)	Pro	Kontra	Literatur
		1=Kardinal 2=Ordinal 3=beide	0=keine 1=absolute 2=partielle	0=nein 1= ja	0=keine 1= Ungewissheiten 2=Präferenz/Wichtung 3=Unvergleichbarkeit	1=partielle 2=absolute			
<b>Klassische-Methoden (MAUT - Multiple Attribute Utility Theory)</b>									
<b>SAW und SMART</b>	Additive Gewichtung der Kriterienausprägungen.	3	1	1	2 (Gewichtungen)	2	Einfach zu verwenden	Kompensation von Kriterienausprägungen,	/REE 09/ /ABD 14/ /GEL 14/
<b>NWA</b> (Nutzwertanalyse)	Ordnung der Alternativen durch Berechnung von Nutzwerten (Nutzenfunktion).	3	1	1	2 (Gewichtungen)	2	Leichte Vermittelbarkeit der Ergebnisse, einfache Durchführung	Kompensation von Kriterienausprägungen,	/SCH 06/ /OTT 12/ Anhang C /ZAM 02/
<b>AHP</b> (Analytic Hierarchy Process)	Paarweiser Vergleich auf Grundlage einer rationalen Skala, hierarchische Struktur des Zielsystems.	3	2	1	2 (Gewichtungen)	1,2	Hierarchische Analyse, leicht verständliches, flexibles Modell, paarweiser Vergleich im Gegensatz zur NWA	Gefahr der Inkonsistenz der Präferenzurteile, Begrenztheit der AHP-Skala, gegenseitige Abhängigkeit zwischen Zielen und Alternativen, Rangumkehr	/WAT 19/ /GUA 18/ /VEL 13/ /OTT 12/ Anhang C /SCH 18/

Methoden-kategorien	Merkmale bzw. Methodik	Skala	Kompen-sation	Rangumkehr möglich?	Berücksichtigung von Präferenzen und Ungewissheiten	Ergebnis, (Art von Ranking)	Pro	Kontra	Literatur
<b>ANP</b> (Analytic Network Process)	Abwandlung der AHP Methode, Paarweiser Vergleich auf Grundlage einer rationalen Skala und gegenseitigen Abhängigkeiten, nicht lineare Netzwerkstruktur des Zielsystems.	3	2	1	2 (Gewichtungen)	1,2	vgl. AHP	Im vgl. zu AHP sind Wechselbeziehungen und Feedback-Schleifen zulässig.	/WAT 19/ /GUA 18/ /HÄM 96/

**Tab. 5.11** Beispielhafte Outranking-, sowie weitere Methoden

Methoden-kategorien	Merkmale bzw. Methodik	Skala	Kompen-sation	Rangumkehr	Berücksichtigung von Präferenzen und Ungewissheiten	Ergebnis, (Art von Ranking)	Pro	Kontra	Literatur
		1=Kardinal 2=Ordinal 3=beide	0=keine 1=absolute 2=partielle	0=nein 1= ja	0=keine 1= Ungewissheiten 2=Präferenz/Wichtung 3=Unvergleichbarkeit	1=partielle 2=absolute			
<b>Outranking-Methoden (Identifizieren von Präferenzen, Indifferenzen und Unvergleichbarkeiten)</b>									
<b>PROME- THEE I</b>	Outranking-Beziehung auf Grundlage von paarweisen Vergleichen, Outrankingflüssen, Präferenz- und Indifferenzschwellen.	3	2	1	1,2,3	1	Einfach zu verwenden, geringe Kompensation	Rangumkehr ist möglich	/WAT 19/ /GUA 18/ /VEL 13/ /OTT 12/ Anhang C /SCH 18/

Methoden-kategorien	Merkmale bzw. Methodik	Skala	Kompen-sation	Rangumkehr	Berücksichtigung von Präferenzen und Ungewissheiten	Ergebnis, (Art von Ranking)	Pro	Kontra	Literatur
<b>ELECTRE I</b> (Elimination Et Choix Tra- duisant la Realité)	Outranking-Bezie- hung auf Grundlage von paarweisen Vergleichen, Kon- kordanz- und Nicht- Kordanz, Präfe- renz-, Indifferenz und Veto-Schwel- len.	3	2	1	1,2,3	1	Durch Veto- Schwellwert wird Kompensation verhindert	Rangumkehr ist möglich	/WAT 19/ /GUA 18/ /VEL 13/ /OTT 12/ Anhang C /SCH 18/
<b>Hasse-Dia- gramm</b>	Identifizieren von In- differenzen und Un- vergleichbarkeiten (partiell geordnete Menge). Vorsortie- rung der Alternati- ven für weitere Un- tersuchungen.	3	0	1	2,3	1	Transparent und objektiv, keine Gewichtung nötig	Ausschließlich da- tengetriebene Be- wertung	/OTT 12/ Anhang C /SIM 03/ /GUT 15/
<b>Zusätzliche Methoden</b>									
<b>Verbal Argu- mentative Methode</b>	Argumentative Be- wertung durch Ent- scheidungsträger (Argumentation, Ta- bellen, Indikatorblät- ter, ...).	3	0	0	1,2,3	1,2	Einfach zu ver- wenden, Transparent, geringe Kompen- sation	Bei einer Vielzahl von Alternativen unübersichtlich. Unter Umständen sind die subjektiven Entscheidungen nicht immer nachvollziehbar	/SCH 06/

Methoden-kategorien	Merkmale bzw. Methodik	Skala	Kompen-sation	Rangumkehr	Berücksichtigung von Präferenzen und Ungewisshei-ten	Ergebnis, (Art von Ranking)	Pro	Kontra	Literatur
<b>Direkter Ver-gleich, Stär-ken-Schwä-chen-Profil</b>	Bewertung anhand von Minima und Ma-xima der aggregier-ten Kriterienausprä-gungen.	3	1	1	k. a.	Stärken-Schwächen Profile	Vorsortierung der Alternativen für weitere Untersu-chungen	Kompensation von Kriterienausprä-gungen	/ZUI 14/ (Anhang D)
<b>Malus Bilanzierung</b>	Individueller Ver-gleich der Nutz-werte für die Krite-rien der Alternativen mit absoluten Schwellenwerten.	3	0,1	1	k. a.	Identifizie-rung von eindeutigen Vor- oder Nachteilen zwischen Alternativen	Vorsortierung der Alternativen für weitere Untersu-chungen	Kompensation von Kriterienausprä-gungen	/ZUI 14/ (Anhang D)

k. a. = Es liegen hierzu keine Informationen vor bzw. es kann keine Aussage getroffen werden.

## 6 Anwendung der Methoden

Im Folgenden wird die Anwendbarkeit der im Kap. 5 beschriebenen Methoden für Abwägungen bzw. vergleichende Bewertungen auf die in Kap. 2 identifizierten relevanten Aufgabenstellungen der Verfahrensschritte des StandAG untersucht. In Kap. 6.1 wird zunächst die Anwendung insbesondere der im schweizerischen Standortauswahlverfahren angewendeten Methoden kurz diskutiert. In Kap. 6.2 erfolgt eine allgemeine Beschreibung der Wesentlichen Arbeitsschritte zur Erstellung eines Entscheidungsmodells. Im Kapitel 7 erfolgt eine Einordnung, welche potentiellen Methoden-Kategorien der Entscheidungstheorie, für die relevanten Aufgabenstellungen des StandAG aus Kapitel 2 anwendbar sind.

### 6.1 Bisherige Anwendungen ausgewählter Verfahren

In dem **Optionenvergleich Asse** /BfS 10/ und der Auswahl eines Zwischenlagers für rückgeholte Abfälle (Kap. 4.1.3 und 4.1.4), wurden verschiedene Alternativen (Optionen) zur Behandlung der Abfälle aus der Schachtanlage Asse untersucht. Hierfür erfolgte für die drei unterschiedlichen Alternativen ein qualitativer kriterienbezogener Paarvergleich der Kriterien für verschiedene Beurteilungsfelder. In dem Paarvergleich der Kriterien können dann qualitative Aussagen, wie „besser“ oder „schlechter“ gemacht werden. Die hierdurch ermittelte Rangfolge der Alternativen wurde durch eine verbal-argumentative Abwägung der Beurteilungsfelder und deren Wichtung begründet. Ergänzend erfolgte eine Sensitivitätsanalyse zur Identifizierung des Einflusses von Ungenauigkeiten auf die Bewertungsergebnisse.

Im **Verbundvorhaben ENTRIA** /RÖH 19/ wurde auf Basis eines verbal-argumentativen Vergleiches von verschiedenen Entsorgungsoptionen (siehe Kap. 4.1.5) eine umfassende Risikobewertung durchgeführt /ECK 18/. Die Wahl einer verbal-argumentativen Bewertung erfolgte aufgrund des Mangels an quantitativen Informationen, dadurch konnte keine rechnerische Aggregation durchgeführt werden. Das Verfahren beruht, vergleichbar zu VerSi (Kap. 4.1.1), auf einer verbal-argumentativen Herangehensweise.

Im **schweizerischen Standortauswahlverfahren** (siehe Kap. 4.2.1 bzw. Kap. 4.2.1.2) wurden verschiedene MADM-Methoden zur Bewertung einzelner Standortalternativen angewendet /ZUI 14/ (Anhang D). Die grobe Vorgehensweise beinhaltet zunächst die

Ermittlung von Nutzwerten anhand einer **Nutzwertanalyse** (siehe Kap. 5.3.2). Die Aggregation der jeweiligen Indikatorwerte wurde durch eine arithmetische gleichgewichtete Mittelung für das jeweilige Merkmal und Standortgebiet durchgeführt /RÖH 15/ (siehe auch Kap. 5.3.1). Als bedeutendes Merkmal wird z. B. die „Wirksamkeit der geologischen Barriere“ angesehen. Die qualitative Bewertung anhand einer klassischen Nutzwertanalyse diente dem Ziel, die vorhandenen Alternativen bezüglich Sicherheit und Machbarkeit (Nutzwert) qualitativ zu bewerten und sie dahingehend zu prüfen, ob sie eine Gesamtbewertung von mindestens „geeignet“ aufweisen. Anschließend wurde auf Basis der ermittelten Nutzwerte, durch die Methode „Direkter Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken-Schwächen-Profil“ (siehe Kap. 5.5.1) identifiziert, für welche der vorhandenen Alternativen bezüglich der bewertungsrelevanten Merkmale und Indikatoren eindeutige Nachteile bestehen. Durch die Anwendung alternativer Methoden der Multikriterienanalyse sollten weitere Hinweise auf eindeutige Nachteile ermittelt werden, die dann argumentativ bewertet wurden. Zu diesen Methoden gehört eine **Outranking-Methode** (siehe Kap. 5.4.1) und die **Malus-Bilanzierung** (siehe Kap. 5.5.1).

Das verwendete Verfahren in der Schweiz, zur Ermittlung der Nutzwerte lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Es wurde ein hierarchischer Kriterienkatalog mit verschiedenen Kriteriengruppen sowie zugehörigen Indikatoren für Wirtsgesteine und geologische Standortgebiete erstellt.
- Danach wurde eine Bewertungsskala bzw. Nutzenfunktion für alle Indikatoren anhand diskreter Bewertungsstufen in: sehr günstig, günstig, bedingt günstig, ungünstig und ungenügend unter Angabe der Nutzwerte erstellt.
- Dann wurden die Nutzwerte aggregiert. Dies geschah für verschiedene Ebenen: (1) Für alle einem Kriterium zugehörigen Indikatoren, (2) für alle einer Kriteriengruppe zugehörigen Kriterien und (3) für alle Kriteriengruppen.
- Innerhalb der einzelnen Aggregationsebenen (Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen) wurde eine volle Kompensation zugelassen (hoher Kompensationsgrad).

Nach /RÖH 15/ ist die volle Kompensierbarkeit von besseren mit schlechteren Bewertungen auf allen Aggregationsebenen als problematisch anzusehen. Insbesondere auf der Aggregationsebene von Kriteriengruppen zu Gesamtbewertungen ist dies erkennbar:



*„Ein Standortgebiet kann theoretisch auch dann als ‚geeignet‘ eingestuft werden, wenn es bezüglich einer Kriteriengruppe als ‚weniger geeignet‘ gilt“ /RÖH 15/.*

Auf Basis der ermittelten Nutzwerte aus der Nutzwertanalyse wurden, wie oben bereits erwähnt, zusätzliche multikriterielle Methoden angewendet. Im Folgenden wird die angewendete Outranking-Methode näher beschrieben, welche jedoch in /ZUI 14/ namentlich nicht weiter spezifiziert wird. Das methodische Vorgehen ist vergleichbar mit der PROMETHEE-Methode. Das verwendete Verfahren lässt sich nach /ZUI 14/ wie folgt charakterisieren:

- Für die Durchführung der **Outranking-Methode** wurde ein paarweiser Vergleich der Alternativen bezüglich der „entscheidungsrelevanten“ Merkmale bzw. Indikatoren durchgeführt. Den einzelnen Indikatoren werden Präferenzwerte (Nutzwerte) zugeordnet. Durch die Bildung von Differenzen der Präferenzwerte und der Anwendung einer Präferenzfunktion erfolgt eine Bewertung. Die „Outranking-Methode“ soll relative Unterschiede zwischen Alternativen aufzeigen und auf Unvergleichbarkeiten hinweisen. Ergeben sich hohe Werte für den Schwäche-Präferenzfluss, wird dies als Hinweis auf eindeutige Nachteile interpretiert.
- Für die entscheidungsrelevanten Indikatoren erfolgt **keine Kompensation** beim paarweisen Vergleich der Kriterienausprägungen. Jedoch werden für den paarweisen Vergleich der aggregierten Ebenen, wie den „entscheidungsrelevanten“ Merkmalen, eine volle Kompensation zugelassen.

Nach /RÖH 15/ wirkt sich die Definition der Präferenzfunktion bzw. die daraus abgeleiteten „Schwäche-Präferenzflüsse“ dahingehend 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. Nach /RÖH 15/ liefern die Untersuchungsergebnisse der verschiedenen Methoden folgende Informationen:

*„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.“*

Gemäß der Beschreibung in /ZUI 14/ sollen die Methoden zur Identifizierung eindeutiger Vor- und Nachteile der Alternativen angewendet werden. Es erfolgt in erster Linie eine Einstufung in „gut“ oder „schlecht“. Zudem beruht die Festlegung der Bewertungsmaßstäbe für den „direkten Vergleich“ (zwei bzw. eine Bewertungsstufe Abstand) und die Malusbilanzierung (Schwellenwert und Malus von 0,4) auf „expert judgement“. Der Einfluss der Bewertungsmaßstäbe auf das Untersuchungsergebnis, bzw. die Robustheit muss überprüft werden. In der Bewertung nach der („Outranking-Methode“) können alle Optionen berücksichtigt werden, die bzgl. eines Merkmals oder Indikators besser sind als die betrachtete Option. Somit lassen sich aus dieser Methode „bessere“ Aussagen zur Vergleichbarkeit bzw. der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Alternativen treffen.

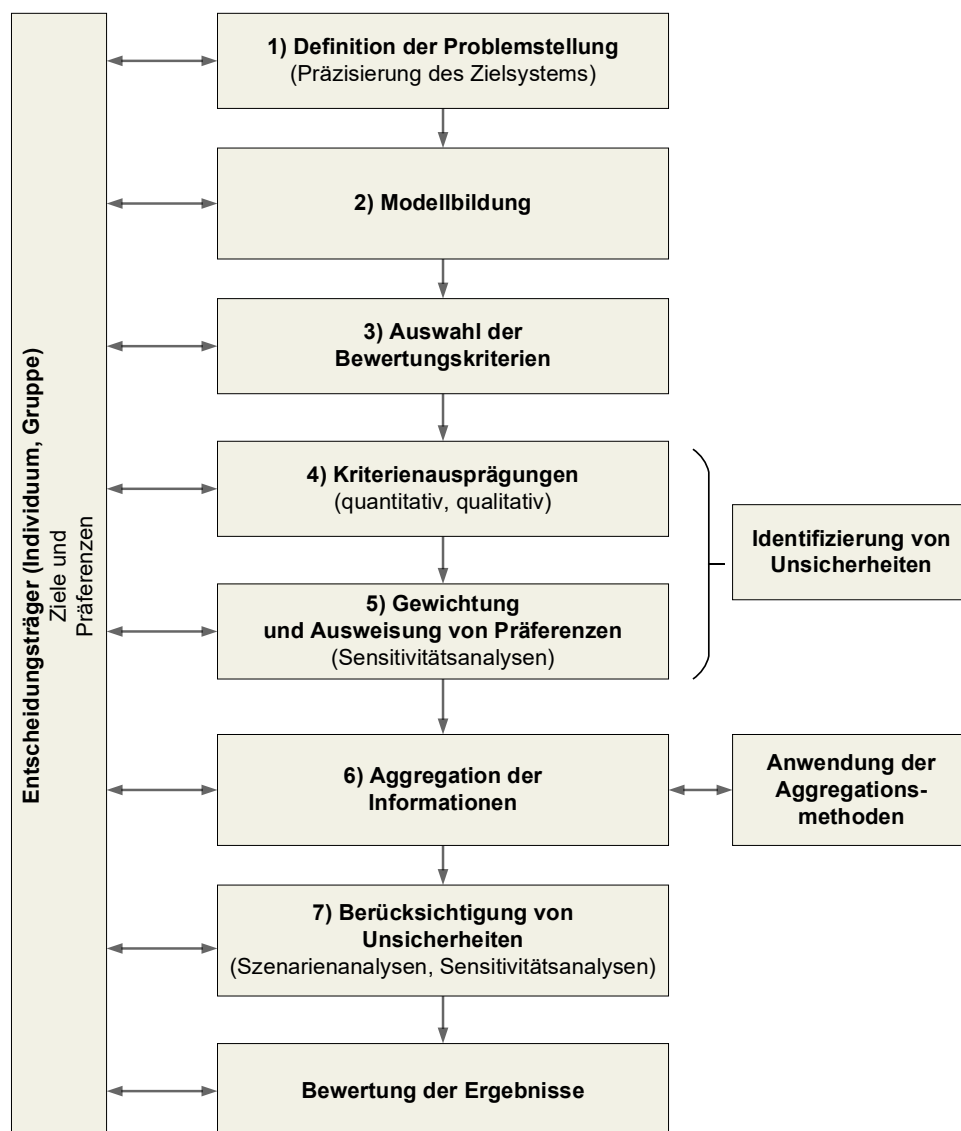
Die Diversität der gewählten methodischen Verfahren (direkter Vergleich der Bewertungen, Outranking und Malus-Bilanzierung) zum Vergleich der Standortgebiete bezüglich der bewertungsrelevanten Indikatoren bzw. Merkmale wird von /RÖH 15/ als sinnvoll angesehen.

## 6.2 Beschreibung eines Entscheidungsproblems

Die wesentlichen Schritte zur Lösung eines multikriteriellen Entscheidungsproblems (siehe Kap. 3) sind anhand des Schemas in der Abb. 6.1 dargestellt und im Folgenden beschrieben. Dieses Lösungsschema trifft auf alle multikriteriellen Entscheidungssituationen zu und ist zunächst unabhängig davon, welche der in Kap. 5 vorgestellten Methoden zur Anwendung kommen.

Im Folgenden wird der schematische Ablauf in der Abb. 6.1 erläutert. Für ein Entscheidungsproblem muss zunächst ein **Zielsystem** (Hauptziele und Nebenziele) erstellt werden, anhand dessen bewertungsrelevante Kriterien abgeleitet werden können (Schritt 1). Zur Ermittlung potentieller bewertungsrelevanter Kriterien muss bereits zu Beginn des Prozesses eine gewisse **Modellvorstellung** (Sicherheits- und Endlagerkonzept) bestehen (Schritt 2). Die Modellbildung und die **Auswahl der Kriterien** (Schritt 3) können als paralleler Prozess verstanden werden. Anschließend werden die Kriterien **parametrisiert** und **gewichtet** (Schritte 4 und 5). Für gewisse Methoden (z. B. PROMETHEE) müssen neben den Gewichtungen der Kriterien zudem **Präferenzen** (siehe Kap. 5.4.1) des Entscheidungsträgers in dem Entscheidungsprozess festgelegt werden

(Schritt 5). Die ermittelten Informationen werden zwecks einer Bewertung zusammengeführt bzw. aggregiert (Schritt 6). In diesem Schritt erfolgt die eigentliche Anwendung der Abwägungs/Vergleichs- bzw. Aggregationsmethoden. Zuletzt müssen die Ergebnisse überprüft und bewertet werden. Insbesondere müssen die für den Schritt 4 (z. B. Messungswissheiten von Kriterienausprägungen) und Schritt 5 (nicht klar definierte Präferenzen des Entscheidungsträgers) identifizierten Ungewissheiten durch Sensitivitätsanalysen untersucht werden (Schritt 7). Hierzu gehören auch die Ungewissheiten bezüglich zukünftiger Umweltzustände. Diesen Ungewissheiten werden im Rahmen der Szenarienentwicklung Rechnung getragen.



**Abb. 6.1** Darstellung der relevanten Schritte zur Lösung eines multikriteriellen Entscheidungsproblems (verändert nach /OBE 10/)

Die Schritte 1 bis 5 der Abb. 6.1 sind zunächst zur Datenerhebung bzw. zur Erlangung der notwendigen Informationen, zur eigentlichen Anwendung der multikriteriellen Methoden ab Schritt 6 erforderlich. Zur Darstellung der objektiven Sachverhalte und Eigenschaften der unterschiedlichen wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme ist es sinnvoll, diese Informationen in einem s. g. Sachstandsbericht zu erheben bzw. zu dokumentieren. Die Anwendung der VerSi-Methode /FIS 10/ beruht auf der Erstellung eines synoptischen Sachstandsberichtes. Ziel des synoptischen Sachstandsberichtes ist es, die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der verschiedenen wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme systematisch zu erfassen, gegenüberzustellen und die entsprechenden Sicherheitsfunktionen unter Berücksichtigung ihrer zeitabhängigen Wirkung abzuleiten. Inhaltlich weist der synoptische Bericht noch keine (subjektiven) vergleichenden Wertungen oder Abwägungen auf, sondern es steht eine wertungsneutrale und objektive Sachstandsgegenüberstellung im Vordergrund. Die Erstellung eines synoptischen Sachstandsberichtes ist für alle Phasen des Standortauswahlverfahrens sinnvoll, da Informationslücken aufgezeigt werden können und der stetige Informationszuwachs dokumentiert wird.

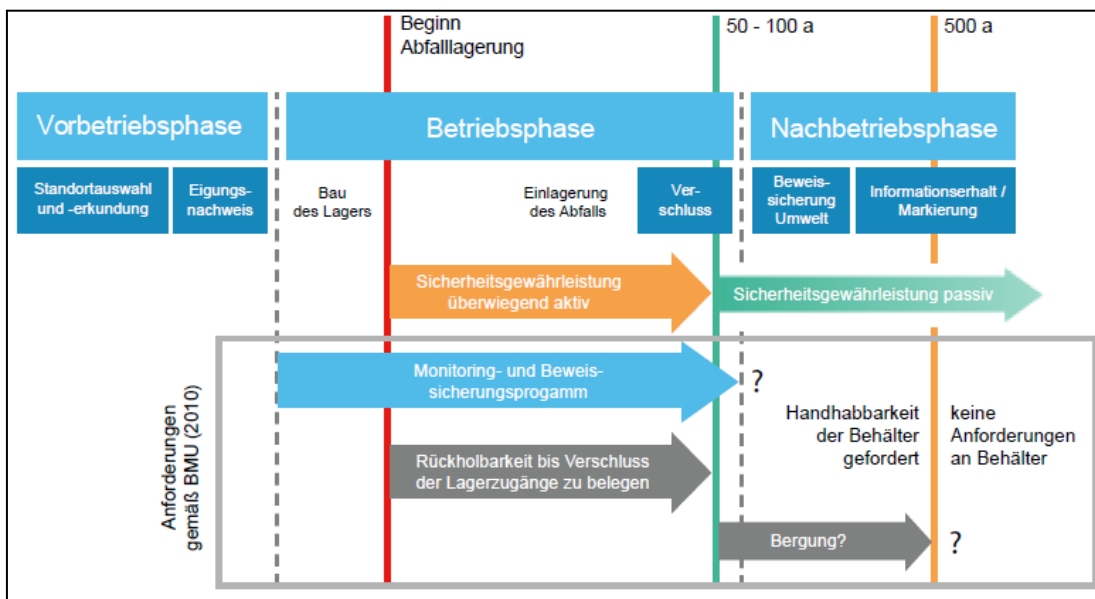
### **6.2.1 Definition der Problemstellung bzw. des Zielsystems (Schritt 1)**

Nach /LAU 12/ soll die Entscheidungstheorie dem Entscheidungsträger helfen, seine eigenen Zielvorstellungen in ein widerspruchsfreies „Zielsystem“ zu überführen, damit er eine Entscheidung treffen kann, die mit diesem Zielsystem im Einklang steht (Schritt 1, Abb. 6.1). Anders gesagt, bestimmt das Zielsystem, welche Eigenschaften der verschiedenen Alternativen bzw. Endlagersysteme vergleichend einander gegenübergestellt werden /FIS 10/. Ein strukturiertes Zielsystem ist zudem hilfreich, für die sachgerechte Auswahl und Gewichtung der Kriterien. Die Formulierung des Zielsystems gehört zu den subjektiven Elementen in einem Entscheidungsprozess.

Gemäß der Erläuterung in Kap. 2.4, zu den unterschiedlichen Herausforderungen bezogen auf „Abwägungen“ und „Vergleichen“, sind für die Phase 1 günstige Teilgebiete und Standortregionen durch die Eingrenzung großflächiger Gebiete, insbesondere durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen und der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, auszuweisen. Somit besteht die Anforderung an eine Methodik voraussichtlich weniger auf einem Vergleich von verschiedenen Alternativen, sondern vielmehr auf der Bewertung auf Basis einer individuellen Abwägung der geowissenschaftlichen und planungswissenschaftlichen Informationen für die jeweiligen Untersuchungsräume.

Ein sicherheitsgerichteter Vergleich von Standorten, insbesondere in Phase 3 und ggf. in Phase 2 zur Ermittlung geeigneter Standorte, muss neben den Vorgaben des StandAG auch die Vorgaben der EndSiAnfV und der EndSiUntV berücksichtigen. In der EndSiUntV werden die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen allgemein weiter unterteilt in betriebliche Sicherheitsanalysen (z. B. Betrachtung der übertägigen und untertägigen Anlagenbereiche, § 8 EndSiUntV) und die Langzeitsicherheitsanalyse (Einschlusswirkung unterschiedlicher Barrieren des Endlagersystems, § 9 EndSiUntV). Eine wichtige sicherheitsgerichtete Anforderung ist zum Beispiel, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben sollen. Weitere sicherheitsgerichtete Anforderungen ergeben sich - auch unter Berücksichtigung weiterer Aspekte (Abb. 6.2) – durch eine zeitliche und räumliche Unterscheidung des Entscheidungsproblems:

- Unterscheidung von Betriebs-, Übergangs- und Langzeitphase,
- Randbedingungen wie Rückholbarkeit, Bergung oder auch Human-Intrusion.



**Abb. 6.2** Darstellung der operativen Phasen in der Endlagerentwicklung /APP 15/

Im zeitlichen Verlauf der Endlagerentwicklung, insbesondere nach Verschluss des Endlagers, wird der Einschluss der Radionuklide durch verschiedene Barrierensysteme gewährleistet. Für Endlagersysteme, welche auf einem ewG basieren, kann zwischen der Übergangsphase und der stationären Langzeitphase unterschieden werden. In der Übergangsphase wird der Einschluss der Radionuklide durch geotechnische Barrieren und in der stationären Langzeitphase durch das Wirtsgestein selber gewährleistet. Im

VerSi-Vorhaben /FIS 10/ werden die unterschiedlichen Phasen „Wirkungsphasen“ genannt. Für das Standortauswahlverfahren kann unter Umständen die Betriebsphase als zusätzliche Phase hinzugezählt werden. In einer vergleichenden Bewertung aber auch in der Gesamtbewertung eines Untersuchungsraumes, können diese verschiedenen Wirkungsphasen unterschieden werden.

### **6.2.2 Modellbildung – Festlegung der Modellkonzepte (Schritt 2)**

Gemäß /LAU 12/ ergeben sich unterschiedliche Alternativen (Schritt 2, Abb. 6.1) anhand der Variation der durch den Entscheidungsträger beeinflussbaren Faktoren. Diese sind beispielhaft für zu erstellende Sicherheits- und Endlagerkonzepte:

- Unterschiedliche Geosystemtypen bzw. geologische Strukturen - z. B. Salz in steiler oder in flacher Lagerung,
- Wirtsgesteinsspezifische Endlagerkonzepte mit unterschiedlichen Sicherheits- bzw. Barrierekonzepten, sowie Einlagerungskonzeptvarianten (z. B. Bohrloch- oder Streckenlagerung).

Die wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzepte sind eine vom Entscheidungsträger beeinflussbare Größe, für die jedoch konzeptionelle Informationen (z. B. das Endlagerkonzept) vorliegen müssen. Daher sind im Folgenden beispielhafte Projekte aufgeführt, welche die konzeptionellen Grundlagen zur Erstellung von wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystemen in Deutschland erarbeitet haben (Stand von Wissenschaft und Technik bzgl. bestehender Endlagerkonzepte, Stand 2017):

Im Vorhaben „**Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen**“ /FAß 17/, /HAR 17/ wird der Stand von W & T zu Endlagerkonzepten in Deutschland zusammengefasst und Anforderungen an Endlagerkonzepte abgeleitet.

In dem Vorhaben „**Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben**“ (VSG) /FIS 13/ wurde ein vollständiger vorläufiger Sicherheitsnachweis (safety case) für einen Standort im Wirtsgestein Steinsalz durchgeführt.

Das Projekt **AnSichT** „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein“ /JOB 17/, untersuchte die Möglichkeit

einer Durchführung des Sicherheitsnachweises für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle im Tongestein in Deutschland.

Das Verbundvorhaben **CHRISTA I** /JOB 16/ untersuchte, inwiefern das in den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung für wärmeentwickelnde Abfälle /BMU 10/ geforderte Konzept der Endlagerung in einer tiefen geologischen Formation mit hohem Einschlussvermögen auch auf das Wirtsgestein Kristallingestein übertragbar ist.

Das Forschungsvorhaben **EUGENIA** (Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen) untersuchte die Vorgehensweise bei der Standortsuche und -erkundung sowie den Stand der Endlagererrichtung (Endlagerkonzept, Endlagerbau und -betrieb, Verfüll- und Verschlusskonzepte sowie Endlagerüberwachungsmaßnahmen) am Beispiel der weit fortgeschrittenen Projekte zur Endlagerung hochradioaktiver und wärmeentwickelnder Abfälle in Finnland, Schweden, Frankreich, Schweiz, Belgien, Deutschland und USA (Stand Ende 2009) /BOL 11/.

Grundsätzlich ergeben sich aus der Erstellung der eigentlichen Alternativen keine direkten Herausforderungen auf die multikriteriellen Methoden. Jedoch kann sich aus den unterschiedlichen zu berücksichtigenden wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystemen, eine Vielzahl zu bewertender Alternativen ergeben. Die Eigenschaften der unterschiedlichen Endlagersysteme spiegeln sich somit u. U. in der Anzahl der bewertungsrelevanten Kriterien und Sicherheitsfunktionen wider. Insbesondere wird es unterschiedliche Gewichtungen der Kriterien zwischen den Alternativen geben. Somit spiegeln sich die hier beschriebenen Herausforderungen zur Modellerstellung bzw. der Ableitung der Alternativen, auf die folgenden Kapitel zur Auswahl und Gewichtung der Kriterien wider.

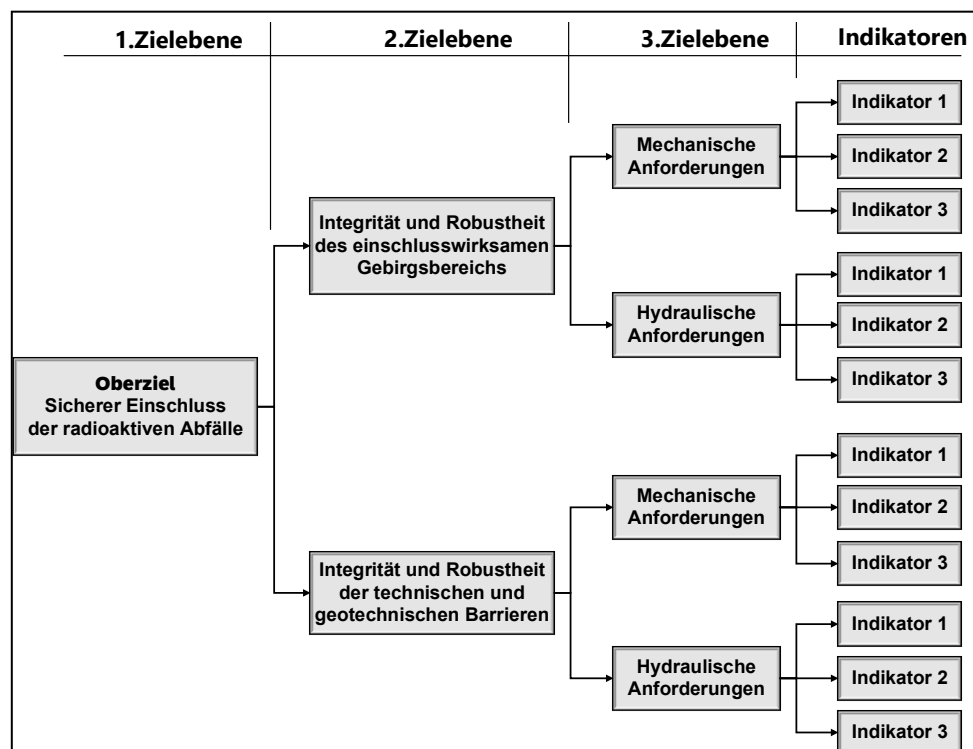
### **6.2.3 Auswahl der Bewertungskriterien (Schritt 3)**

Die Auswahl von Kriterien (Schritt 3, Abb. 6.1) erfolgt immer mit dem Fokus auf das entsprechende Zielsystem. Das Zielsystem bzw. die sich daraus anzuleitenden bewertungsrelevanten Kriterien und deren Indikatoren zur Überprüfung bestimmter Einflussgrößen, werden in der Regel durch Anforderungen aus Gesetzestexten und Richtlinien (z. B. StandAG /STA 17/ und EndSiAnfV /BMU 19b/) abgeleitet. Für das Standortauswahlverfahren ist es voraussichtlich erforderlich, dass zusätzliche (sicherheitsgerichtete) Kriterien und Sicherheitsfunktionen für die Anwendung in einem sicherheitsgerichteten

Vergleich von konkreten Endlagersystemen in Phase 2 und insbesondere Phase 3 ausgewiesen werden müssen. Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind hierfür alleine nicht ausreichend und die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien sind hierfür nicht vorgesehen. Die Prüfkriterien sind laut Definition (siehe Anhang A.6.4) hierfür ebenfalls nicht vorgesehen.

Entscheidend ist zudem die Ausweisung bestehender Ungewissheiten, der Robustheit der Sicherheitsaussage und der Sicherheit des Endlagersystems, einschließlich vorhandener Sicherheitsreserven. Da die Auswahl bewertungsrelevanter Kriterien je nach Endlagersystem und Bearbeiter unter Umständen variieren könnte, müssen in diesem Schritt die Kriterien dokumentiert und transparent begründet werden.

Grundsätzlich muss für einen Vergleich von Alternativen ein einheitlicher Satz bzw. Anzahl an Kriterien vorliegen. Insbesondere für komplexe und vielschichtige Entscheidungsprobleme empfiehlt es sich, das Entscheidungsproblem zu strukturieren bzw. eine (thematische) Kriterienhierarchie (Unterscheidung in Haupt- und Nebenziele), z. B. in einem Entscheidungsbaum („value tree“) zu erstellen (siehe Abb. 6.3). Hierdurch wird zum Beispiel die spätere Gewichtung der Kriterien (vgl. Kap. 6.2.5) transparenter.



**Abb. 6.3** Beispielhafte Darstellung einer Kriterienhierarchie basierend auf einem exemplarischen Zielsystem



Zur Bewertung der Alternativen können die Indikatoren auf verschiedenen Hierarchieebenen aggregiert werden. Beispielhaft müssen in Phase 2 und insbesondere in Phase 3, Endlagersysteme sowohl auf Basis gleicher Wirtsgesteine als auch mit gleichen Sicherheitskonzepten, untereinander verglichen werden. Somit können zum Beispiel konzeptionelle Stärken und Schwächen, wirtsgesteins- oder konzeptspezifisch bei einem Vergleich untersucht werden.

Unter Umständen können insbesondere in der frühen Phase des Standortauswahlverfahrens, aufgrund der heterogenen Datenlage nicht für alle bewertungsrelevante Kriterien Daten vorliegen bzw. die Daten sind mit hohen Ungewissheiten verbunden. Um trotzdem eine Vergleichbarkeit von Untersuchungsräumen zu gewährleisten, können zunächst Kriterienkategorien gebildet werden, für die dann sozusagen eine Gesamtbewertung erfolgt. Die Aggregation der Informationen könnte durch klassische Methoden der Nutzentheorie erfolgen (z. B. Nutzwertanalyse).

Analog erfolgte im Schweizer Standortauswahlverfahren eine Aggregation von Daten zu den folgenden Kriterienkategorien:

- die Wirksamkeit der geologischen Barriere,
- die Langzeitstabilität der geologischen Barriere,
- die Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet,
- die bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale.

Wenn jedoch keine Daten für Kriterien vorliegen, welche für eine sicherheitsgerichtete Bewertung als „zu wichtig“ angesehen werden, muss eine Bewertung des Untersuchungsraumes vertagt werden, bis die erforderlichen Daten vorliegen. Mit der sich entwickelnden Datenlage im Verlauf des Standortauswahlverfahrens, können immer detailliertere Untersuchungen auf Basis einzelner Kriterien erfolgen.

#### **6.2.4 Kriterienausprägungen: Skalentypen, Ungewissheiten (Schritt 4)**

Eine Kriterienausprägung (Schritt 4, Abb. 6.1) ist ein quantitativer oder qualitativer Wert, der einem Kriterium zugeordnet wird, um Kriterien untereinander vergleichen und letztendlich bewerten zu können. Die Ausprägungen insbesondere quantitativer Daten sind

in der Regel mit Ungewissheiten behaftet, die zu berücksichtigen sind (siehe auch Kap. 6.2.7). Diese können in den unterschiedlichen Phasen des Standortauswahlverfahrens unterschiedlich sein (z. B. qualitativ und/oder quantitativ als Messungengenauigkeit). Als gutes Beispiel für qualitative Daten kann die Robustheit (Zuverlässigkeit) einer Aussage dienen. Gemäß EndlSiAnfV § 2 Punkt 7 ist die Robustheit folgendermaßen definiert:

*„die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen“.*

Die Ableitung der Robustheit sicherheitsgerichteter Aussagen, wird zum Beispiel von der Ungewissheit beeinflusst, bzw. wie vertrauenswürdig ein Messwert eines bestimmten Kriteriums ist. Die Bestimmung der Robustheit ist neben der Sicherheit, zum Beispiel eines der Kernaufgaben der VerSi-Methodik /FIS 10/. Die qualitative Robustheit kann nur durch den Entscheidungsträger unter der Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen, subjektiv eingeschätzt werden. Die Einstufung kann zum Beispiel auf Grundlage einer ordinalen Skala erfolgen, von 0 (nicht robust) bis 10 (sehr robust).

Einige der geowissenschaftlichen Kriterien gemäß § 24 StandAG sind qualitativ und können nur durch eine ordinale Skala abgebildet werden (vgl. z. B. Anlage 4 zu § 24 Abs. 3 StandAG). Für diese Kriterien müssen geeignete Skalen ausgewiesen werden. Für andere Größen, wie zum Beispiel „Durchlässigkeit von Abdichtbauwerken“, kann die Ausweisung einer Ausprägung durch eine kardinale Skala erfolgen (vgl. z. B. Anlage 1 zu § 24 Abs. 3 StandAG).

Zur Berücksichtigung der Datenungleichheiten in einem Vergleichsverfahren, wird von /APP 09/ vorgeschlagen, einen Mindest-Informationsbedarf für bestimmte Kriterien auszuweisen, welcher sowohl qualitativ als auch quantitativ erreicht werden sollte. Für eine vergleichende Bewertung gilt zudem die Anforderung nach einer Gleichbehandlung aller Kriterien. Dies bedeutet, dass die Informationen, die für den Vergleich von alternativen Untersuchungsräumen angewendet werden, bei allen Alternativen hinsichtlich Quantität und Qualität annähernd gleiche Aussagekraft aufweisen müssen /APP 09/.

Nach /KOM 16/ müssen die Variabilität (Bandbreiten), Ungewissheiten in den Eingangsdaten sowie Modellungsgewissheiten berücksichtigt und dargelegt werden. Eine Übertrag-

barkeit fehlender (spezifischer) Informationen aus ähnlichen Bereichen/analogen Untersuchungsräumen, sowie eine Parametrisierung durch „expert judgement“, ist u. U. möglich, wenn eine nachvollziehbare sachliche Begründung erstellt werden kann /APP 09/.

#### **6.2.5 Ermittlung der Gewichtungen und Präferenzen für Kriterien (Schritt 5)**

Aus den unterschiedlichen Sicherheitskonzepten für verschiedene wirtsgesteinsspezifische Endlagersysteme resultieren unterschiedliche Anforderungen bezüglich des Barriersystems (Schritt 5, Abb. 6.1). Daraus können sich für gleiche Kriterien bei unterschiedlichen (wirtsgesteinsspezifischen) Endlagersystemen unterschiedliche Gewichtungen ergeben.

Gemäß der EndSiUntV § 7, Abs. 4 ist für den jeweiligen Untersuchungsraum im Standortauswahlverfahren darzulegen, welche Relevanz die einzelnen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß Anlage 1 bis 11 (§ 24, Abs. 3 bis 5 des StandAG) für die Beurteilung des jeweiligen Endlagersystems haben. Dabei ist zu unterscheiden nach:

- 1. der Bedeutung des Kriteriums für die Sicherheitsfunktionen des vorgesehenen Endlagersystems und seiner Komponenten,*
- 2. der aktuellen Kenntnis der lokalen Sachverhalte zum jeweiligen Abwägungskriterium und*
- 3. dem Potenzial für den Erkenntnisgewinn zum jeweiligen Kriterium aufgrund künftiger Erkundungstätigkeiten.*

Die Kriteriengewichtung stellt im Entscheidungsprozess einen wichtigen Schritt dar, weil die Kriteriengewichtung durch die subjektiven Präferenzen des Entscheidungsträgers (expert judgement) geprägt sind und die Gewichtungen einen großen Einfluss auf das Bewertungsergebnis haben. Es gibt verschiedene Methoden, welche helfen können numerische Werte für die Gewichtungen der einzelnen Kriterien zu ermitteln. /WAN 09/ gibt einen Überblick über Gewichtungsmethoden, welche für MCDM-Verfahren für Energieanwendungen eingesetzt wurden. Zudem kann die SMART- (Simple Multi-Attribute Rating Technique) und die AHP-Methode (Kap. 5.3.1 und Kap. 5.3.3) angewendet werden.

Für eine robuste Entscheidung ist das Aufzeigen der Auswirkungen unterschiedlicher Kriteriengewichtungen auf das Bewertungsergebnis wichtig. Beispielhaft kann die Ge-

wichtung oder auch die Hinzu-/Wegnahme einzelner Kriterien, die Gesamtbewertung eines Untersuchungsraumes aber auch die Rangfolge bei einem Vergleich von Untersuchungsräumen beeinflussen. Insbesondere bei der Gewichtung von Kriterien sollten Methoden, wie z. B. die Sensitivitätsanalyse (Kap. 5.6) herangezogen werden, um subjektive Einflüsse zu minimieren bzw. nachvollziehbar darzustellen. Über Sensitivitätsanalysen können robustere von weniger robusten Merkmalskombinationen unterschieden werden. Dabei sind auch Änderungen in der anfänglichen Rangfolge sowie Rücksprungmöglichkeiten zu zunächst „zurückgestellten“ Untersuchungsräumen mit zu bedenken /KOM 16/. Insbesondere können prozessspezifische Untersuchungen z. B. der Gesteinseigenschaften, wie Kompaktion von Salzgrus, der Korrosion von geotechnischen Materialien und des Durchflusses von Materialien, etc. zur Untersuchung der Sensitivität und damit der „Einfluss“ der Parameter auf bestimmte Prozesse durchgeführt werden.

Für einige multikriterielle Methoden muss neben der Gewichtung von Kriterien zudem eine Präferenz ausgewiesen werden. Die Präferenz wird zum Beispiel für die PROMETHEE Methode (vgl. Kap. 5.4.1), anhand einer Präferenzfunktion und den Differenzen der einzelnen Kriterienausprägungen zwischen zwei Alternativen ermittelt. Die Präferenzen legen fest, wann ein mögliches Resultat eines Entscheidungsprozesses einem anderen vorgezogen wird. In Abhängigkeit der Differenz der Ausprägungen wird zwischen den Präferenzbegriffen Indifferenz, schwache Präferenz und strikter Präferenz unterschieden. Die Übergänge zwischen den einzelnen „Präferenzen“ werden durch Schwellenwerte festgelegt. Es können zudem Wertspannen (Ungewissheiten) der Kriterienausprägungen in den Präferenzfunktionen ausgewiesen werden (schwache Präferenz). Eine steigende Präferenz entspricht einer steigenden Differenzausprägung. Die Präferenzfunktion legt somit die Bevorzugung zwischen den Alternativen unter Berücksichtigung eines bestimmten Kriteriums bzw. dessen Differenzausprägung fest /GEL 14/. Voraussichtlich können somit zum Beispiel die Bandbreiten der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien bzw. deren Wertungsgruppen, von z. B. „günstig“ zu „weniger günstig“ abgebildet werden.

#### **6.2.6 Aggregation der Informationen (Schritt 6)**

Die in den vorherigen Schritten ermittelten Informationen müssen zwecks einer Gesamtbewertung zum Teil zusammengefasst, d. h. aggregiert werden (Schritt 6, Abb. 6.1). Die Aggregation der einzelnen Ausprägungen der jeweiligen Kriterien und ihre gegenseitige Abwägung zum Zweck der notwendigen geowissenschaftlichen Gesamtbewertung, ist eine zentrale Aufgabe des Entscheidungsprozesses. Für eine bessere Übersicht werden

die ermittelten Kriterienausprägungen in der Regel in einer Ergebnis- bzw. Entscheidungsmatrix zusammengefasst (siehe Tab. 5.5 in Kap. 5.4.1). Entscheidend ist, wie die methodische Aggregation der einzelnen Bewertungsergebnisse der Kriterien, zum Ziel einer Gesamtaussage, erfolgt.

Für die Aggregation der Informationen zur Bewertung der verschiedenen Untersuchungsräume im Standortauswahlverfahren nach StandAG, können zwei grundlegende Vorgehensweisen angewendet werden (siehe auch Kap. 2.4 zur Einordnung der Begriffe Abwägung und Vergleich, sowie das Kap. 5.2 zur Klassifizierung der Methoden):

1. Die Bewertung eines einzelnen Untersuchungsraumes erfolgt ohne Berücksichtigung bzw. einen paarweisen Vergleich mit anderen Untersuchungsräumen, zum Beispiel durch eine additive Verrechnung der Kriterienausprägungen (z. B. Nutzwertanalyse oder SAW-Methode).
2. Die Bewertung der Untersuchungsräume erfolgt unter Berücksichtigung aller Untersuchungsräume durch einen paarweisen Vergleich der Kriterien (z. B. AHP- und Outranking-Methoden).

Die erste Herangehensweise kann mit einer hohen Kompensation der Kriterien verbunden sein, da die Kriterienausprägungen verrechnet werden müssen, um eine Gesamtbewertung eines Untersuchungsraumes zu erlangen. Die zweite Herangehensweise ist in der Regel mit einem geringeren Aggregationsgrad verbunden. Die vorhandenen Informationen bzw. Untersuchungsräume mit den zugehörigen Kriterien werden paarweise miteinander verglichen und somit in ein „Verhältnis“ gesetzt.

/KOM 16/ und /BT 17/ treffen zur Abwägung und dem Vergleich von Untersuchungsräumen folgende Aussage:

*[...] Formale Aggregationsregeln, insbesondere solche mit kompensatorischer Aggregation der Einzelergebnisse der Kriterienanwendung, hält die Kommission nicht für zielführend. Die abwägende vergleichende Gesamtbetrachtung aller Anforderungen erfolgt mit dem Ziel, Standortregionen beziehungsweise Standorte mit möglichst günstiger Gesamtausprägung ihrer sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale auszuweisen, Unterschiede anhand sicherheitsbezogener Vorteile und Nachteile der Standortregionen beziehungsweise Standort transparent zu machen und hieraus eine Auswahl für den jeweils folgenden Prozessschritt abzuleiten.“*

Die Endlagerkommission hat sich somit in ihrem Abschlussbericht /KOM 16/ für Aggregationsregeln mit nicht-kompensatorischem Ansatz (siehe Kap. 5.7) ausgesprochen. Hierzu gehört z. B. die Familie der Outranking-Methoden, die verbal-argumentative Abwägungsmethodik aber auch die AHP/ANP-Methode.

Grundsätzlich kann die Bewertung der Untersuchungsräume gestuft erfolgen, nach Indikatoren, Kriterien bzw. Kriteriengruppen (siehe Kap. 6.2.3). Hierbei erfolgt die Bewertung zunächst für jeden Untersuchungsraum basierend auf den einzelnen Kriterien unabhängig voneinander. Hilfestellungen können hier die Informationen in /ZUI 14/ geben (siehe auch Abb. 6.3 in Kap. 6.2.3). Die einzelnen Bewertungsergebnisse der Kriterien können, basierend auf unterschiedlichen Hierarchiestufen bzw. Kriteriengruppen (z. B. Anlage 1, zu § 24 Abs. 3 StandAG - Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich) und zur abschließenden Gesamtbewertung aggregiert werden. Insbesondere in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens liegen voraussichtlich nicht für alle geowissenschaftlichen Abwägungskriterien die erforderlichen Daten vor oder sie weisen hohe Ungewissheiten auf. In § 24 StandAG ist die folgende Aussage enthalten:

*„Die günstige geologische Gesamtsituation ergibt sich nach einer sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien.“*

Aus dieser Aussage ergibt sich nicht zwangsläufig eine zwingende Anwendung aller Kriterien. Ein Ergebnis der Bewertung eines einzelnen Kriteriums kann zum Beispiel sein, dass keine Daten vorliegen bzw. die Daten unzureichend sind, so dass keine Anwendung möglich war. Hier wäre dann vermutlich der Umstand zu bewerten, was das Fehlen der Daten und die nicht gegebene Anwendung für den Bewertungsprozess bedeutet. Liegen für bestimmte Kriterien die erforderlichen Daten nicht vor, ist zu klären, ob der entsprechende Sachverhalt hilfsweise mittels eines geeigneten (zusammenfassenden) Indikators bewertet werden kann /APP 09/.

Wenn für einzelne Kriterien keine Informationen vorliegen, kann eine Aggregation von einzelnen Kriterien zu Kategorien erfolgen. Die Erstellung von übergeordneten Kategorien, wie zum Beispiel die Zusammenfassung mechanischer oder hydraulischer Eigenschaften, kann eine Bewertung aber auch Vergleichbarkeit von Untersuchungsräumen möglich machen. Zudem können integrale Indikatoren zur Bewertung einer bestimmten Zielebene ausgewiesen werden. Wenn eine Anwendung bestimmter Kriterien für eine

Bewertung zwingend wäre, wären Untersuchungsräume mit nicht hinreichender Datenlage zurückzustellen (bzw. als Gebiete mit nicht hinreichenden Informationen einzustufen), bis die entsprechenden Daten erhoben werden. Eine Verwendung von zunächst generischen Daten kann unter Umständen angewendet werden (siehe hierzu auch die Anmerkungen in Kap. 6.2.4)

Wie in Kap. 5.7 beschrieben, kann zudem das Phänomen der Rangumkehr auftreten, wenn zum Entscheidungsfeld Alternativen entfernt oder hinzugefügt werden. Dieser Umstand ist im Standortsuchverfahren unter Umständen möglich, weil sich durch die fortentwickelnde Datenlage in den einzelnen Phasen möglicherweise die Bewertung einzelner Alternativen ändern kann bzw. Alternativen hinzukommen oder wegfallen.

Die sich fortentwickelnde Informationslage kann zudem dazu führen, dass in den verschiedenen Phasen der Standortauswahl keine durchgehend gleiche „Transitivität“ gegeben ist (siehe Kap. 3). Transitive Präferenzen legen eine klare Reihenfolge der Alternativen fest. Diese kann sich jedoch, wie oben beschrieben, durch die sich entwickelnde Datenlage in den verschiedenen Phasen ändern. Deshalb muss von einem iterativen Prozess ausgegangen werden, in dem bei veränderter Datenlage unter Umständen eine neue Bewertung der Alternativen in jeder Phase erfolgt. Somit sind Abweichungen vom vorherigen Schritt nicht auszuschließen. Mit diesem Problem gilt es im Standortauswahlverfahren umzugehen. Zur Nachvollziehbarkeit des Entscheidungsprozesses ist es wichtig, dass eine transparente Dokumentation der Entscheidungen erfolgt.

Ein weiteres Problem, welches die Transitivität beeinflusst, liegt in der für alle geologischen Fragestellungen vorhandenen Datenungleichheit. In der Regel können aufgrund der natürlichen Heterogenität geologischer Materialien nur Datenbandbreiten ausgewiesen werden. Dieser Umstand erschwert die klare Abgrenzung und Bewertung von Untersuchungsräumen. Deshalb kann unter Umständen nicht immer eine klare Aussage vom Typ „gleich wie“, sondern eher „ungefähr gleich wie“ gemacht werden. Somit lassen sich nicht immer (vollkommen) transitive Aussagen ableiten.

### **6.2.7 Berücksichtigung von Ungewissheiten (Schritt 7)**

Für Entscheidungssituationen müssen zwei grundsätzliche Arten von Ungewissheiten unterschieden werden (Schritt 7, Abb. 6.1), nämlich der internen und der externen Ungewissheit. Interne Ungewissheiten beziehen sich auf den Prozess der Modellerstellung, wie z. B. der „subjektiven“ Erhebung der Präferenzen und Kriteriengewichte, sowie der

Analyse der Ergebnisse. Externe Ungewissheiten beziehen sich auf den Umweltzustand und damit auf Konsequenzen, die außerhalb der Kontrolle des Entscheidungsträgers liegen kann /STE 16/. Hierzu wird auch die Qualität der Eingangsdaten, wie z. B. Messfehler gezählt (siehe auch Kap. 5.6). Beide Arten von Ungewissheiten werden in der Regel durch die Ausweisung von Bandbreiten berücksichtigt.

Nach /STE 16/ wurden Ungewissheiten in menschlichen Urteilen, die sich zum Beispiel auf Vorgaben von Präferenzen oder Gewichtungen beziehen, unter bestimmten Umständen durch „Fuzzy-Sets“ und verwandte Ansätze, wie z. B. von s. g. Rough Sets, modelliert. Aus Sicht der praktischen Entscheidungshilfe erhöhen solche Ansätze die Ungenauigkeit und die Komplexität eines bereits komplexen Prozesses. Die Folge kann oft ein Verlust an Transparenz für den Entscheidungsprozess sein. Aus diesem Grund wird in /STE 16/ die Auffassung vertreten, dass interne Ungewissheiten im Idealfall so weit wie möglich durch eine bessere Strukturierung des Entscheidungsproblems und/oder durch eine angemessene Sensitivitäts- und Robustheitsanalyse behoben werden sollten.

Externe Ungewissheiten, wie die zukünftigen **Entwicklungen** des Umweltzustandes (potentielle zukünftige Entwicklungen des Endlagersystems), beziehen sich zum einen auf die Eintrittswahrscheinlichkeiten und zum anderen auf die Ausprägung der Einwirkungen. Ungewissheiten werden in der Regel durch Szenarien- und Sensitivitätsanalysen berücksichtigt und untersucht. Hierzu können Kriterienausprägungen in einer entsprechenden Bandbreite variiert und potenzielle Veränderungen der Rangfolge von Alternativen analysiert werden. Es werden somit verschiedene Szenarien erstellt, die bei entsprechenden Kriterien zu unterschiedlichen Kriterienausprägungen der Alternativen führen können /GEL 14/. Beispielhafte Szenarien sind zum Beispiel:



- Natürliche Entwicklungen, wie Meeresspiegeltransgression, Erdbeben und Inlandeisüberfahrungen,
- Die zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems, bzw. der geotechnischen Bauwerke innerhalb des Endlagersystems (z. B. Salzgruskompaktion, Bentonitquellen) und die Entwicklung des Wirtsgesteins (z. B. hydraulische Durchlässigkeit),
- Anthropogene Einflüsse, wie unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlagersystem (human intrusion).

Die Ungewissheit in Bezug auf den Umweltzustand ist eine Größe im Entscheidungsprozess, welche sich der Kontrolle des Entscheidungsträgers entzieht. Eine solche Ungewissheit kann eine Folge eines Mangels an Wissen bzw. Informationen sein oder sie kann sich aus der Zufälligkeit ergeben, die Prozessen inhärent ist (z. B. die Wahrscheinlichkeit des Versagens einer Barriere). Zum Beispiel kann die Versagenswahrscheinlichkeit einer Barriere von vielen äußeren Einflussgrößen abhängig sein, die ihrerseits wiederum mit Ungewissheiten verbunden sind. Für eine Bewertung müssen viele Faktoren berücksichtigt werden, welche unter Umständen durch Labor- und Prozessanalysen untersucht bzw. ermittelt werden.

Es besteht zudem eine Ungewissheit darüber, inwiefern sich eine Entscheidung auf andere miteinander verknüpfte Entscheidungen auswirkt. Angenommen, im Standortauswahlverfahren werden gewisse Festlegungen zu Endlager- und Sicherheitskonzepten gemacht. Im zeitlichen Verlauf werden diese aufgrund der sich entwickelnden Datenlage weiterentwickelt und angepasst. Hierdurch würden unter Umständen alte Bewertungen von Untersuchungsräumen obsolet bzw. müssten neu hinterfragt werden, weil sich die Bewertungsgrundlage geändert hat.

In vielen Fällen können sowohl interne als auch externe Ungewissheiten auf die gleiche Weise methodisch behandelt werden. In /STE 16/ wird empfohlen eine klare deterministische MCDA-Methodik zu verwenden und die Ergebnisse und Schlussfolgerungen umfangreichen Sensitivitätsstudien zu unterziehen.



## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Es sei hervorgehoben, dass es aufgrund der Vielzahl an Methoden unter Umständen generell schwierig ist, die am besten geeignete Methode zur Bewertung von Entscheidungssituationen zu identifizieren. Die Ausführungen im folgenden Kapitel können deshalb nur als Beispiele angesehen werden. Es ist sicher davon auszugehen, dass für die Aufgabenstellungen gemäß StandAG mehrere Verfahren zur Anwendung kommen können. Letztendlich muss die Anwendbarkeit der Methoden auf spezifische Daten bzw. ein vorhandenes „reales“ Entscheidungsproblem getestet werden. Entsprechende Arbeiten sind jedoch nicht Gegenstand dieses Vorhabens.

### 7.1 Mögliche Anwendung der entscheidungstheoretischen Methoden auf das Standortauswahlverfahren

Im Folgenden werden die phasenspezifischen Unterschiede des Standortauswahlverfahrens zur Eingrenzung der Untersuchungsräume nochmal hervorgehoben. Anhand dessen erfolgt eine bessere Einordnung der Anwendung von Methoden zur Abwägung und vergleichenden Bewertung, für die relevanten Aufgabenstellungen gemäß StandAG (siehe hierzu auch die Zusammenfassungen in Kap. 2.4 und Kap. 5.7).

In **Phase 1A** (§ 13 StandAG) werden zunächst Teilgebiete aus dem Bundesgebiet selektiert. Das heißt, es liegen zu diesem Zeitpunkt noch keine abgegrenzten Untersuchungsräume für eine Bewertung vor. Abgegrenzte Gebiete bestehen erst am Ende der Phase 1A mit den ermittelten Teilgebieten. Eine erste Eingrenzung der Gebiete erfolgt auf Basis der Anwendung der geowissenschaftlichen **Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen**. Aufgrund einer voraussichtlichen, teilweise unzureichenden Datenlage, wird eine weitere Eingrenzung auf Grundlage von „günstigen Ausprägungen“ der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien vermutlich nicht durchgängig erfolgen können. Dies bedeutet, dass bestimmte Untersuchungsräume erst nach der übertägigen Erkundung dahingehend bewertet werden können, ob bei Ihnen eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt.

Die Arbeiten in **Phase 1B** (§ 14 StandAG) erfolgen auf Basis nun räumlich abgegrenzter Teilgebiete, welche zwecks einer weiteren Eingrenzung zu günstigen Standortregionen, untersucht werden. Zudem werden nach § 14 StandAG zum ersten Mal repräsentative

vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt, in denen verschiedene wirtsge- steinsspezifische Endlagersysteme (Alternativen) berücksichtigt werden müssen. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen werden die ge- owissenschaftlichen Abwägungskriterien erneut angewendet. Die Aussagekraft der Er- gebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, ist aufgrund der unveränderten Datenlage, voraussichtlich mit zum Teil großen Ungewissheiten verbun- den. Deshalb wären hier aus Sicht der Autoren Sensitivitätsanalysen, durch die zum Beispiel Informationen zur Einordnung (Gewichtung) der geowissenschaftlichen Abwä- gungskriterien ermittelt werden können, zielführend.

In **Phase 3** und ggf. in den **Phasen 1 (§ 14) und 2** werden auf der Grundlage der Ergeb- nisse der jeweiligen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und der geowissenschaftli- chen Abwägungskriterien sicherheitsgerichtete Vergleiche von Standorten durchgeführt. In **Phase 2** müssen voraussichtlich eine Vielzahl an Endlagersystemen mit unterschied- lichen Endlager- und Sicherheitskonzepten untersucht und bewertet werden. Somit muss die entsprechende Methode eine Vielzahl unterschiedlichster Alternativen und de- ren Einflussgrößen berücksichtigen können. In **Phase 3** wird voraussichtlich eine relativ kleine Anzahl von Standorten verglichen.

### **Anwendung multikriterieller Methoden im Standortauswahlverfahren**

Gemäß den Recherchen in Kap. 4 und der Beschreibung der Methoden in Kap. 5 er- scheinen insbesondere Methoden aus der Kategorie **MADM** („multi attribute decision making/aid“) für ein Standortauswahlverfahren geeignet. Aus den oben genannten pha- senabhängigen Aufgabenstellungen können die Methoden zunächst unterteilt werden in Verfahren, welche zur Auswertung von Informationen einen Vergleich von Untersu- chungsräumen durchführen oder die zur Ermittlung einer übergeordneten Gesamtaus- sage ohne vergleichende Bewertungen auskommen.

Für die Ausweisung von Teilgebieten bzw. Standortregionen in Phase 1 bzw. Standorten in der Phase 2 eignen sich voraussichtlich Ansätze der **Raumempfindlichkeitsunter- suchung**. Die Raumempfindlichkeitsuntersuchung dient nach /SCH 06/ zur Suche nach relativ „konfliktarmen“ Korridoren für Trassen und Standorten. Die aggregierte Empfind- lichkeit einzelner Schutzgüter wird ordinal als Raumwiderstand dargestellt. Für dieses Verfahren eignen sich insbesondere **geografische Informationssysteme** (GIS) zur Überlagerung bzw. Verschneidung von verschiedenen Geodaten. Zunächst werden

durch Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen ungeeignete Gebiete ausgeschlossen. Zur weiteren flächenmäßigen Eingrenzung und zur Ermittlung von günstigen Gebieten, können im GIS zudem geowissenschaftliche Abwägungskriterien und deren Gewichtung berücksichtigt werden. Verschiedene Studien beschreiben eine Anwendung **multikriterieller Verfahren mit GIS-Systemen**. Bezüglich der Anwendung von MADM-Verfahren mit GIS-Systemen zur Standortsuche für Deponien sei auf die Literaturrecherche in /DEM 14/ verwiesen (siehe Kap. 4.3.1).

Zur Erlangung einer Gesamtaussage müssen Informationen unter Umständen aggregiert werden. Hierdurch kann es zur Kompensation von Kriterienausprägungen (schlechte Eigenschaften werden mit guten Eigenschaften kompensiert, z. B. eine hohe Durchlässigkeit mit einer geringen Neigung von sekundären Wegsamkeiten) kommen. Die Kompensation von Informationen kann zu einem Informationsverlust führen. Deshalb wird eine hohe Kompensation von Informationen in einer Methodik als Nachteil angesehen. Dies ist übereinstimmend mit der Aussage von /APP 09/:

*„Methoden mit kompensatorischem Ansatz sind im Planungs- und Umweltbereich weniger geeignet, da sie von einem faktisch nicht gegebenen übergeordneten Nutzwert (oder Kompensierbarkeit) aller Kriterien ausgehen. Sie sind eher für ökonomische Fragestellungen anwendbar“.*

Gemäß /BT 17/ wird zudem hervorgehoben:

*„Eine rechnerische Gesamtbewertung der Erfüllung der Abwägungskriterien ist bewusst nicht vorgesehen. [...]“*

Um eine bewertende (Gesamt)-Aussage zu den geowissenschaftlichen Eigenschaften eines Untersuchungsraumes bezüglich einer günstigen geologischen Situation treffen zu können, muss voraussichtlich ein gewisser Grad an Aggregation der Informationen erfolgen. Hierfür eignen sich besonders nutzenbasierte Methoden (z. B. die Nutzwertanalyse). Beispielhafte Anwendungen der Nutzwertanalyse sind z. B. im Kap. 6.1 aufgeführt. Nach /DEM 14/ werden z. B. für die Anwendung multikriterieller Methoden in GIS Programmen insbesondere klassische Verfahren, wie AHP, SAW oder die gewichtete lineare Kombination (WLC) angewendet. Eine Einführung in die Anwendung multikriterieller Verfahren mit GIS gibt u. a. /GRÊ 19/. Zudem können z. B. die SMART- oder AHP-Methode zur rechnerischen Ermittlung von Gewichten der unterschiedlichen Bewertungs-

kriterien verwendet werden. Ob und in welcher Weise eine Aggregation von Kriterienausprägungen durchzuführen ist, kann hier nicht abschließend geklärt werden und muss durch eine Anwendung auf ein konkretes Entscheidungsproblem geprüft werden.

Grundsätzlich können multikriterielle Verfahren bzw. die Erstellung eines Entscheidungsmodells (siehe Kap. 6.2) helfen, das Entscheidungsproblem zu strukturieren und vor allem zu Beginn des Standortauswahlverfahrens dazu beitragen, Informationsdefizite zu identifizieren. Die Erstellung einer Entscheidungsmatrix (vgl. Kap. 5.4.1), für die verschiedenen Untersuchungsräume und den zugehörigen Kriterien, kann hier helfen Datenlücken zu identifizieren und erste orientierende Bewertungen durchzuführen. Inwieweit in einer frühen Phase des Standortauswahlverfahrens auch Vergleiche von Untersuchungsräumen, insbesondere aufgrund der unzureichenden Datenlage sinnvoll sind, kann hier nicht abgeschätzt werden. Es wird jedoch aus Sicht der Autoren nicht möglich sein, Untersuchungsräume, insbesondere ab Phase 2, völlig unabhängig voneinander zu betrachten. Um eine gewisse Einordnung der Untersuchungsräume bzw. der zugehörigen Bewertungskriterien durchführen zu können, muss irgendwann im Bewertungsprozess eine Einordnung erfolgen, wie die Untersuchungsräume bzw. die Kriterienausprägungen sicherheitsgerichtet „zueinanderstehen“. Aus Sicht der Autoren kann voraussichtlich keine völlig „unabhängige“ Betrachtung der Untersuchungsräume, isoliert voneinander durchgeführt werden, weswegen die Anwendbarkeit von Vergleichsmethoden u. U. für das gesamte Verfahren nicht auszuschließen ist.

Für eine vergleichende Bewertung von Standorten (insbesondere in Phase 3), werden vorzugsweise **Outranking-Methoden** als geeignet angesehen (siehe auch Kap. 5.7). Outranking-Methoden sind Verfahren der Entscheidungs-„Unterstützung“ (partielle Rangfolge) und nicht Verfahren der Entscheidungsfindung, wie z. B. klassische Methoden (vgl. Kap. 5.3), welche in der Regel absolute Rangfolgen als Ergebnis liefern. Die Bewertung einer Alternative mit Hilfe einer Outranking-Methode beruht in der Regel auf dem paarweisen Vergleich der charakterisierenden Kriterien für unterschiedliche Alternativen. Die Alternativen bzw. deren Kriterien werden somit immer nur im Vergleich bewertet, im Gegensatz zur isolierten Bewertung bei der Nutzwertanalyse. Somit ist bei den Outranking-Methoden eine Aggregation der Kriterien nicht zwangsläufig erforderlich.

Gemäß der Beschreibung in Kap. 5.7, soll jedoch nicht der Eindruck erweckt werden, dass die klassischen Verfahren grundsätzlich von einem übergeordneten Nutzwert ausgehen. Zum Beispiel wird in der AHP-Methode, im Gegensatz zur NWA, ein Alternativen-

Ranking durch einen paarweisen Vergleich von Kriterien und Alternativen ermittelt. Somit besteht keine klare Abgrenzung der klassischen Verfahren zu den Outranking-Verfahren, in Bezug auf kompensatorisch und nicht-kompensatorisch. Dadurch kann die AHP- oder auch ANP-Methode u. U. auch für einen paarweisen Vergleich von Alternativen angewendet werden. Für die AHP-Methode bestehen jedoch gewisse Nachteile, wie z. B. das Problem der Inkonsistenz der Konsistenzbedingung (widerspruchsfreie Präferenzen, siehe Kap. 5.3.3).

Mit Outranking-Methoden können zudem Unvergleichbarkeiten zwischen Alternativen identifiziert werden (Diskordanz bei ELECTRE und „Outrankingflüsse“ bei PROMETHEE), was mit klassischen Methoden nur begrenzt oder nicht möglich ist. Eine Unvergleichbarkeit (siehe auch Kap. 5.4.1) besteht, wenn bei einem Vergleich zweier Alternativen keine Alternative „dominiert“. Auf Grundlage der Bewertungskriterien kann somit keine eindeutige Einordnung in „besser“ oder „schlechter“ zwischen zwei Alternativen erfolgen. Durch die Identifizierung von Unvergleichbarkeiten ist die Erstellung einer partiellen Rangfolge möglich. Durch Outranking-Methoden können zudem unvollständige oder gar widersprüchliche Informationen über Planungsalternativen und damit verbundene zukünftige Entwicklungen, durch die Verwendung von Präferenzfunktionen /HAR 06/, /OBE 10/ berücksichtigt werden. Die Bewertungsskalen der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, bzw. deren Indikatoren, können z. B. voraussichtlich durch Präferenzfunktionen abgebildet werden.

Nach /TER 15/ berücksichtigen Outranking-Methoden nicht die hierarchische Struktur von Kriterien. In /TER 15/ wird die Meinung vertreten, dass die Unterteilung des Entscheidungsproblems (Hauptziele) in Subebenen (Nebenziele) flexiblere und realistischere Entscheidungsmodelle ermöglicht. Grundsätzlich wird eine hierarchische Struktur der Kriterien in der AHP-Methode berücksichtigt. In den letzten Jahren wurde eine weitere Methode entwickelt, die als **Multiple Criteria Hierarchy Process (MCHP)** bezeichnet wird und sich mit hierarchischen Strukturen von Kriterien befasst (siehe /COR 12/). Der Ansatz kann auf jede MADM-Methode angewendet werden, einschließlich klassischer und Outranking-Methoden. Für die Outranking-Methoden wird dieser Prozess in /COR 13/ für die ELECTRE-III-Methode erläutert (siehe auch Kap. 5.7).

Es besteht zudem die Möglichkeit eine Entscheidung rein verbal-argumentativ (engl. Verbal Decision Analysis) durchzuführen (siehe **VerSi I/II**, Kapitel 4.1.1 bzw. 4.1.2 und Kap. 4.1.5). Der Vorteil dieser Methode liegt in dem nicht-kompensatorischen Ansatz. Zudem ist die Methode relativ leicht nachvollziehbar (wenn nicht sehr viele Alternativen

vorliegen), jedoch besteht das Problem, dass die subjektiven Einflüsse des Entscheidungsträgers u. U. nicht klar nachvollziehbar und transparent offengelegt werden können. In /FOR 15/ wird deshalb hervorgehoben, dass eine **Verknüpfung von multikriteriellen Methoden und verbal-argumentativen Ansätzen** als eine gute Lösung erscheint. Da zum einen Transparenz und Nachvollziehbarkeit gewährleistet wird und zum anderen argumentative Einflüsse mit einfließen können. In der Entscheidungstheorie hat sich für verbal argumentative Methoden ein eigenes Forschungsfeld entwickelt (siehe hierzu /MOS 16/).

Aus Sicht der Autoren ist die Anwendung einer **verbal-argumentativen Bewertung** als Methode insbesondere zur Erlangung von Teilinformationen (z. B. Kriterien-Gewichtungen, Robustheitsbewertung) und zur abschließenden Abwägung bzw. Bewertung der Ergebnisse, welche sich aus der Anwendung der multikriteriellen Bewertungsverfahren ergeben, geeignet.

In /ZUI 14/ wurden neben der Nutzwertanalyse (klassische Methode) und einer Outranking-Methode, zwei zusätzliche Methoden angewendet, nämlich „Direkter Vergleich der Bewertungen und Darstellung als **Stärken-Schwächen-Profil**“ und die **Malus-Bilanzierung**. Durch diese Methoden sollen zunächst eindeutige „Stärken und Schwächen“ der Alternativen identifiziert werden. Hierzu werden in der Regel aggregierte Nutzwerte berechnet, welche durch Schwellenwerte eingeordnet werden. Somit stellen diese Methoden ein Werkzeug dar, zunächst eine Vorsortierung der Alternativen durchzuführen, um diese dann im Weiteren näher zu untersuchen. Die dabei notwendige Aggregation der Kriterienausprägungen wird, wie oben schon erwähnt, als Nachteil angesehen (siehe auch /RÖH 15/). Aufgrund der hohen Kompensation der Kriterienausprägungen ist ein qualitativer Vergleich, basierend auf einer paarweisen Einordnung, in der Form „besser“ oder „schlechter“ mit einer hohen Anzahl an Alternativen, wie er für den Optionenvergleich Asse durchgeführt wurde, voraussichtlich nicht mehr überschaubar. Eine methodische (formalisierte) Herangehensweise, wie z. B. bei den Outranking-Verfahren, ist hierfür besser geeignet.

Insbesondere muss durch **Sensitivitätsanalysen** (z. B. bezüglich alternativer Gewichtungen) die Robustheit der Bewertungen in Bezug auf den Einfluss wichtiger Kriterien und Indikatoren etc. für alle vorherigen Verfahren geprüft und abschließend verbal-argumentativ bewertet werden (siehe auch Kap. 5.6). Die Sensitivitätsanalyse ist zwar keine multikriterielle Methode, sie ist jedoch ein wichtiges Hilfsmittel zur Überprüfung der Be-



wertungsergebnisse. Mit der Sensitivitätsanalyse kann grundsätzlich der Zusammenhang zwischen Ergebnissen und den Eingangsparametern untersucht werden. Eine Überprüfung der Ergebnisse ist insbesondere bei unsicheren Daten erforderlich. Diese umfassen zum einen subjektive Entscheidungen des Entscheidungsträgers, wie zum Beispiel die Ausweisung von Kriteriengewichtungen und Präferenzen. Zum anderen können Datenungleichheiten analysiert werden /GEL 14/.

Nach /STE 16/ wurden Ungewissheiten in menschlichen Urteilen, die sich zum Beispiel auf Vorgaben von Präferenzen oder Gewichtungen beziehen, unter bestimmten Umständen durch **Fuzzy-Sets** und verwandte Ansätze, z. B. die Verwendung von s. g. **Rough Sets**, modelliert. Aus Sicht der praktischen Entscheidungshilfe erhöhen solche Ansätze die Ungenauigkeit und die Komplexität eines bereits komplexen Prozesses. Die Folge kann oft ein Verlust an Transparenz für den Entscheidungsprozess sein. Deshalb wird von den Autoren die Meinung vertreten (vgl. Kap. 6.2.7), dass zumindest interne Ungewissheiten im Idealfall so weit wie möglich durch eine bessere Strukturierung des Entscheidungsproblems und durch eine angemessene Sensitivitäts- und Robustheitsanalyse behoben werden sollten.

In der Literatur wird zudem das Problem der s. g. Rangumkehr („Rank Reversal“, siehe Kap. 5.7) beschrieben. Eine Rangumkehr bedeutet, dass die relativen Rangfolgen zweier Entscheidungsalternativen, bei einer Hinzu- und Wegnahme von Alternativen oder Kriterien, sich unter Umständen umkehren könnten. Dieses Phänomen kann u. U. auftreten, wenn Untersuchungsräume bzw. Alternativen aufgrund der sich entwickelnden Datenlage aus dem Standortauswahlverfahren herausfallen oder hinzugenommen werden. Da dieses Phänomen in allen multikriteriellen Methoden auftreten kann, ist es insbesondere notwendig, die ermittelten Rangfolgen bzw. deren Robustheit durch Sensitivitätsanalysen zu überprüfen.

Grundsätzlich wird empfohlen, dass die gewählten Methoden und Ansätze zur Entscheidungsunterstützung auch für Nichtwissenschaftler verständlich und nachvollziehbar sind /STE 16/. Dies hilft der Transparenz des Entscheidungsprozesses im Zuge der Öffentlichkeitsbeteiligung.

Aus Sicht der Autoren gibt es nicht die „Eine“ Methode, welche im Standortauswahlverfahren zur Anwendung kommt. Vielmehr wird voraussichtlich ein Methodenmix angewendet. Die Anwendung von mindestens zwei unterschiedlichen Methoden (z. B. ELECTRE und PROMETHEE) für ein Entscheidungsproblem, kann zum Beispiel zur

Überprüfung der ermittelten Ergebnisse durchgeführt werden. Eine Festlegung auf eine bestimmte Methoden-Kategorie, wie klassische Methoden, Outranking Methoden oder eine verbal-argumentative Herangehensweise, kann hier ebenfalls nicht erfolgen. Jede Kategorie bietet für die unterschiedlichen Phasen bzw. Problemstellungen des Standortauswahlverfahrens spezifische Einsatzmöglichkeiten.

Abschließend bleibt anzumerken, dass die Anwendung einer Aggregationsmethode dem Entscheider nicht die eigentliche Auswahl/Entscheidung abnimmt, sondern nur als Werkzeug der Entscheidungsunterstützung zu verstehen ist. Hierbei können geeignete Methoden insbesondere helfen das Entscheidungsproblem zu strukturieren und letztendlich die getroffenen Entscheidungen nachvollziehbarer und transparenter zu gestalten.

## 7.2        **Ausblick**

Grundsätzlich sind die aufgezeigten Hinweise und Empfehlungen für potentielle Methoden, zur Anwendung auf die relevanten Aufgabenstellungen gemäß StandAG in Bezug auf Abwägungen und Vergleiche, als vorläufige Beispiele zu sehen. Aufgrund der Vielzahl an Forschungsfeldern zu MADM-Methoden und der daraus resultierenden Methodenvielfalt, wurden im vorliegenden Bericht nur die gängigsten Methoden untersucht. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es in einigen Forschungsfeldern, weitere mögliche Ansätze für eine Anwendung in einem Standortauswahlverfahren gibt.

Eine abschließende Anwendbarkeit und Eignung der im vorliegenden Bericht erwähnten Methoden, muss im Rahmen einer beispielhaften Anwendung an einem konkreten Entscheidungsproblem, im Zuge des Standortauswahlverfahrens durchgespielt bzw. getestet werden. Dies war nicht Aufgabenstellung des MABeSt-Vorhabens.

Da Entscheidungen in der Regel **immer subjektiv** sind, sollte eine getroffene Entscheidung bzw. ein Entscheidungsproblem, durch mindestens zwei oder besser mehrere unabhängige Entscheidungsträger/Analysten bewertet werden. Dies ist nach Meinung der Autoren ein Weg, um eine gewisse „Objektivität“ im Entscheidungsprozess zu gewährleisten.

Grundsätzlich stehen die sicherheitstechnischen Aspekte bei der Auswahl von Standorten bzw. der Eingrenzung der Untersuchungsräume im Vordergrund. Die hier betrachte-

ten multikriteriellen Entscheidungsunterstützungsmethoden können zudem auch ökologische und sozio-ökonomische Aspekte in Bezug auf ein positives Akzeptanzverhalten aller beteiligten Interessengruppen, bei der Bewertung und Entscheidungsfindung sicherheitstechnisch gleichwertiger Standorte berücksichtigen.



## 8 Literaturverzeichnis

- /ABD 14/ Abdullah, L., Adawiyah, C. R.: Simple Additive Weighting Methods of Multi criteria Decision Making and Applications: A Decade Review. International Journal of Information Processing and Management(IJIPM), Bd. 5, S. 39–49, 2014.
- /AIR 18/ Aires, Renan Felinto de Farias, Ferreira, L.: The rank reversal problem in multi-criteria decision making: A literature review. Pesquisa Operacional, Bd. 38, Nr. 2, S. 331–362, DOI 10.1590/0101-7438.2018.038.02.0331, 2018.
- /AKE 02/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (Hrsg.): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd, Abschlussbericht. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), 260 S.: Köln, Dezember 2002.
- /AND 05a/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile, Tome: Safety evaluation of a geological repository. Report Series, 525 S., ISBN 2-9510108-7-70108-8-5: Châtenay-Malabry, France, 2005.
- /AND 05b/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile, Synthesis: Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation, Meuse/Haute-Marne site. Collection les Rapports, Bd. 268, 241 S., ISBN 2-916162-00-3: Châtenay-Malabry, France, 2005.
- /APP 09/ Appel, D., Kreuzsch, J.: Grundlagen der Methodik und Anforderungen bei der vergleichenden Bewertung von Endlagern in verschiedenen geologischen Situationen., Abschlussbericht zum VerSi-Vorhaben 3607R02589: Durchführung vergleichender Langzeitsicherheitsanalysen für verschiedene geologische Situationen zur Evaluierung der Methodik und der Instrumentarien. Hannover, 2009.

- /APP 15/ Appel, D., Kreuzsch, J., Neumann, W.: Darstellung von Entsorgungsoptionen, Transversalprojekt Interdisziplinäre Risikoforschung Arbeitspaket Interdisziplinäre Risikoforschung Modul 1: Entsorgungsoptionen und -systeme. ENTRIA-Arbeitsbericht, ENTRIA-Arbeitsbericht-01, 176 S., 2015.
- /ASN 08/ RFS-III.2.f du 01.06.1991 (abrogée par le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 12.02.08), zuletzt geändert 12. Februar 2008.
- /ASN 10/ Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN): Dossier 2009 relatif au projet HAMAVL et demande de renouvellement de l'autorisation d'exploitation du laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne. erreichbar unter <http://www.asn.fr/L-ASN/Appuis-techniques-de-l-ASN/Les-groupes-permanents-d-experts/Groupe-permanent-d-experts-pour-les-dechets-GPD/Seance-du-29-novembre-2010>, Stand von 2010.
- /ASN 13/ Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN): L'ASN rend un avis sur les documents produits par l'ANDRA depuis 2009 relatifs au projet de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde. erreichbar unter <http://www.asn.fr/Informer/Actualites/L-ASN-rend-un-avis-sur-les-documents-relatifs-au-projet-de-stockage-de-l-ANDRA>, Stand vom 22. Mai 2013.
- /BAC 78/ Bachfischer, R.: Die ökologische Risikoanalyse: eine Methode zur Integration natürlicher Umweltfaktoren in die Raumplanung. 298 S., Technische Universität München, 1978.
- /BAL 01/ Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S., Kockel, F.: Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor, Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. Geologisches Jahrbuch, A153, S. 88, 2001.
- /BEC 78/ Bechmann, A.: Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung. Beiträge zur Wirtschaftspolitik, ISBN 9783258026947, Haupt, 1978.

- /BEH 10/ Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., Aghdasi, M.: PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, Bd. 200, Nr. 1, S. 198–215, DOI 10.1016/j.ejor.2009.01.021, 2010.
- /BEL 83/ Belton, V., Gear, T.: On a short-coming of Saaty's method of analytic hierarchies. *Omega*, Nr. 11, S. 228–230, DOI 10.1016/0305-0483(83)90047-6, 1983.
- /BFE 08/ Bundesamt für Energie (BFE): Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil, Revision vom 30. November 2011. 92 S.: Bern, 2. April 2008.
- /BfS 10/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Optionenvergleich Asse, Fachliche Bewertung der Stilllegungsoptionen für die Schachtanlage Asse II. 19/10, 231 S.: Salzgitter, Germany, 2010.
- /BfS 19/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Asse - Optionenvergleich - Bewertungskriterien - Machbarkeitsstudien. Stand vom 15. Januar 2019, erreichbar unter <https://archiv.bge.de/archiv/www.asse.bund.de/Asse/DE/themen/was-wird/stilllegungskonzept/optionsvergleich/bewertungskriterien.html>, abgerufen am 18. Juni 2019.
- /BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich, Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz. 189 S.: Salzgitter, 4. November 2005.
- /BFS 09/ Fachbereiche Sicherheit nuklearer Entsorgung und Strahlenschutz und Umwelt: Kriterien zur Bewertung von Stilllegungsoptionen für das Endlager für radioaktive Abfälle Asse. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 63 S.: Salzgitter, Germany, 2009.
- /BFS 14/ Fachbereiche Sicherheit nuklearer Entsorgung und Strahlenschutz und Umwelt: Kriterienbericht Zwischenlager, Kriterien zur Bewertung potenzieller Standorte für ein übertägiges Zwischenlager für die rückgeholten radioaktiven Abfälle aus der Schachtanlage Asse II. 37 S., 2014.

- /BGR 07/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland, Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. 17 S.: Hannover / Berlin, April 2007.
- /BGR 14/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Der tiefere geologische Untergrund von Deutschland, Kurzübersicht über Verteilung und Dichte geowissenschaftlicher Daten und Informationen, Vorlage für die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 11, 16 S.: Hannover, Oktober 2014.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /BMU 19a/ Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, Artikel 2: Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle - Endl-SiUntV - Referentenentwurf (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung – EndlSiUntV)) - Referentenentwurf (EndlSiUntV) in der Fassung von Referentenentwurf v. 04.07.2019, zuletzt geändert 4. Juli 2019.
- /BMU 19b/ Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle - Artikel 1 Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV) - Referentenentwurf (EndlSiAnfV) in der Fassung von Referentenentwurf, zuletzt geändert 4. Juli 2019.
- /BMU 19c/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): Referentenentwurf, Verordnungen über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. 49 S.: Berlin, 11. Juli 2019.



- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Herklotz, M., Herzog, C., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Weiß, E., Wolf, J., Ziegenhagen, J., Hammer, J., Sönke, J., Mingerzahn, G.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA), Synthesebericht, FKZ 02 E 10346. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), TEC-29-2008-AB, 185 S.: Peine, November 2011.
- /BR 17/ Bundesrat (BR): Gesetzesbeschluss des Deutschen Bundestages, Gesetz zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. Drucksache des deutschen Bundesrates, 239/17, 4 S., 24. März 2017.
- /BRA 82/ Brans, J. P.: L'ingenierie de la decision. Elaboration d'instruments daide a la decision. Methode PROMETHEE. Präsentation, Universität Laval, L'aide a la Decision: Nature, Instrument's et Perspectives d'avenir.: Quebec, Canada, 1982.
- /BRA 85/ Brans, J. P., Vincke, P.: A Preference Ranking Organisation Method, (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). Management Science, Nr. 31, S. 647–656, 1985.
- /BRA 86/ Brans, J. P., Vincke, P., Mareschal, B.: How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. European Journal of Operational Research, Nr. 24, S. 228–238, 1986.
- /BT 17/ Deutscher Bundestag (BT): Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Beschlussvorlage, Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. Drucksache des deutschen Bundestages, 18/11398, 77 S.: Berlin, 7. März 2017.

- /BUN 90/ Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Februar 2010 (BGBl. I S. 94), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 8. September 2017 (BGBl. I S. 3370) geändert worden ist, zuletzt geändert 12. Februar 1990.
- /BUN 18/ Kernenergiegesetz (KEG) in der Fassung vom 1. Januar 2018, zuletzt geändert 2018.
- /CAS 18/ Castro, D. M., Parreiras, F. S.: A review on multi-criteria decision-making for energy efficiency in automotive engineering. Applied Computing and Informatics, DOI 10.1016/j.aci.2018.04.004, 2018.
- /CHA 09/ Chapman, N. e. a.: Development of methodologies for the identification of volcanic and tectonic hazards to potential HLW repository sites in Japan, Summary Report. Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), NUMO-TR, 09-03, 59 S., November 2009.
- /CHA 12/ Chapman, N.: TOPAZ Project - Long-term Tectonic Hazard to Geological Repositories. Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), NUMO-TR-12-05, 94 S., Oktober 2012.
- /CHA 17/ Chapman, N.: TOPAZ Project - Long-term Tectonic Hazard to Geological Repositories. Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), NUMO-TR-16-04, 102 S.: Tokyo, Februar 2017.
- /CHE 06/ Chen, Y.: Multiple Criteria Decision Analysis: Classification Problems and Solutions. University of Waterloo, Dissertation, 183 S.: Ontario, Canada, 2006.
- /CNE 95/ Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE): Rapport d'évaluation No. 1. 164 S.: Paris, France, Juni 1995.
- /COR 12/ Corrente, S., Greco, S., Słowiński, R.: Multiple Criteria Hierarchy Process in Robust Ordinal Regression. Decision Support Systems, Nr. 53, S. 660–674, DOI 10.1016/j.dss.2012.03.004, Juni 2012.

- /COR 13/ Corrente, S., Greco, S., Slowinski, R.: Multiple Criteria Hierarchy Process with ELECTRE and PROMETHEE. Omega, Nr. 41, S. 820–846, DOI 10.1016/j.omega.2012.10.009, 2013.
- /CUR 19/ Curt Ullrich Ronniger: Analytischer Hierarchieprozess. 11 S., CRGRAPH, erreichbar unter <http://www.versuchsmethoden.de/AHP.pdf>, abgerufen am 1. August 2019.
- /CUR 94/ Curti, E., Klos, R., Smith, P., Zuidema, P., Sumerling, T. J.: Kristallin-I Safety Assessment Report. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technical Report, NTB 93-22: Wettingen, Schweiz, Juli 1994.
- /DBE 16/ DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Gutachten Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. Material für die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 58, 92 S., 2016.
- /DEM 14/ Demesouka, O. E., Vavatsikos, A. P., Anagnostopoulos, K. P.: GIS-based multicriteria municipal solid waste landfill suitability analysis: a review of the methodologies performed and criteria implemented. Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, Bd. 32, Nr. 4, S. 270–296, DOI 10.1177/0734242X14526632, 2014.
- /DOE 16/ U.S. Department of Energy (DOE): General guideline for the preliminary screening of potential sites for a nuclear waste repository. Code of Federal Regulations (CFR), Title 10, Part 960, S. 686–717, 2016.
- /DOU 04/ Doumpos, M., Zopounidis, C.: Multicriteria Decision Aid Classification Methods. Applied Optimization, Bd. 73, 263 S., DOI 10.1007/b101986, Kluwer Academic Publishers: Boston, MA, 2004.

- /EBE 89/ Eberle, D.: Methoden zur Aggregation von UVP-Teilergebnissen zu einem handlungsbezogenen Gesamtergebnis. Kommunale Bauleitplanung und Umweltverträglichkeitsprüfung. Kaiserslautern, Beiträge im Rahmen einer zweiteiligen wissenschaftlichen Arbeitstagung am 03.-05. Oktober 1988 und 03.-05. April 1989. 1989.
- /ECK 18/ Eckardt, A., Neumann, W., Kreusch, J.: Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle., ENTRIA-Arbeitsbericht-12. Hrsg.: Entria, 241 S.: Zürich, 2018.
- /EID 10/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich, Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. Schweizerische Eidgenossenschaft, ENSI 33/075, 26 S.: Brugg, Schweiz, 2010.
- /ENSI 09/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis., Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, G03/d, 21 S.: Brugg, April 2009.
- /ENSI 13/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): 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. ENSI 33/154, 21 S.: Brugg, Schweiz, Januar 2013.
- /ENSI 17/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) (Hrsg.): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. ENSI, 33/540, 286 S.: Brugg, Schweiz, April 2017.

- /ENSI 18/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Standortsuche für geologische Tiefenlager: Bundesrat startet dritte Etappe mit Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost » ENSI. 3 S., erreichbar unter <https://www.ensi.ch/de/2018/11/22/standortsuche-fuer-geologische-tiefenlager-bundesrat-startet-dritte-etappe-mit-jura-ost-noerdlich-laegern-und-zuerich-nordost/>, abgerufen am 4. Juli 2019.
- /FAß 17/ Faß, T., Hartwig-Thurat, E., Krischer, A., Lambers, L., Larue, P.-J., Uhlmann, S., Weyand, T.: Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Abschlussbericht zum Vorhaben 3616E03200. GRS-471, 74 S., ISBN 978-3-946607-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /FGS 12/ FGSV Verlag, K. (Hrsg.): Hinweise zur Evaluation von verkehrsbezogenen Maßnahmen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.: Köln, 2012.
- /FIS 10/ Fischer-Appelt, K., Baltes, B.: Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen - Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3536: Köln, 1. Dezember 2010.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, P.-J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, 424 S., ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /FIS 17/ Fischer-Appelt, K., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Beuth, T., Bracke, G., Faß, T., Larue, P.-J., Mayer, K.-M., Seher, H., Hartwig-Thurat, E.: Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-478, ISBN 978-3-946607-61-8: Köln, Oktober 2017.

- /FIS 19/ Fischer, A., Hoth, P.: Vorstellung des Entwurfs für ein Geologiedatengesetz. Präsentation, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), NBG-Workshop "Geologische Daten im Brennpunkt", Nationales Begleitgremium (NBG): Berlin, 2. Februar 2019.
- /FOR 15/ Fornauf, L.: Entwicklung einer Methodik zur Bewertung von Strategien für das dynamische Straßenverkehrsmanagement. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, 304 S.: Darmstadt, 2015.
- /FRA 91/ Law no 91-1381 of 12/30/1991 concerning researches on radioactive waste management (Waste Act "Loi Bataille"), zuletzt geändert 30. Dezember 1991.
- /FRE 09/ French, S., Maule, J., Papamichail, N.: Decision behaviour, analysis and support. 472 S., ISBN 9780521709781, DOI 10.1017/CBO9780511609947, Cambridge University Press: Cambridge, 2009.
- /FÜR 08/ Fürst, D.: Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. 656 S., ISBN 9783939486237, Rohn, 2008.
- /GEL 12/ Geldermann, J.: Multikriterielle Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl von Biomassennutzungskonzepten. Präsentation, Georg-August-Universität Göttingen, Fachtagung - Chancen und Risiken der Bioenergie im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung: Göttingen, 2012.
- /GEL 14/ Geldermann, J.: Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung. Georg-August-Universität Göttingen, 69 S.: Göttingen, 2014.
- /GIL 18a/ Gillenkirch, R. M.: Handlungsalternative. Hrsg.: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Gabler Wirtschaftslexikon: Wiesbaden, Stand vom 19. Februar 2018, erreichbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/handlungsalternative-53897/version-276959>, abgerufen am 19. Juli 2019.

- /GIL 18b/ Gillenkirch, R. M.: Ergebnismatrix. Gabler Wirtschaftslexikon, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Stand vom 19. Februar 2018, erreichbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/ergebnismatrix-33105/version-256633>, abgerufen am 19. Juli 2019.
- /GOL 09/ Goldsworthy, M., Seidel, K., Popp, T.: Anforderungen an Methoden und Umfang der über- und untertägigen Erkundung eines Standortes für ein Endlager unter Einbeziehung eines internationalen Vergleichs. Golder Associates GmbH, GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH, Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH, BfS-RESFOR-15-09: Salzgitter, August 2009.
- /GOO 94/ Goodwin, B. W., McConnell, D. B., Andres, T. H.: The disposal of Canada's nuclear fuel waste: postclosure assessment of a reference system. Atomic Energy of Canada Limited, AECL-10717, 684 S., 1994.
- /GRA 19/ Grauel, A.: Computational Intelligence - Fuzzy Tutorial. 122 S., Fachhochschule Südwestfalen - Center Computational Intelligence and Cognitive Systems: Soest, Stand vom 24. September 2019, erreichbar unter [https://www4.fh-swf.de/media/downloads/fbin/download\\_4/lehmann\\_1/internci2/ci2/skripte/fuzzy\\_3/Fuzzy-Tutorial\\_1\\_Gra\\_Leh30Teil.pdf](https://www4.fh-swf.de/media/downloads/fbin/download_4/lehmann_1/internci2/ci2/skripte/fuzzy_3/Fuzzy-Tutorial_1_Gra_Leh30Teil.pdf), abgerufen am 24. September 2019.
- /GRÊ 19/ Grêt-Regamey, A., van Strien, M. J.: Multi-Criteria Decision Analysis, Script for course 103-0307-00L. ETH Zürich, September 2019.
- /GUT 15/ Gutberlet, D.: Können multikriterielle Analysemodelle die Standortauswahl für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle unterstützen? Mining Report, 151 (3), S. 188–195, 2015.
- /HAA 04/ Haakh, F., Lang, U., Keim, B., Eisele, W., Schneck, A., Emmert, M., Kopp, A., Sanzenbacher, J., Maier, A.: Optimierung des Gebietswasserhasushalts in Wassergewinnungsgebieten - ENDBERICHT -. BMBF-Forschungsvorhaben, 310 S.: Stuttgart, 2004.

- /HAD 18/ Haddad, M., Sanders, D.: Selection of discrete multiple criteria decision making methods in the presence of risk and uncertainty. *Operations Research Perspectives*, Bd. 5, S. 357–370, DOI 10.1016/j.orp.2018.10.003, 2018.
- /HÄM 96/ Hämäläinen, R. P., Seppäläinen, T. O.: The analytic network process in energy policy planning. *Socio-Economic Planning Sciences*, Bd. 20, Nr. 6, S. 399–405, DOI 10.1016/0038-0121(86)90054-6, 1986.
- /HAR 06/ Harth, M.: Multikriterielle Bewertungsverfahren als Beitrag zur Entscheidungsfindung in der Landnutzungsplanung, unter besonderer Berücksichtigung der Adaptiven Conjoint-Analyse und der Discrete Choice Experiments, Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Dissertation, 334 S.: Halle (Saale), 2006.
- /HAR 17/ Hartwig-Thurat, E., Larue, P.-J.: Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht, Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum Arbeitspaket 2. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-471 Anhang 8, 75 S.: Köln, August 2017.
- /HED 03/ Hedin, A.: Planning report for the safety assessment SR-Can. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, 03-08, 164 S.: Stockholm, Schweden, Juni 2003.
- /HEI 17/ Heinen-Esser, U.: Standortauswahlverfahren – Überblick über Phase 1. Präsentation, GRS-Fachgespräch, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, 8. Mai 2017.
- /HSK 93/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. HSK-R-21/d, 12 S.: Villigen, Switzerland, November 1993.



- /HSK 07/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) (Hrsg.): Sachplan geologische Tiefenlager, Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation. HSK 33/001, November 2007.
- /HUA 11/ Huang, I. B., Keisler, J., Linkov, I.: Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends. *The Science of the total environment*, Bd. 409, Nr. 19, S. 3578–3594, DOI 10.1016/j.scitotenv.2011.06.022, 2011.
- /HÜB 89/ Hübler, K.-H.: Bewertungsverfahren zwischen Qualitätsanspruch, Angebot und Anwendbarkeit. In: Hübler, K.-H., Otto-Zimmermann, K. (Hrsg.): *Bewertung der Umweltverträglichkeit, Bewertungsmaßstäbe und Bewertungsverfahren für die Umweltverträglichkeitsprüfung*. Kongreß Kommunale Umweltverträglichkeitsprüfung, S. 124–142, ISBN 3893670025, Blottner Verlag: Taunusstein, 1989.
- /IRSN 12/ Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN): Synthèse de l'examen mené par l'IRSN du « Dossier 2009 » de l'Andra relatif au projet de stockage de déchets radioactif HA-MAVL en couche géologique profonde. erreichbar unter [http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_gp/gp-dechets/Pages/Synthese-rapport-IRSN-Dossier2009-Andra-stockage-HAMAVL.aspx](http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/gp-dechets/Pages/Synthese-rapport-IRSN-Dossier2009-Andra-stockage-HAMAVL.aspx), abgerufen am 27. März 2018.
- /IRSN 13/ Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN): Rapport de l'IRSN sur l'examen des études remises depuis 2009 par l'Andra concernant le projet de centre industriel de stockage géologique Cigéo. erreichbar unter [http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_gp/gp-dechets/Pages/Rapport-IRSN-Etudes-Andra-Projet-Cigeo.aspx](http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/gp-dechets/Pages/Rapport-IRSN-Etudes-Andra-Projet-Cigeo.aspx), Stand vom 22. Mai 2013.

- /JOB 16/ Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A., Wolf, J.: Projekt CHRISTA: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-20-2016-AB: Peine, 20. Oktober 2016.
- /JOB 17/ Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübél, A., Stark, L., Ziefle, G.: Projekt ANSICHT, Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland, Synthesebericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-19-2016-AB, 30. März 2017.
- /KAY 19/ Kaya, İ., Çolak, M., Terzi, F.: A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making. *Energy Strategy Reviews*, Bd. 24, S. 207–228, DOI 10.1016/j.esr.2019.03.003, 2019.
- /KEL 09/ Keller, S.: Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 28 S.: Hannover, 2009.
- /KEV 16/ Kernenergieverordnung (KEV) in der Fassung vom 10. Dezember 2004, zuletzt geändert 1. Juli 2016.
- /KIK 05/ Kiker, G. A., Bridges, T. S., Varghese, A., Saeger, T. P., Linkov, I.: Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, Bd. 1, Nr. 2, S. 95–108, 2005.

- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht, Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, 683 S.: Berlin, 30. August 2016.
- /KRE 18/ Kreusch, J., Neumann, W.: Identifizierung von Robustheitsdefiziten für die vergleichende Bewertung von Referenzmodellen zur Tiefenlagerung, Methodik und Ergebnisdarstellung. Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA), ENTRIA-Arbeitsbericht-10, 249 S.: Hannover, 2018.
- /KUD 16/ Kudla, W., Weißbach, J.: Exemplarische Ermittlung von betroffenen Teilgebieten / Regionen in der Phase 1 bei einer Standortauswahl für ein Endlager und Auswirkungen auf die Bürgerbeteiligung, Entwurf 2. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. /AG1-63a & K-Drs. /AG3-83a, 19 S.: Berlin, 16. Januar 2016.
- /LAU 12/ Laux, H., Gillenkirch, R. M., Schenk-Mathes, H. Y.: Entscheidungstheorie. 8. Aufl., 577 S., DOI 10.1007/978-3-642-23511-5, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2012.
- /LEY 86/ Leydecker, G.: Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 1000-1981. Geologisches Jahrbuch, E 36, S. 84, 1986.
- /LI 14/ Li, Y., Thomas, M. A.: A Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) Software Selection Framework. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE 8th International Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE), 7 - 11 April 2014. 2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Waikoloa, HI, 6. - 9. Januar 2014, S. 1084–1094, ISBN 978-1-4799-2504-9, DOI 10.1109/HICSS.2014.141, IEEE: Piscataway, NJ, 2014.

- /LÜT 08/ Lütters, H.: Analytic Hierarchy Process (AHP) in der Marktforschung. webAHP GmbH, Stand vom 9. April 2008, erreichbar unter <https://www.marktforschung.de/wissen/fachartikel/marktforschung/analytic-hierarchy-process-ahp-in-der-marktforschung/>, abgerufen am 1. August 2019.
- /MER 87/ Merkhofer, M. W., Keeney, R. L.: A Multiattribute Utility Analysis of Alternative Sites for the Disposal of Nuclear Waste, *Decision Analysis. Risk Analysis*, Bd. 7, Nr. 2, S. 173–194, DOI 10.1111/j.1539-6924.1987.tb00981.x, 1987.
- /MOS 16/ Moshkovich, H., Mechitov, A., Olson, D.: Verbal Decision Analysis. In: Greco, S., Ehrgott, M., Figueira, J. R. (Hrsg.): *Multiple Criteria Decision Analysis, State of the Art Surveys*. 2. Aufl., DOI 10.1007/978-1-4939-3094-4, Springer-Verlag New York, 2016.
- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose, Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-275, 169 S., ISBN 978-3-939355-51-9: Köln, 2011.
- /MÜL 07/ Müller-Herbers, S.: Methoden zur Beurteilung von Varianten. Fakultät Architektur und Stadtplanung, Institut für Grundlagen der Planung, Prof. Dr. Ing. Walter Schönwandt, 4. Aufl., 93 S.: Stuttgart, 2007.
- /MUS 13/ Mustajoki, J., Marttunen, M.: Comparison of Multi-Criteria Decision Analytical Software, Searching for ideas for developing a new EIA-specific multi-criteria software. Finnish Environment Institute, 85 S., 2013.
- /NAG 85a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Projekt GEWÄHR 1985, Endlager für hochaktive Abfälle, Das System der Sicherheitsbarrieren. Projektberichte GEWÄHR, NGB 85-04, 345 S.: Baden, Januar 1985.
- /NAG 85b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Projekt GEWÄHR 1985, Endlager für hochaktive Abfälle, Bautechnik und Betriebsphase. Projektbericht, NGB 85-03, 247 S.: Baden, Januar 1985.

- /NEA 94/ Neall, F. B., Baertschi, P., McKinley, I. G., Smith, P. A., Sumerling, T. J., Umeki, H.: Kristallin-I Results in Perspective. NAGRA, Technical Report, 93-23, 130 S.: Wetingen (Switzerland), Dezember 1994.
- /NUMO 04/ Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO) (Hrsg.): Evaluating Site Suitability for a HLW Repository, Scientific Background and Practical Application of NUMO's Siting Factors. NUMO-TR-04-04, 74 S.: Tokyo, August 2004.
- /NUMO 13/ Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO): Safety of the Geological Disposal Project 2010, Safe Geological Disposal Based on Reliable Technologies. NUMO-TR-13-05, 148 S., 2013.
- /NWMO 10/ Nuclear Waste Management Organization (NWMO): Process for Selecting a Site for Canada's Deep Geological Repository for Used Nuclear Fuel. 52 S., 2010.
- /NWT 15/ US Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB): Designing a Process for Selecting a Site for a Deep-Mined, Geologic Repository for High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel, Overview and Summary, Report to the United States Congress and the Secretary of Energy. 68 S.: Washington, DC, USA, 2015.
- /OBE 10/ Oberschmidt, J.: Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme. Universität Göttingen, Dissertation, 340 S.: Göttingen, 2010.
- /OEC 16/ OECD/NEA: Japan's Siting Process for the Geological Disposal of High-level Radioactive Waste: An International Peer Review, Radioactive Waste Management. OECD Publishing, DOI 10.1787/9789264265035-en: Paris, 2016.
- /OTT 12/ Ott, R.: Analyse und Vergleich von Methoden zur integrierten Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen im Schienenverkehr. Technische Universität Dresden, 84 S.: Dresden, 2012.

- /PET 97/ Petraš, J. C.E.: Ranking the sites for low- and intermediate-level radioactive waste disposal facilities in Croatia. *International Transactions in Operational Research*, Bd. 4, Nr. 4, S. 237–249, DOI 10.1016/S0969-6016(97)00003-8, 1997.
- /PNC 92/ Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation: Research and Development on Geological Disposal of High Level Radioactive Waste, First Progress Report. Hrsg.: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, PNC TN1410 93-059, 468 S.: Tokyo, Japan, September 1992.
- /REC 14/ Rechard, R. P., Cotton, T. A., Voegelé, M. D.: Site selection and regulatory basis for the Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste. *Reliability Engineering & System Safety*, Bd. 122, S. 7–31, DOI 10.1016/j.ress.2013.06.021, 2014.
- /REE 09/ Reeg, M.: Auswahl einer MCDA-Methode unter Nachhaltigkeitsbedingungen für ein Bioenergiekonzept in Ludwigsfelde. 157 S.: Berlin, 2009.
- /RÖH 15/ Röhlig, K.-J.: Sachplan Etappe 2: Expertenauftrag Methodik (Multikriterienanalysen), Expertenbericht. Hrsg.: Schweizerische Eidgenossenschaft, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), ENSI, 33/465, 31 S., Juli 2015.
- /RÖH 19/ Röhlig, K.-J., Chaudry, S., Plischke, E.: Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA, 2013-2018): Abschlussbericht Ergebnisse und Leistungsbilanz. Technische Universität Clausthal, Abschlussbericht, 827 S., ISBN 978-3-86948-679-6, DOI 10.21268/20190225-1, Universitätsbibliothek der TU Clausthal: Clausthal-Zellerfeld, 2019.
- /SAA 96/ Saaty, T. L.: Multicriteria decision making, The analytic hierarchy process ; planning, priority setting, resource allocation. *Analytic hierarchy process series*, Bd. 1, 2. Aufl., ISBN 0-9620317-2-0, RWS Publ: Pittsburgh, Pa., 1996.

- /SAA 01/ Saaty, T. L.: Decision making with dependence and feedback, The analytic network process ; the organization and prioritization of complexity. The analytic hierarchy process series, 2. Aufl., 376 S., ISBN 0-9620317-9-8, RWS Publications: Pittsburgh, 2001.
- /SCH 05/ Scholles, F.: Bewertungs- und Entscheidungsmethoden. In: Ritter, E.-H. (Hrsg.): Handwörterbuch der Raumordnung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 4. Aufl., S. 97–106, ISBN 9783888385551, Akad. für Raumforschung und Landesplanung: Hannover, 2005.
- /SCH 06/ Scholles, F.: Bewertungs- und Entscheidungsmethoden. Handwörterbuch der Raumordnung, 4. Aufl., 10 S.: Hannover, 2006.
- /SCH 12/ Schramm, F., Morais, D. C.: Decision support model for selecting and evaluating suppliers in the construction industry. Pesquisa Operacional, Bd. 32, Nr. 3, S. 643–662, 2012.
- /SCH 16/ Schlacke, S., Baumgart, S., Greiving, S., Schnittker, D.: Gutachten "Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien", Geschäftszeichen: GSt StandAG – 113-22. Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT, Nr. 65, 120 S., 6. Juni 2016.
- /SCH 18/ Schär, S.: State-of-the-Art dynamischer Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung. Junior Management Science, Nr. 3, S. 146–165, DOI 10.5282/JUMS/V3I3PP146-165, 2018.
- /SIM 03/ Simon, U.: Multikriterielle Bewertung von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen aus gewässerökologischer Sicht: Beispiel Berlin. Tenea Wissenschaft, ISBN 9783936582734, Tenea, 2003.
- /SIT 19/ Sitorus, F., Cilliers, J. J., Brito-Parada, P. R.: Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends. Expert Systems with Applications, Bd. 121, S. 393–417, DOI 10.1016/j.eswa.2018.12.001, 2019.

- /SKB 00/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository. SKB Technical Report, TR-00-20, 115 S., 2000.
- /SKB 11/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, 276 S.: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /STA 17/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 26, S. 1074-1100), zuletzt geändert 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 52, S. 2808–2838).
- /STE 16/ Stewart, T. J., Durbach Ian: Dealing with Uncertainties in MCDA. In: Greco, S., Ehrgott, M., Figueira, J. R. (Hrsg.): Multiple Criteria Decision Analysis, State of the Art Surveys. 2. Aufl., S. 467–492, DOI 10.1007/978-1-4939-3094-4, Springer-Verlag New York, 2016.
- /SVE 92/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Final disposal of spent nuclear fuel. SKB 91 - Importance of the bedrock for safety. Technical Report, 92-20, 230 S., Mai 1992.
- /TER 15/ Terrientes, Luis Miguel Del Vasto: Hierarchical outranking methods for multi-criteria decision aiding. Universitat Rovira i Virgili, 164 S.: Tarragona, Mai 2015.
- /TOF 14/ Tofallis, C.: Add or Multiply? A Tutorial on Ranking and Choosing with Multiple Criteria. INFORMS Transactions on Education, Bd. 14, Nr. 3, S. 109–119, DOI 10.1287/ited.2013.0124, 2014.
- /TSC 99/ Tscheulin, D. K.: Analytic Hierarchy-Process. In: Herrmann, A. (Hrsg.): Marktforschung, Methoden, Anwendungen, Praxisbeispiele. Gabler-Lehrbuch, S. 579–606, ISBN 3409123911, Gabler: Wiesbaden, 1999.



- /VIE 92/ Vieno, T., Hautojarvi, A., Koskinen, L., Nordman, H.: TVO-92 Safety Analysis of Spent Fuel Disposal. Technical Report, 92-33: Helsinki, Finland, 1992.
- /WAN 09/ Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., Zhao, J.-H.: Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Nr. 13, S. 2263–2278, DOI 10.1016/j.rser.2009.06.021, 2009.
- /WAŹ 19/ Wątróbski, J., Jankowski, J., Ziemia, P., Karczmarczyk, A., Ziolo, M.: Generalised framework for multi-criteria method selection. Omega, Bd. 86, S. 107–124, DOI 10.1016/j.omega.2018.07.004, 2019.
- /WIK 18/ Wikipedia: Quasiordnung. Wikimedia Foundation Inc., erreichbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Quasiordnung>, Stand vom 5. Juni 2018.
- /WIL 12/ Wilkens, I.: Multikriterielle Analyse zur Nachhaltigkeitsbewertung von Energiesystemen – Von der Theorie zur praktischen Anwendung. Technischen Universität Berlin, Dissertation, 202 S.: Berlin, 2012.
- /YAT 15/ Yatsalo, B., Didenko, V., Gritsyuk, S., Sullivan, T.: Decerns: A Framework for Multi-Criteria Decision Analysis. 22 S., 2015.
- /ZAD 65/ Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets. Information and Control, Bd. 8, S. 338–353, 1965.
- /ZAM 02/ Zampich, T.: Bewertung von Eignungsflächen für Windkraftanlagen: Dargestellt am Beispiel von ausgewählten Gemeinden des Regierungsbezirks Münster. ISBN 9783832460068, Diplomica Verlag GmbH, 2002.
- /ZAN 71/ Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 2. Aufl., 370 S., Wittemann: München, 1971.

- /ZIM 13/ Zimmermann, H. J., Gutsche, L.: Multi-Criteria Analyse: Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften, ISBN 9783642581984, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- /ZUI 08/ Zuidema, P., Albert, W., Gautschi, A., Gribi, P., Lambert, A., Müller, H., Schnellmann, M.: Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 08-03, 428 S.: Wettingen, Oktober 2008.
- /ZUI 14/ Zuidema, P., Albert, W., Deplazes, G., Gautschi, A., Gribi, P., Hertrich, M., Madritsch, H., Ruff, M., Schneider, J., Schnellmann, M.: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2, Textband + Anhang. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 14-01, 390 S.: Wettingen, Dezember 2014.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Schematische Darstellung der Phasen 1 bis 3 (abgeleitet aus StandAG /STA 17/)	4
Abb. 1.2	Wesentliche Arbeitsschritte der einzelnen Phasen im Standortauswahlverfahren gemäß StandAG	6
Abb. 2.1	Wesentliche Arbeitsschritte im § 13 und § 14 StandAG (verändert nach /HEI 17/)	13
Abb. 2.2	Schematisches Ablaufschema für den § 13 StandAG	15
Abb. 2.3	Schematisches Ablaufschema für den § 14 StandAG	22
Abb. 2.4	Ablaufschema nach § 16 StandAG	32
Abb. 2.5	Ablaufschema für den § 18 StandAG	41
Abb. 3.1	Schematische Darstellung der multikriteriellen Entscheidung für verschiedene Handlungsalternativen (verändert nach /GEL 12/)	57
Abb. 3.2	Kriterienhierarchie am Beispiel zum Kauf eines Gebrauchtwagens /GEL 14/	58
Abb. 3.3	Erläuterung der Skalentypen (eigene Darstellung)	59
Abb. 3.4	Schematische Darstellung der „Auswahl“-Möglichkeiten für multikriterielle Entscheidungsprobleme (verändert nach /DOU 04/)	63
Abb. 3.5	Grundmodell der Entscheidungstheorie (verändert nach /LAU 12/)	64
Abb. 4.1	Überblick über die Einzelschritte der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik für den Endlagersystemvergleich /FIS 10/	67
Abb. 4.2	Modulares Komponentenmodell des Vorhabens VerSi II /FIS 17/	73
Abb. 4.3	Rechnerische Individualdosen für Referenzfälle SKB-91 /SVE 92/, TVO 92 /VIE 92/, AECL /GOO 94/, Kristallin-I /CUR 94/, H-3 /PNC 92/	89
Abb. 4.4	Schematische Darstellung des Vorgehens bei der zusammenfassenden Bewertung der bevorzugten Bereiche bzw. geologischen Standortgebiete /ZUI 08/ (I)	91
Abb. 4.5	Schematischer Ablauf der sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten in Etappe 2 des Sachplans /ENSI 13/	92

Abb. 4.6	Methodisches Vorgehen zur Bestimmung der Standortgebiete für Etappe 3 (verändert nach /ENSI 17/)	94
Abb. 4.7	Darstellung des Verfahrensablaufs nach /PET 97/	98
Abb. 4.8	Überblick über die einzelnen Schritte der Standortsuche /CHA 17/	108
Abb. 5.1	Klassifizierung multikriterieller Methoden	121
Abb. 5.2	Ablaufschema eines AHP (verändert nach /LÜT 08/)	130
Abb. 5.3	Auswahlentscheidung für ein Mobiltelefon /LÜT 08/	133
Abb. 5.4	Aufbau einer Präferenzfunktion (verändert nach /GEL 14/)	136
Abb. 5.5	Beispiel eines Hasse-Diagramms (basierend auf Tab. 5.7)	142
Abb. 6.1	Darstellung der relevanten Schritte zur Lösung eines multikriteriellen Entscheidungsproblems (verändert nach /OBE 10/)	167
Abb. 6.2	Darstellung der operativen Phasen in der Endlagerentwicklung /APP 15/	169
Abb. 6.3	Beispielhafte Darstellung einer Kriterienhierarchie basierend auf einem exemplarischen Zielsystem	172

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Verfahrensschritte (VfS) im § 13 nach StandAG, Zuständigkeit für Schritte 13-1 bis 13-5: BGE, Schritt 13-6 BfE.....	14
Tab. 2.2	Verfahrensschritte (VfS) im § 14 StandAG, Zuständigkeit: BGE .....	20
Tab. 2.3	Verfahrensschritte (VfS) im § 15 StandAG, Zuständigkeit: BfE und Bundestag/Bundesrat .....	27
Tab. 2.4	Verfahrensschritte (VfS) im § 16 (Phase 2A) StandAG, Zuständigkeit: BGE.....	30
Tab. 2.5	Verfahrensschritte (VfS) im § 17 nach StandAG, Zuständigkeit: BfE und Bundesregierung / Bundestag / Bundesrat.....	36
Tab. 2.6	Verfahrensschritte (VfS) nach § 18 (Phase 3A) nach StandAG, Zuständigkeit: BGE, VfS 18-9 BfE .....	39
Tab. 2.7	Verfahrensschritte (VfS) nach § 19 (Phase 3B) StandAG, Zuständigkeit: BfE und Bundesregierung / Bundestag / Bundesrat.....	46
Tab. 2.8	Verfahrensschritte (VfS) nach § 20 StandAG (Phase 3C), Zuständigkeit: Bundesregierung/Bundestag.....	48
Tab. 2.9	Identifizierte Verfahrensschritte (VfS) in denen Abwägungen und vergleichende Bewertungen durchgeführt werden (BGE) oder durchgeführt werden können (BfE) .....	50
Tab. 4.1	Wahl und Wichtung von Beurteilungsfeldern.....	78
Tab. 4.2	Kriterienbezogener Paarvergleich.....	78
Tab. 4.3	Rangfolgenbildung je Beurteilungsfeld.....	79
Tab. 4.4	Bildung einer Gesamtrangfolge ohne und mit Wichtung.....	81
Tab. 5.1	Abgrenzung der klassischen Verfahren und Outranking-Methoden (verändert nach /GEL 14/ und /OBE 10/) .....	122
Tab. 5.2	Berechnung eines Gesamtwertes (verändert nach /SCH 12/).....	125
Tab. 5.3	Beispiel für die Berechnung von Teil- und Gesamtnutzwerten .....	129
Tab. 5.4	Konsistente Matrix der Indikatorenpräferenzen (verändert nach /SIM 03/).....	131
Tab. 5.5	Beispielhafte Entscheidungsmatrix mit Beispielwerten (ohne Bedeutung).....	137

Tab. 5.6	Beispielhafte Matrix für die Outranking Relationen und die Präferenzflüsse.....	139
Tab. 5.7	Beispiel einer Entscheidungsmatrix .....	142
Tab. 5.8	Ergebnismatrix /GIL 18b/ .....	150
Tab. 5.9	Beispielhafte Software zur Anwendung multikriterieller Methoden /GEL 14/, /YAT 15/.....	157
Tab. 5.10	Beispielhafte MAUT-Methoden .....	159
Tab. 5.11	Beispielhafte Outranking-, sowie weitere Methoden.....	160

## A Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte im StandAG

Die Unterteilung des StandAG in einzelne Verfahrensschritte dient zur besseren Übersicht der durchzuführenden Arbeiten und dessen Herausforderungen. Die Wahl der verschiedenen Verfahrensschritte ist nicht als feststehendes Ablaufschema zu verstehen und sollte auch nicht so verwendet werden. Die Unterteilung diene nur als Arbeitshilfe zur Identifizierung der relevanten Aufgabenstellungen in Bezug auf Abwägungen und vergleichenden Bewertungen. Die Tab. A. 1 gibt eine Übersicht über die ausgewiesenen Verfahrensschritte.

Zudem erfolgt die Beschreibung der Herausforderungen für die Verfahrensschritte, in denen keine Abwägungen und Vergleiche durchgeführt werden, nur oberflächlich. Die Beschreibung der Herausforderungen hat für diese Verfahrensschritte keinen Anspruch auf Vollständigkeit und diene nur der eigentlichen Identifizierung der Verfahrensschritte in denen Abwägungen und Vergleiche stattfinden. Entsprechend der Aufgabenstellung werden nur für die relevanten Verfahrensschritte, welche in der Tab. A. 1 mit einem „ja“ unter der Spalte Abwägung/Vergleich gekennzeichnet sind, insbesondere im Kap. 2 die Herausforderungen detailliert beschrieben.

**Tab. A. 1** Ausgewiesene Verfahrensschritte für das Standortauswahlverfahren

Teil-schritt	Zitat im StandAG	Beschreibung	Abwägung/ Vergleich?
<b>Phase 1 Ermittlung von Teilgebieten und Standortregionen</b>			
<b>§ 13 - Ermittlung von Teilgebieten</b>			
13-1	Abs. 2, Satz 1	Anwendung der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien gemäß § 22	
13-2	Abs. 2, Satz 1	Anwendung der Mindestanforderungen gemäß § 23	
13-3	Abs. 2, Satz 2	Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 zur Ermittlung von Teilgebieten mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation.	Ja
13-4	Abs. 2, Satz 4	BGE erarbeitet einen Zwischenbericht für die in VfS 13-3 ermittelten günstigen Teilgebiete	
13-5	Abs. 2, Satz 3	BGE veröffentlicht den Zwischenbericht und übermittelt an BfE.	
13-6	§ 9 Abs. 1 Satz 1	BfE beruft (nach § 13 Abs. 2, Satz 3) EINE Fachkonferenz Teilgebiete.	

Teil-schritt	Zitat im StandAG	Beschreibung	Abwägung/ Vergleich?
<b>§ 14 - Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung</b>			
14-1	Abs. 1, Satz 2	Der Vorhabenträger führt für die in § 13 ermittelten Teilgebiete repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 27 durch.	
14-2	Abs. 1, Satz 3	Erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 auf der Grundlage der Ergebnisse aus VfS 14-1, zur Ermittlung günstiger Standortregionen	Ja
14-3	Abs. 1, Satz 4	Anwendung planungswissenschaftlicher Abwägungskriterien gemäß § 25	Ja
14-4	Abs. 2	BGE erarbeitet einen Vorschlag für die übertägig zu erkundenden Standortregionen.	
14-5	Abs. 1, Satz 5	BGE erarbeitet standortbezogene Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung auf Grundlage des Vorschlages aus VfS 14-4.	
14-6	Abs. 3	BGE übermittelt den Vorschlag für die übertägig zu erkundenden Standortregionen an BfE.	
<b>§ 15 - Entscheidung über übertägige Erkundung und Erkundungsprogramme</b>			
15-1	§4 Abs. 2 § 7 Abs. 2 Punkt 1	Das BfE veröffentlicht den Vorschlag jeweils unmittelbar nach Übermittlung durch den Vorhabenträger.	
	§ 10 Abs. 1 § 11 Abs. 1	Das BfE richtet in jeder nach § 14 Abs. 2 zur übertägigen Erkundung vorgeschlagenen Standortregion eine Regionalkonferenz ein. Das BfE richtet nach Bildung der Regionalkonferenzen eine Fachkonferenz Rat der Regionen ein.	
	§ 7 Abs. 1	BfE gibt der Öffentlichkeit und den Trägern öffentlicher Belange nach Übermittlung des jeweiligen Vorschlags sowie im Fall einer Nachprüfung nach abgeschlossenem Nachprüfverfahren nach § 10 Absatz 5 Gelegenheit zur Stellungnahme zu den Vorschlägen sowie den dazu jeweils vorliegenden Berichten und Unterlagen.	
	§ 7 Abs. 3	BfE führt in den betroffenen Gebieten einen Erörterungstermin zu den Vorschlägen durch	
15-2	Abs. 1, Satz 1	BfE prüft den Vorschlag des Vorhabenträgers	(Ja)
15-3	Abs. 2, Satz 1	Auswertung der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens und Erarbeitung einer begründeten Empfehlung zum Vorschlag des Vorhabenträgers	(Ja)



<b>Teil-schritt</b>	<b>Zitat im StandAG</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Abwägung/ Vergleich?</b>
15-4	Abs. 2, Satz 1	Übermittlung des Vorschlags des BGE, einschließlich aller hierfür erforderlichen Unterlagen durch BfE an BMU.	
15-5	Abs. 3	Die Bundesregierung unterrichtet den Deutschen Bundestag und den Bundesrat über die Standortregionen. Regierung legt durch Bundesgesetz die übertägig zu erkundenden Standortregionen und das weitere Verfahren für Gebiete ohne hinreichende Informationen fest.	
15-6	Abs. 4	BfE prüft die standortbezogenen Erkundungsprogramme zur übertägigen Erkundung für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standortregionen und Festlegung sowie Veröffentlichung im Bundesanzeiger	
<b>Phase 2 Übertägige Erkundung und Vorschlag für untertägige Erkundung</b>			
<b>§ 16 - Ermittlung von günstigen Standorten für die untertägige Erkundung</b>			
16-1	Abs. 1, Satz 1	Übertägige Erkundung der Standortregionen durch BGE	
16-2	Abs. 1, Satz 2	Durchführung weiterentwickelter vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen (wvS) gemäß § 27	
16-3	Abs. 1, Satz 3	Sozioökonomische Potenzialanalysen (söP) für die Standortregionen.	
16-4	Abs. 2, Satz 1	Erneute Anwendung der §§ 22 bis 23 (Anforderungen und Kriterien) auf der Grundlage der Ergebnisse der übertägigen Erkundung	
16-5	Abs. 2, Satz 1	Erneute Anwendung der Abwägungskriterien gemäß § 24 auf der Grundlage der Ergebnisse der übertägigen Erkundung und der wvS, zur Ermittlung günstiger Standorte zur untertägigen Erkundung.	Ja
16-6	Abs. 2, Satz 2	Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach den Vorgaben in § 25	Ja
16-7	Abs. 3	BGE erarbeitet Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standorte.	
16-8	Abs. 2, Satz 3	BGE erarbeitet Erkundungsprogramme und Prüfkriterien für die untertägig zu erkundenden Standorte.	
16-9	Abs. 3 und 4	Vorhabenträger übermittelt seinen Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standorte und der entsprechenden Erkundungsprogramme und Prüfkriterien an BfE.	

Teil-schritt	Zitat im StandAG	Beschreibung	Abwägung/ Vergleich?
<b>§ 17 - Entscheidung Standorte für untertägige Erkundung</b>			
17-1	§ 4 Abs. 2 § 7 Abs. 2 Punkt 2	Das BfE veröffentlicht den Vorschlag jeweils unmittelbar nach Übermittlung durch den Vorhabenträger.	
	§ 7 Abs. 1	BfE gibt der Öffentlichkeit und den Trägern öffentlicher Belange nach Übermittlung des jeweiligen Vorschlags sowie im Fall einer Nachprüfung nach abgeschlossenem Nachprüfverfahren nach § 10 Abs. 5 Gelegenheit zur Stellungnahme zu den Vorschlägen sowie den dazu jeweils vorliegenden Berichten und Unterlagen.	
	§ 7 Abs. 3	BfE führt in den betroffenen Gebieten einen Erörterungstermin zu den Vorschlägen durch	
17-2	Abs. 1	BfE prüft den Vorschlag des Vorhabenträgers	(Ja)
17-3	Abs. 2, Satz 1	Auswertung der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, einschließlich der Beratungsergebnisse des Nationalen Begleitgremiums und Erarbeitung einer begründeten Empfehlung zum Vorschlag des Vorhabenträgers (nach § 16 Abs. 3)	(Ja)
17-4	Abs. 3	Erstellt und veröffentlicht Bescheid, ob das bisherige Standortauswahlverfahren nach den Regelungen des StandAG durchgeführt wurde.	
17-5	Abs. 2, Satz 1	Übermittlung des Standortvorschlags des BGE, einschließlich aller hierfür erforderlichen Unterlagen durch BfE an BMU,	
17-6	Abs. 2, Satz 3 Abs. 2, Satz 4	Unterrichtung des Deutschen Bundestags und des Bundesrats über untertägig zu erkundende Standorte - Die untertägig zu erkundenden Standorte werden durch Bundesgesetz bestimmt.	
17-7	Abs. 4	Das BfE prüft die standortbezogenen Erkundungsprogramme und Prüfkriterien zur untertägigen Erkundung für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standorte, legt diese fest und veröffentlicht sie sowie Änderungen im Bundesanzeiger.	
<b>Phase 3 Vertiefte geologische Erkundung und Standortvorschlag</b>			
<b>§ 18 - Untertägige Erkundung</b>			
18-1	Abs. 1, Satz 1	Untertägige Erkundung der ausgewählten Standorte	
18-2	Abs. 1, Satz 2	Durchführung umfassender vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen (uvS) nach § 27	

<b>Teil-schritt</b>	<b>Zitat im StandAG</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Abwägung/ Vergleich?</b>
18-3	Abs. 1, Satz 2	Erarbeitung eines UVP-Berichts nach § 16 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung durch BGE.	
18-4	Abs. 2, Satz 1	Anwendung der Prüfkriterien, sowie eine erneute Anwendung der §§ 22 und 23 (Anforderungen und Kriterien) auf der Grundlage der Ergebnisse der untertägigen Erkundungsprogramme.	
18-5	Abs. 2, Satz 1	Erneute Anwendung der Abwägungskriterien nach § 24 auf der Grundlage der Ergebnisse der untertägigen Erkundung um geeignete Standorte nach § 18 Abs. 3 zu ermitteln.	Ja
18-6	Abs. 2, Satz 2	Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach den Vorgaben in § 25	Ja
18-7	Abs. 3, Satz 2	Erarbeitung eines Vorschlages für geeignete Standorte auf der Grundlage einer vergleichenden Bewertung der zu betrachtenden Standorte.	Ja
18-8	Abs. 3, Satz 1	BGE übermittelt den Standortvorschlag an das BfE.	
18-9	Abs. 3, Satz 3	Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung durch BfE.	
<b>§ 19 - Abschließender Standortvergleich und Standortvorschlag</b>			
19-1	§4 Abs. 2 § 7 Abs. 2 Punkt 3	Das BfE veröffentlicht die Vorschläge jeweils unmittelbar nach Übermittlung durch den Vorhabenträger.	
	§ 7 Absatz 1	BfE gibt der Öffentlichkeit und den Trägern öffentlicher Belange nach Übermittlung des jeweiligen Vorschlags sowie im Fall einer Nachprüfung nach abgeschlossenem Nachprüfverfahren nach § 10 Abs. 5 Gelegenheit zur Stellungnahme zu den Vorschlägen sowie den dazu jeweils vorliegenden Berichten und Unterlagen.	
	§ 7 Abs. 3	BfE führt in den betroffenen Gebieten einen Erörterungstermin zu den Vorschlägen durch	
19-2	Abs. 1, Satz 1 und Satz 2	BfE prüft den Vorschlag des Vorhabenträgers und bewertet welcher der Standorte der mit der bestmöglichen Sicherheit ist.	Ja
19-3	Abs. 2, Satz 3	Erstellt und veröffentlicht Bescheid, ob das bisherige Standortauswahlverfahren nach den Regelungen des StandAG durchgeführt wurde.	
19-4	Abs. 1, Satz 3 und 4	Erarbeitung eines Standortvorschlages	

Teilschritt	Zitat im StandAG	Beschreibung	Abwägung/Vergleich?
19-5	Abs. 2, Satz 1	Übermittlung des Standortvorschlags einschließlich aller hierfür erforderlichen Unterlagen durch BfE an BMU,	
<b>§ 20 - Standortentscheidung durch Bundestag und Bundesrat</b>			
20-1	Abs. 1, Satz 1	Die Bundesregierung legt dem Deutschen Bundestag und dem Bundesrat den Standortvorschlag in Form eines Gesetzentwurfs vor.	
20-2	Abs. 2	Über die Annahme des Standortvorschlags wird durch Bundesgesetz entschieden.	
20-3	Abs. 3	Auf der Grundlage dieser Entscheidung ist die Eignung des Vorhabens im Genehmigungsverfahren vollumfänglich zu prüfen.	

## A.1 Phase 1A (§ 13 StandAG)

Die BGE ermittelt nach § 13 StandAG Teilgebiete, welche günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen.

### A.1.1 Verfahrensschritt 13-1

#### Sachstand

Ausgangslage vor diesem Verfahrensschritt ist die so genannte „weiße Landkarte“ von Deutschland. Gemäß § 13 Abs. 2 Satz 1 StandAG werden in diesem Verfahrensschritt durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien (Ausschlussverfahren anhand gesetzlich vorgegebener Kriterien nach § 22 StandAG) Gebiete ausgeschlossen, welche offensichtlich ungeeignet sind zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Ein Gebiet ist nicht als Endlagerstandort geeignet, wenn mindestens eines der Ausschlusskriterien nach Tab. A. 2 erfüllt ist.

#### Herausforderungen

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass die Informationslage für die Anwendung der Ausschlusskriterien ausreicht. Hintergrund ist, dass die meisten der zur Anwendung kommenden Kriterien Informationen erfordern, bei denen davon ausgegangen werden kann,

dass diese bereits heute vorhanden sind. Allerdings ist davon auszugehen, dass bezüglich des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter“ (StandAG, § 22 Abs. 2 Nr. 6 (s. Tab. A. 2) keine flächendeckenden Daten vorliegen.

**Tab. A. 2** Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG

<b>Ausschlusskriterium</b>	<b>Informationsquellen</b>
Großräumige Vertikalbewegungen	BGR (u. a. geol. Jahrbücher), geologische Landesämter, Karten m. Erläuterungen, geotektonischer Atlas, z. B. /BAL 01/
Aktive Störungszonen	BGR (u. a. geol. Jahrbücher), geologische Landesämter, Karten m. Erläuterungen, geotektonischer Atlas, z. B. /BAL 01/
Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit	Landesbergämter, geologische Landesämter
Seismische Aktivität	BGR, GFZ Potsdam, geologische Landesämter, Erdbebenkatalog, z. B. /LEY 86/
Vulkanische Aktivität	BGR (u. a. geol. Jahrbücher), geologische Landesämter, Karten m. Erläuterungen, geotektonischer Atlas, z. B. /BAL 01/
Grundwasseralter	Nur vereinzelte Daten, geologische Landesämter, evtl. Wasserbehörden

### Schlussfolgerung

Abwägungen oder vergleichende Bewertungen werden in diesem Verfahrensschritt nicht durchgeführt. Die Anwendung der Ausschlusskriterien ist ein Ausschlussverfahren.

## **A.1.2 Verfahrensschritt 13-2**

### Sachstand

Gemäß § 13 Abs. 2 Satz 1 StandAG werden in diesem Verfahrensschritt auf die in VfS 13-1 übrig gebliebenen Gebiete die Mindestanforderungen (Ausschlussverfahren anhand gesetzlich vorgegebener Kriterien nach § 23 StandAG) angewendet. Gebiete, die kein Ausschlusskriterium nach § 22 StandAG erfüllen, sind nur als Endlagerstandort geeignet, wenn sämtliche Mindestanforderungen (nach § 23 Abs. 5 StandAG, Tab. A. 3) erfüllt sind.

## Herausforderungen

Für die Anwendung der Mindestanforderungen ist sicher davon auszugehen, dass nicht für alle Gebiete die erforderlichen Daten in der Phase 1 vorliegen. Dies gilt vor allem für die Mindestanforderung einer geringen Gebirgsdurchlässigkeit, insbesondere im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG). Hierbei kann nicht von einem Vorliegen flächendeckender Daten ausgegangen werden.

In § 23 Abs. 3 StandAG wurde deshalb festgelegt, dass wenn für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige Daten für ein Gebiet erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt, soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist. Spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Abs. 3 StandAG ist die Erfüllung aller Mindestanforderungen standortspezifisch nachzuweisen.

Unter anderem legen die Mindestanforderungen eine Mindestmächtigkeit des ewG fest. Das Wirtsgestein Kristallingestein stellt hier eine Besonderheit dar. Unter Umständen kann für das Wirtsgestein Kristallingestein kein ewG ausgewiesen werden. Gemäß § 23 Abs. 1 Satz 2 StandAG, kann für das Wirtsgestein Kristallingestein jedoch ein alternatives Endlagerkonzept zum ewG Konzept erstellt werden. Begründet wird dies in dem § 23 Abs. 4 StandAG dort wird festgelegt, dass wenn für ein Gebiet kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, sich aber für ein wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem eignet, eine für den § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG (Gebirgsdurchlässigkeit) abweichende Anforderung nachzuweisen ist. Anstelle der Mindestanforderung nach einer geringen Gebirgsdurchlässigkeit, muss der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können. Der Nachweis ist spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Abs. 3 StandAG zu führen. Die Mindestanforderungen nach Abs. 5 Nummer 2 bis 5 sind in diesem Fall auf den Einlagerungsbereich entsprechend anzuwenden. Wenn die notwendigen Daten zur Erfüllung einer Mindestanforderung in einer frühen Phase des Verfahrens nicht vorhanden sind gilt der Abs. 3 entsprechend.

Vor allem für die Anwendung der Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ müssen Endlagerkonzepte für jedes Wirtsgestein entwickelt werden. In der frühen Phase 1 ist es

vermutlich ausreichend, auf bestehende Konzepte und deren Flächenbedarf zurückzugreifen.

**Tab. A. 3 Mindestanforderungen § 23 StandAG**

<b>Mindestanforderungen</b>	<b>Informationsquellen</b>
Gebirgsdurchlässigkeit	BGR, u.a. /BGR 14/, /BGR 07/, geologische Landesämter, nur vereinzelte Daten
Mächtigkeit des ewG	BGR, u.a. /BGR 14/, /BGR 07/, geologische Landesämter
Minimale Teufe des ewG	BGR, u.a. /BGR 14/, /BGR 07/, geologische Landesämter
Fläche des Endlagers	Generische Abschätzungen u.a. auf der Grundlage thermischer Rechnungen z. B. /LEY 86/ /DBE 16/
Erhalt der Barrierewirkung	BGR (geowissenschaftl. Langzeitprognosen zu bisherigen Endlagerprojekten, Quartärbasiskarten, Berichte, z.B. /KEL 09/)

#### Schlussfolgerung

Abwägungen oder vergleichende Bewertungen werden in diesem Verfahrensschritt nicht durchgeführt. Die Anwendung der Mindestanforderungen ist ein Ausschlussverfahren.

### **A.1.3 Verfahrensschritt 13-3**

#### Sachstand

Gemäß § 13 Abs. 2 Satz 2 StandAG werden durch die Anwendung geowissenschaftlicher Abwägungskriterien nach § 24 StandAG Gebiete mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation identifiziert. Die günstige geologische Gesamtsituation soll für jeden Untersuchungsraum durch eine sicherheitsgerichtete Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien ermittelt werden.

#### Herausforderungen

Wie auch für die Anwendung der Mindestanforderungen auf Kristallingestein sind auch für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien auf das Wirtsgestein Kristallingestein besondere Annahmen zu berücksichtigen. Nach § 24 Abs. 2 StandAG soll im Fall des Eintretens von § 23 Abs. 4 StandAG (es kann kein ewG ausgewiesen

werden), das Einschlussvermögen der technischen und geotechnischen Barrieren rechnerisch ermittelt werden, anstelle des Abwägungskriteriums nach § 24 Anlage 2.

Nach § 24 Abs. 3 StandAG wird die Einschlusswirksamkeit und die zu erwartende Robustheit des Nachweises anhand der Kriterien zum Transport durch Grundwasser (§ 24 StandAG Anlage 1), zur Konfiguration der Gesteinskörper (§ 24 StandAG Anlage 2), zur räumlichen Charakterisierbarkeit (§ 24 StandAG Anlage 3) und zur Prognostizierbarkeit (§ 24 StandAG Anlage 4) beurteilt.

Problematisch dürfte die Informationslage im Fall des Kriteriums Transport durch Grundwasser (§ 24 StandAG Anlage 1, Tab. A. 4) sein, da davon auszugehen ist, dass verwertbare Informationen allenfalls punktuell (Bohrungsdaten) vorliegen. Insofern wird man in der Regel auf grobe Abschätzungen (Interpolation auf Flächendaten) angewiesen sein, wobei die Frage gestellt werden muss, ob die hieraus resultierende Aussagekraft eine zuverlässige Einordnung in eine Wertungsgruppe zulässt. Die Forderung nach einer sicherheitsgerichteten Abwägung lässt zudem offen, wie z. B. mit einer mehrfachen Beurteilung „weniger geeignet“ bzw. „ungünstig“ umgegangen wird. Für weitere Informationen siehe auch Kap. 2.1.1.2.

**Tab. A. 4** Abwägungskriterien aus Anlage 1 des StandAG zu § 24, Abs. 2 („Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegung im ewG“)

<b>Bewertungsrelevante Eigenschaft</b>	<b>Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums</b>	<b>Mögliche Informationsquellen</b>
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	Zuverlässige Daten nur im Einzelfall, keine flächendeckenden Informationen, grobe Abschätzungen z. T. möglich
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m <sup>2</sup> /s]	
Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	Absolute Porosität bzw. Verfestigungsgrad	



**Tab. A. 5** Abwägungskriterium aus Anlage 2 des StandAG zu § 24, Abs. 3 („Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“)

<b>Bewertungsrelevante Eigenschaft</b>	<b>Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums</b>	<b>Mögliche Informationsquellen</b>
Barrierewirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	
	Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG)	
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG [m unter Geländeoberfläche]	BGR, u. a. /BGR 14/, /BGR 07/, geologische Landesämter
Volumen des ewG	Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	
Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des ewG / Wirtsgesteinskörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischen Potenzial, die die Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG ermöglichen können.	Abschätzungen bei ausreichender Kenntnis des geologischen Strukturverlaufs möglich (geol. Karten und Profile)

**Tab. A. 6** Abwägungskriterium aus Anlage 3 des StandAG zu § 24, Abs. 3 („Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“)

<b>Bewertungsrelevante Eigenschaft</b>	<b>Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums</b>	<b>Mögliche Informationsquellen</b>
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen ewG	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	BGR, u.a./BGR 14/ /BGR 07/, geologische Landesämter
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	
	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen ewG	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	

**Tab. A. 7** Abwägungskriterium aus Anlage 4 des StandAG zu § 24, Abs. 3 („Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“)

<b>Bewertungsrelevante Eigenschaft</b>	<b>Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums</b>	<b>Mögliche Informationsquellen</b>
Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	Keine wesentlichen Änderungen des Betrachtungsmerkmals „Mächtigkeit“ des ewG	Prognosen können teilweise auf der Grundlage von Veröffentlichungen (insb. BGR, z. B. /KEL 09/) durchgeführt werden. Teilweise könnten bestehende geowissenschaftliche Langzeitprognosen (z.B. /MRU 11/) genutzt werden, wenn sich die Aussagen auf weite Räume beziehen zu denen auch der zu bewertende Untersuchungsraum liegt  Teilgebietspezifische Prognosen werden frühestens während der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt (Verfahrensschritt 14-1)
	Keine wesentlichen Änderungen des Betrachtungsmerkmals „Ausdehnung“ des ewG	
	Keine wesentlichen Änderungen des Betrachtungsmerkmals „Gebirgsdurchlässigkeit“ des ewG	

Nach § 24 Abs. 4 StandAG wird die Absicherung der Qualität des Einschlusses bzw. des Isolationsvermögens anhand der Kriterien zu gebirgsmechanischen Voraussetzungen (§ 24 StandAG Anlage 5) und zur geringen Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten (§ 24 StandAG Anlage 6) beurteilt. Die Herausforderung besteht hierbei im Umgang mit der Datenlage zur Beurteilung der Kriterien zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften und zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten, die zu gering sein dürfte, um eine zuverlässige Einordnung in eine Wertungsgruppe vornehmen zu können.

**Tab. A. 8** Abwägungskriterium aus Anlage 5 des StandAG zu § 24, Abs. 4 („Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften“)

<b>Bewertungsrelevante Eigenschaft</b>	<b>Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums</b>	<b>Mögliche Informationsquellen</b>
<p>Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften: Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten im ewG, soll außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlagerhöhlräume möglichst gering sein.</p>	<p>Das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßig tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen.</p>	<p>Generell ist von einer unzureichenden Datenlage auszugehen, die die Beurteilung des Kriteriums zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften erlauben würden.</p>
	<p>Um Endlagerhöhlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.</p>	<p>Evtl. kann bei Salzstandorten im Einzelfall auf bergbauliche Erfahrungen zurückgegriffen werden. Das Kriterium setzt überdies Kenntnisse der Position des Endlagers voraus, die in Phase 1A jedoch noch nicht vorliegen dürften.</p>

**Tab. A. 9** Abwägungskriterium aus Anlage 6 des StandAG zu § 24, Abs. 4 („Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“)

<b>Bewertungsrelevante Eigenschaft</b>	<b>Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums</b>	<b>Mögliche Informationsquellen</b>
Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/ repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	Generell ist von einer unzureichenden Datenlage auszugehen, die die Beurteilung des Kriteriums zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten erlauben würden.  Vereinzelt können Erfahrungen aus dem Bergbau bzw. oder anderweitiger Nutzung von Hohlräumen genutzt bzw. Analogieschlüsse hieraus gezogen werden.
	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen: Rezente Existenz als wasserlösliches Gestein, fossile Fluideinschlüsse, unterlagernde wasserlösliche Gesteine, unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe, Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken, Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung, Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien	
	Duktilität des Gesteins (Anwendung nur bei einem Vergleich von Standorten)	
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Rissschließung	
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	
Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren		

Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften werden in den Anlagen 7 bis 11 anhand der Kriterien zur Gasbildung, zur Temperaturverträglichkeit, zum Rückhaltevermögen der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegenüber Radionukliden, zu hydrochemischen Verhältnissen und zum Deckgebirge beurteilt.

Eine besondere Herausforderung besteht hier im Umgang mit der Datenlage zur Beurteilung von Kriterien, die unzureichend sein dürfte, um eine zuverlässige Einordnung in eine Wertungsgruppe vornehmen zu können. Dies gilt mit hoher Wahrscheinlichkeit für die folgenden Abwägungskriterien:

- Abwägungskriterium aus Anlage 7 des StandAG zu § 24, Abs. 5 („Kriterium zur Bewertung der Gasbildung“)
- Abwägungskriterium aus Anlage 8 des StandAG zu § 24, Abs. 5 („Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit“)
- Abwägungskriterium aus Anlage 9 des StandAG zu § 24, Abs. 5 („Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“)
- Abwägungskriterium aus Anlage 10 des StandAG zu § 24, Abs. 5 („Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse“)

**Tab. A. 10** Abwägungskriterium aus Anlage 7 des StandAG zu § 24, Abs. 5 („Kriterium zur Bewertung der Gasbildung“)

Bewertungsrelevante Eigenschaft	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Mögliche Informationsquellen
Gasbildung	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	Es ist davon auszugehen, dass in Phase 1 hierzu keinerlei Informationen vorliegen werden. Hinzu kommt, dass die Position der Endlagerbergwerke und damit auch der Einlagerungsbereiche noch nicht festgelegt sind.

**Tab. A. 11** Abwägungskriterium aus Anlage 8 des StandAG zu § 24, Abs. 5 („Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit“)

Bewertungsrelevante Eigenschaft	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Mögliche Informationsquellen
Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung radioaktiver Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen.	Temperaturstabilität bzgl. Mineralumwandlungen und der Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und deren Ausdehnung	Teilgebietsspezifische Daten liegen nur in wenigen Einzelfällen vor. Bei gutem Kenntnisstand zu den mineralogischen Eigenschaften einer Formation in einer projektierten ewG-Teufe zumindest abschätzungsweise möglich. Bewertung setzt jedoch temperatúrausgelegte Endlagerkonzepte voraus, die in Phase 1 nur generisch vorliegen werden.

**Tab. A. 12** Abwägungskriterium aus Anlage 9 des StandAG zu § 24, Abs. 5 („Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“)

<b>Bewertungsrelevante Eigenschaft</b>	<b>Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums</b>	<b>Mögliche Informationsquellen</b>
Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Kd-Wert für langzeitrelevante Radionuklide $\geq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$	Bei gutem Kenntnisstand zu den mineralogischen Eigenschaften und den hydrochemischen Eigenschaften einer Formation in einer projektierten ewG-Teufe sind grobe Abschätzungen möglich.

**Tab. A. 13** Abwägungskriterium aus Anlage 10 des StandAG zu § 24, Abs. 5 („Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse“)

<b>Bewertungsrelevante Eigenschaft</b>	<b>Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums</b>	<b>Mögliche Informationsquellen</b>
Hydrochemische Zusammensetzung der Tiefenwässer im Bereich des ewG	chemisches Gleichgewicht zwischen Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser  neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers, anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers, möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser und geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser.	Teilgebietspezifische Daten liegen im Bereich des projektierten ewG nur in wenigen Einzelfällen vor. Gebietsweise Informationen bei BGR, geologische Landesämter.  Allgemeine Hinweise in Veröffentlichungen und Atlanten zur hydrochemischen Situation in Deutschland.

**Tab. A. 14** Abwägungskriterium aus Anlage 11 des StandAG zu § 24, Abs. 5 („Kriterium zur Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge“)

Bewertungsrelevante Eigenschaft	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Mögliche Informationsquellen
Schutz des ewG durch günstigen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen (insbesondere Dekompaktion)	Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	
	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG	BGR, geologische Landesämter (geologische Karten, Schichtenverzeichnisse von Tiefbohrungen Veröffentlichungen etc.)
	Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den ewG ergeben könnten	Wie oben, jedoch nur, wenn es sich um größere und damit bekannte Inhomogenitäten handelt

### Schlussfolgerung

Durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im VfS 13-3, werden Abwägungen durchgeführt, um die geologische Gesamtsituation zu bewerten und auf dieser Grundlage die Teilgebiete mit günstigen geologischen Voraussetzungen identifizieren zu können

### **A.1.4 Verfahrensschritt 13-4**

#### Sachstand

Gemäß § 13 Abs. 2 Satz 3 Abwägungen erarbeitet die BGE einen Zwischenbericht zu den Teilgebieten mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation. Der Zwischenbericht enthält gemäß § 13 Abs. 2 Satz 4 Abwägungen eine Darstellung der entscheidungserheblichen Tatsachen und Erwägungen. Zudem wird von der BGE eine Empfehlung zum weiteren Umgang mit Gebieten erstellt, die aufgrund nicht hinreichender geologischer Daten nicht eingeordnet werden können.

### Herausforderung

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist nicht abzusehen, welchen Umfang die Gebiete mit nicht hinreichenden geologischen Daten in Fläche und Anzahl einnehmen werden. Des Weiteren ist auch nicht abschätzbar, welchen Umfang die möglichen unzureichenden geologischen Daten zu den einzelnen Gebieten aber auch insgesamt betreffen. Auch die geforderte Begründung für den weiteren Umgang ist eine unbekannte Größe, die je nach Ausformulierung und der späteren Beschlusslage durch Bundesgesetz zu dem weiteren Verfahren mit diesen Gebieten einen signifikanten Einfluss auf die weitere Abfolge der Arbeiten in Bezug auf Zeitplanung und Aufwand haben kann.

### Schlussfolgerung

Abwägungen und/oder vergleichende Bewertungen werden im VfS 13-4 nicht durchgeführt.

## **A.1.5      Verfahrensschritt 13-5**

### Sachstand

Gemäß § 13 Abs. 2 Satz 3 StandAG veröffentlicht die BGE den im Verfahrensschritt 13-4 erarbeiteten Zwischenbericht und übermittelt diesen unverzüglich an das BfE.

### Herausforderung

Dieser Verfahrensschritt stellt ein Zwischenziel (Meilenstein) im § 13 StandAG dar. Es werden keine besonderen Herausforderungen erwartet.

### Schlussfolgerung

Abwägungen und/oder vergleichende Bewertungen werden im Verfahrensschritt 13-5 nicht durchgeführt.



## **A.1.6      Verfahrensschritt 13-6**

### Sachstand

Gemäß § 9 Abs. 1 StandAG beruft das BfE nach Erhalt des Zwischenberichts (gemäß § 13 Abs. 2 Satz 3 StandAG) eine Fachkonferenz Teilgebiete ein. Die Fachkonferenz Teilgebiete erörtert innerhalb von sechs Monaten den Zwischenbericht der BGE nach § 13 Abs. 2 StandAG und legt der BGE ihre Beratungsergebnisse innerhalb eines Monats nach dem letzten Termin vor. Danach löst sich die Fachkonferenz Teilgebiete auf. Gemäß § 14 Abs. 2 StandAG berücksichtigt die BGE die Beratungsergebnisse bei ihrem Vorschlag für die übertägig zu erkundenden Standortregionen.

### Herausforderung

Bei der Einberufung der Fachkonferenz Teilgebiete könnte sich die Schwierigkeit ergeben, dass aufgrund der Größe und Vielzahl an ausgewiesenen Teilgebieten eine hohe Anzahl an Landkreisen betroffen sind, deren Vertreter bei der Fachkonferenz Teilgebiete zu beteiligen sind. Zu diesem Thema existiert eine Studie, die von einem Mitglied der Endlagerkommission erarbeitet wurde /KUD 16/. Auf der Grundlage der Ergebnisse einer BGR-Studie zu potentiell geeigneten Endlagerstandorten, welche auf der Grundlage der Empfehlungen des AkEnd /AKE 02/ von der BGR /BGR 07/ auf einer Deutschlandkarte ausgewiesen wurden, werden in /KUD 16/ die Anzahl der betroffenen Landkreise ermittelt. Demnach würden mindestens 95 Gebietskörperschaften betroffen sein, mit einer abgeschätzten Einwohnergesamtzahl von über 20 Mio. Es stellt sich hier die Frage, in welcher Weise eine Fachkonferenz Teilgebiete mit derartig vielen zu Beteiligenden organisatorisch und vom Ablauf her zielgerichtet durchgeführt werden kann.

Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie man mit der Möglichkeit umgeht, dass die Beratungsergebnisse zu einer teilweisen oder gänzlichen Ablehnung der Teilgebiete führen. Insbesondere hat die BGE die Beratungsergebnisse bei ihrem Vorschlag für die übertägig zu erkundenden Standortregionen zu berücksichtigen. In welcher Weise diese Berücksichtigung, auch in Anbetracht des Primats der bestmöglichen Sicherheit zu erfolgen hat, ist ebenso unklar wie das Gewicht, welches den Beratungsergebnissen im Standortauswahlverfahren beizumessen ist.

## Schlussfolgerung

Die Einberufung der Fachkonferenz Teilgebiete ist wie der VfS 13-5 ein Meilenstein im § 13. Abwägungen oder vergleichende Bewertungen sind in diesem Verfahrensschritt nicht vorgesehen.

### **A.2 Phase 1B (§ 14 StandAG)**

Die BGE ermittelt aus den nach § 13 Abs. 1 StandAG ermittelten Teilgebieten günstige Standortregionen für die übertägige Erkundung.

#### **A.2.1 Verfahrensschritt 14-1**

### Sachstand

Gemäß § 14 Abs. 1 StandAG sind in diesem Verfahrensschritt repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen vorgesehen. Gemäß § 27 Abs. 1 StandAG ist das Ziel dieser Untersuchungen die Bewertung, inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Berücksichtigung der geologischen Standortgegebenheiten erwartet werden kann. Dabei ist die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung nach § 26 StandAG zugrunde zu legen und die Anforderungen an die Durchführung der Sicherheitsuntersuchungen nach Abs. 6 einzuhalten.

### Herausforderungen

In der Phase 1B (§ 14 StandAG) greift zum ersten Mal die Forderung des StandAG, vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen. Gemäß § 27 Abs. 2 Satz 3 StandAG bilden die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen eine der Grundlagen für die Entscheidung, ob ein Gebiet weiter im Auswahlverfahren betrachtet wird. Wesentliche Aufgaben und Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Phase 1 können z. B. sein:

- Weiterentwicklung generischer Endlagerkonzepte für die verschiedenen Wirtsgesteine
- Sichtung der vorhandenen Daten zur Parametrisierung und Identifizierung von Datenlücken und Kenntnislücken zum Endlagersystem/Konzept, mit besonderem Augenmerk auf die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.
- Wesentliche Hilfestellung zu Erarbeitung der standortbezogenen Erkundungsprogramme (siehe Teilschritt 14-4)

Insbesondere in der Phase 1 werden Datenungewissheiten zu einzelnen Teilgebieten vorliegen. Durch den unterschiedlichen Erkundungsgrad einzelner Gebiete und die voraussichtliche hohe Daten-Heterogenität sind fundierte Sicherheitsuntersuchungen nur schwer durchzuführen. Aus diesem Grund sind für die Phase 1 lediglich repräsentative Sicherheitsuntersuchungen mit reduziertem Anforderungsumfang vorgesehen. Vor allem die in § 27 Abs. 1 StandAG geforderten Betrachtungen können wahrscheinlich erst ab der Phase 2 durchgeführt werden.

Da insbesondere für das Wirtsgestein Kristallingestein bislang kein Endlagerkonzept in Deutschland entwickelt wurde, müssen voraussichtlich Konzepte aus anderen Ländern übernommen werden. Ähnliches gilt für die geowissenschaftliche Datenlage insbesondere für die Wirtsgesteine Tongestein und Kristallingestein.

Nach § 27 StandAG ist in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen das Endlagersystem in seiner Gesamtheit zu betrachten und entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich seiner Sicherheit zu bewerten. Der Begriff Endlagersystem ist darin, als das den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle durch das Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten bewirkende System bestimmt. Es besteht aus dem Endlagerbergwerk, den Barrieren und den das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche, soweit sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen. Der Begriff Endlagerbergwerk ist nicht explizit im StandAG bestimmt, jedoch besteht ein Endlagerbergwerk im Allgemeinen aus unterschiedlichen Komponenten, wie z. B. Schächte, Strecken, Kammern mit den darin eingelagerten Abfallgebänden, Versatz und Dichtelementen.

Zum Zeitpunkt der Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen ist davon auszugehen, dass die endlagerkonzeptionellen Planungen noch nicht weit vo-

rangeschritten sind und somit noch keine detaillierten Angaben hierüber vorliegen werden. Es ist nicht davon auszugehen, dass wirtsgesteinsspezifische Referenz-Endlagerkonzepte bestehen. Die Informationslage wird daher noch lückenhaft sein.

Eine weitere Vorgabe aus dem StandAG bezieht sich auf abdeckende Annahmen zu Menge, Art und Eigenschaften der radioaktiven Abfälle auf dessen Grundlage die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen sind. Mit dem Beschluss, die Nutzung der Kernspaltung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität in der Bundesrepublik Deutschland spätestens im Jahr 2022 zu beenden und die Abgabe von bestrahlten Brennelementen aus Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität an Wiederaufarbeitungsanlagen seit dem 1. Juli 2005 nicht mehr zulässig ist, wird eine geforderte abdeckende Annahme zu Menge, Art und Eigenschaften von hochradioaktiven Abfällen erleichtert. Im Prinzip sind in dem Verzeichnis radioaktiver Abfälle in Deutschland, das kontinuierlich aktualisiert wird, die entsprechenden Angaben erfasst, sodass eine verlässliche abdeckende Annahme möglich ist. Die Informationslage hierzu wird als verlässlich und abdeckend eingeschätzt.

Schwieriger stellt sich die Aufgabe dar, eine abdeckende Annahme zu schwach- und mittelradioaktiven Abfällen vorzunehmen. Die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle sind gemäß dem StandAG insoweit bei den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zu betrachten, als das eine Beurteilung hinsichtlich der zusätzlichen Endlagerung größerer Mengen dieser radioaktiven Abfälle möglich sein soll. Mögliche, zu berücksichtigende Abfälle, die im Zusammenhang mit schwach- und mittelradioaktiven Abfällen genannt werden, sind angefallenes und anfallendes abgereichertes Uran aus der Urananreicherung, rückzuziehende Abfälle aus der Schachanlage Asse II und sonstige Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können.

Auch zum Zeitpunkt für die Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen wird die Informationslage für die abdeckende Annahme zu schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in quantitativer und qualitativer Hinsicht vermutlich mit größeren Ungewissheiten behaftet sein.

Eine weitere Vorgabe aus dem StandAG bezieht sich auf die Festlegung der einzuhaltenen Grenztemperatur an der Außenfläche der Endlagerbehälter. Solange die Grenztemperatur in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt werden kann, ist von einer maximalen Temperatur von 100 °C aus-

zugehen. Es ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand davon auszugehen, dass zum Zeitpunkt der Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen die Forschungsarbeiten zu diesem Thema noch nicht abgeschlossen sind. Daher wird auch die Informationslage zur Grenztemperatur in den jeweiligen Wirtsgesteinen nicht umfassend sein.

### Schlussfolgerung

Abwägungen oder vergleichende Bewertungen werden im Verfahrensschritt 14-1 nicht durchgeführt. Die Ergebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind jedoch relevant als Grundlage zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im VfS 14-2.

## **A.2.2      Verfahrensschritt 14-2**

### Sachstand

Gemäß § 14 Abs. 1 Satz 3 StandAG sollen auf Grundlage bzw. unter Zuhilfenahme der in VfS 14-1 ermittelten Ergebnisse, die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG erneut angewendet werden.

### Herausforderungen

Aufgrund der in VfS 14-1 beschriebenen Probleme zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen aufgrund der Datenungleichheiten, sind fundierte Abwägungen bzw. ist eine Anwendung aller geowissenschaftlicher Abwägungskriterien für einige Gebiete nicht oder nur schwer durchzuführen.

Da auch bei der erneuten Anwendung der Abwägungskriterien nicht davon auszugehen ist, dass sich die geologische Datenlage nennenswert verbessert hat, gelten hierzu auch die gleichen Einschätzungen, wie für die erstmalige Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in VfS 13-3 (vgl. Kap. A.1.3). Eine Ausnahme kann das Abwägungskriterium „Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“ nach Anlage 4 zu § 24 Abs. 3 StandAG sein, sofern davon ausgegangen werden kann, dass im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in VfS 14-1 auch teilgebietsspezifische geowissenschaftliche Langzeitprognosen durchgeführt werden.

## Schlussfolgerung

Durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, zur Ermittlung von günstigen Standortregionen, werden erneut Abwägungen durchgeführt.

### **A.2.3      Verfahrensschritt 14-3**

#### Sachstand

Gemäß § 14 Abs. 1 Satz 4 StandAG sollen im VfS 14-3 zum ersten Mal im Verfahren die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 25 StandAG auf die verbliebenen Teilgebiete angewendet werden.

Nach dem Begründungstext zum StandAG /BR 17/, sollen die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien insbesondere zur Einengung von großen, potenziell für ein Endlager geeignete Gebieten dienen, soweit eine Einengung sich nicht bereits aus der Anwendung der geowissenschaftlichen Kriterien nach § 22 bis § 24 StandAG und auf Grundlage der Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ergibt. Sie werden wegen des Primats der Sicherheit nachrangig zu den übrigen sicherheitsgerichteten Kriterien und zur Abwägung zwischen sicherheitstechnisch gleichwertigen Standorten zur Abwägung eingesetzt (§ 25 StandAG).

Die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien beinhalten planerische, raumordnerische Kriterien und Kriterien, die unterirdische Nutzungskonflikte behandeln. Bei der Anwendung planungswissenschaftlicher Kriterien geht es nicht um einen sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagersystemen untereinander, sondern um eine Abwägung gegenüber bestehenden Schutzgütern, wie z. B. Grundwasservorkommen und anderen unterirdischen Ressourcen oder existierender Bebauung bzw. Naturschutzgebieten sowie Kulturgütern (siehe auch /SCH 16/).

Die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien (nach Anlage 12 StandAG) werden für einen Abwägungsprozess in drei Gewichtungsgruppen unterteilt (Tab. A. 15). Die Wichtung nimmt von der Gewichtungsgruppe 1 (am stärksten) über die Gewichtungsgruppe 2, zur Gewichtungsgruppe 3 (geringste Wichtung) ab. Der Kommissionsbericht /KOM 16/ unterscheidet zudem zwischen obertägigen und untertägigen planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien.

**Tab. A. 15** Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien nach § 25

<b>Gewichtsguppe 1 (Schutz des Menschen und der menschlichen Gesundheit)</b>
Abstand zu vorhandener bebauter Fläche von Wohngebieten und Mischgebieten
Emissionen (zum Beispiel Lärm, Schadstoffe)
Oberflächennahe Grundwasservorkommen zur Trinkwassergewinnung
Überschwemmungsgebiete
<b>Gewichtsguppe 2 (Schutz einzigartiger Natur- und Kulturgüter vor irreversiblen Beeinträchtigungen)</b>
Naturschutz- und Schutzgebiete nach §§ 23 und 32 Bundesnaturschutzgesetz
bedeutende Kulturgüter
tiefe Grundwasservorkommen zur Trinkwassergewinnung
<b>Gewichtsguppe 3 (Sonstige konkurrierende Nutzungen und Infrastruktur)</b>
Anlagen, die der zwölften Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes unterliegen
Abbau von Bodenschätzen, einschließlich Fracking
geothermische Nutzung des Untergrundes
Nutzung des geologischen Untergrundes als Erdspeicher (Druckluft, CO <sub>2</sub> -Verpressung, Gas)

### Herausforderungen

Es wird erwartet, dass für die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien alle Daten vorliegen. Die Ausführungen in § 25 StandAG und in der Anlage 12 implizieren, dass diese Schutzgüter bereits existieren und damit in Ausdehnung und Lage bekannt sind. Deshalb sollten hierdurch keine Herausforderungen im Hinblick auf Datenungewissheiten entstehen.

Für die Anwendung der Kriterien ergeben sich grundsätzliche Herausforderungen:

- Es ist unklar, was mit der Formulierung „Vergleich von Gebieten, die unter Sicherheitsaspekten als gleichwertig zu betrachten sind“ genau gemeint ist. Sollte dies dahingehend zu interpretieren sein, dass bei sicherheitstechnisch gleichwertigen Gebieten diejenigen vom weiteren Standortauswahlverfahren ausgeschlossen werden, die bei der Prüfung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien „schlechter abschneiden“ so kann dies nur in dem Fall erfolgen, wenn bei allen diesen Gebieten eine für die Prüfung der geowissenschaftliche Kriterien ausreichende Datenlage vorliegt und keine großen Unterschiede bei Datenqualität und -umfang zwischen den zu vergleichenden Gebieten bestehen.

## Schlussfolgerung

Nach § 25 StandAG können die Kriterien auch für einen Vergleich zwischen Gebieten, nachrangig zu den geow. Abwägungskriterien herangezogen werden. Somit werden in diesem Verfahrensschritt Abwägungen und gegebenenfalls auch Vergleiche (siehe VfS 14-4) durchgeführt.

### **A.2.4      Verfahrensschritt 14-4**

#### Sachstand

Gemäß § 14 Abs. 2 StandAG erarbeitet die BGE einen Vorschlag für die übertägig zu erkundenden Standortregionen. Der Umfang der Arbeiten wird durch die Inhalte des Berichtes nach § 14 Abs. 2 StandAG festgelegt. Der Bericht enthält eine begründete Empfehlung zum weiteren Verfahren mit den Gebieten, für die aufgrund nicht hinreichender geologischer Daten, die Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG nicht erfolgen konnte.

#### Herausforderungen

Analog zum VfS 13-4 hat die BGE zu einzelnen Gebieten zu denen keine hinreichenden Informationen für die Anwendung der Kriterien nach den § 24 StandAG vorliegen, eine begründete Empfehlung zum weiteren Verfahren mit diesen Gebieten in ihrem Vorschlag aufzunehmen. Die geologische Datenlage hat sich bei § 14 StandAG nicht geändert. Deshalb ist zu erwarten, dass sich die Informationslage zu den Gebieten, welche aufgrund nicht hinreichender geologischer Daten einer Einordnung entziehen, nicht geändert hat.

Auch zu diesem Zeitpunkt ist nicht abzusehen, welchen Umfang diese Gebiete mit unzureichender Datenlage in Fläche und Anzahl einnehmen werden. Ebenso ist auch der allgemeine Umfang an unzureichenden Informationen zu den einzelnen Gebieten nicht abschätzbar. Die geforderte Begründung für den weiteren Umgang ist eine unbekannte Größe, die je nach Ausformulierung und der späteren Beschlusslage durch Bundesgesetz zu dem weiteren Verfahren mit diesen Gebieten einen signifikanten Einfluss auf die weitere Abfolge der Arbeiten in Bezug auf Zeitplanung und Aufwand haben kann.



Die Erarbeitung eines „Vorschlages“ für die übertägig zu erkundenden Standortregionen, kann auch dahingehend interpretiert werden, dass der Vorschlag nicht unbedingt alle günstigen Standortregionen enthalten muss, sondern nur eine begründete „Auswahl“. Diese Auswahl könnte erforderlich werden, wenn sich nach VfS 14-2 und 14-3 eine Vielzahl an günstigen Standortregionen ergeben, die aus unterschiedlichen Erwägungen heraus nicht alle erkundet werden können. Unter Umständen können somit Abwägungen und unter Umständen auch vergleichende Bewertungen erforderlich sein. Der VfS 14-4 wird jedoch nicht als ein relevanter Verfahrensschritt ausgewiesen da, wie in der Einleitung von Kap. 2 beschrieben, die Festlegung zutrifft, dass Abwägungen und vergleichende Bewertungen in den (vorangegangenen) Verfahrensschritten erfolgen, in denen auch die Anwendung der Kriterien stattfindet. Im VfS 14-4 erfolgt somit nur die Dokumentation der ermittelten Ergebnisse.

#### Schlussfolgerung

Es werden keine Arbeiten zu Abwägungen oder vergleichenden Bewertungen in diesem Verfahrensschritt erwartet.

### **A.2.5      Verfahrensschritt 14-5**

#### Sachstand

Gemäß § 14 Abs. 2 Satz 5 StandAG erarbeitet die BGE auf Grundlage der im VfS 14-4 festgelegten Standortregionen nach § 14 Abs. 1 Satz 5 StandAG standortbezogene Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung. Nach Maßgabe der Anforderungen und Kriterien §§ 22 bis 24 StandAG und für die Durchführung der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 16 Abs. 1 StandAG.

#### Herausforderungen

Zur Identifizierung der Parameter, welche durch die übertägige Erkundung ermittelt werden sollen, können insbesondere die Arbeiten in VfS 14-1 angewendet werden. Zur Erstellung der untertägigen Erkundungsprogramme sollen insbesondere auch die erforderlichen Informationen zur Durchführung der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Phase 2 berücksichtigt werden. Aus diesem Grund muss in diesem Verfahrensschritt bereits ein entsprechendes Konzept für die weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen erstellt werden. Im StandAG gibt es keine Informationen

bzw. Vorgaben, wie sich die Sicherheitsuntersuchungen zwischen repräsentativ (Phase 1), weiterentwickelt (Phase 2) und umfassend (Phase 3) von der Herangehensweise/Methodik unterscheiden sollen. Ein wesentlicher Unterschied wird die Datenverfügbarkeit für die einzelnen Phasen sein, diese wird sich zunehmend vertiefen.

Eine weitere Herausforderung könnte die Auswahl an Untersuchungsprogrammen zwischen den einzelnen Standortregionen sein. Aufgrund der Datenheterogenität müssen vermutlich nicht für alle Standortregionen die gleichen Erkundungsprogramme durchgeführt werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass sich durch die neuen Erkundungen vor allem der Umfang als auch die Datenqualität der bereits vorhandenen Datenlage verbessern lässt.

#### Schlussfolgerung

Abwägungen oder vergleichende Bewertungen werden in diesem Verfahrensschritt nicht durchgeführt.

### **A.2.6      Verfahrensschritt 14-6**

#### Sachstand

Gemäß § 14 Abs. 3 StandAG legt die BGE dem BfE den Vorschlag nach § 14 Abs. 2 StandAG bzw. VfS 14-4 für die übertägig zu erkundenden Standortregionen und die standortbezogenen Erkundungsprogramme aus VfS 14-5 vor. Nach StandAG muss der Vorschlag für die übertägig zu erkundenden Standortregionen die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens zu dem Zwischenbericht nach § 13 Abs. 2 StandAG und eine begründete Empfehlung zum weiteren Verfahren mit Gebieten, bei denen keine hinreichenden Informationen für die Anwendung der Kriterien nach den §§ 22 bis 24 StandAG vorliegen, enthalten.

#### Schlussfolgerung

Die Übermittlung der oben genannten Unterlagen an das BfE stellt einen Meilenstein im § 14 StandAG dar. Es werden keine besonderen Herausforderungen erwartet. Abwägungen oder Vergleiche werden nicht durchgeführt.

### **A.3 Phase 1C (§ 15 StandAG)**

Im § 15 StandAG wird über die Standortregionen zur übertägigen Erkundung und deren Erkundungsprogramme entschieden. Die übertägig zu erkundenden Standortregionen werden zuletzt durch Bundestag/Bundesrat durch Bundesgesetz festgelegt.

#### **A.3.1 Verfahrensschritt 15-1**

##### Sachstand

Gemäß § 7 Abs. 1 StandAG gibt das BfE der Öffentlichkeit und den Trägern öffentlicher Belange nach Übermittlung des jeweiligen Vorschlags, sowie im Fall einer Nachprüfung nach abgeschlossenem Nachprüfverfahren nach § 10 Abs. 5 StandAG, Gelegenheit zur Stellungnahme zu den Vorschlägen, sowie den dazu jeweils vorliegenden Berichten und Unterlagen.

Gemäß § 7 Abs. 3 StandAG hat das BfE in den betroffenen Gebieten nach Abschluss des jeweiligen Stellungnahmeverfahrens einen Erörterungstermin zu den Vorschlägen sowie den dazu jeweils vorliegenden Berichten und Unterlagen auf Grundlage der ausgewerteten Stellungnahmen durchführen. Nach § 7 Abs. 1 StandAG sind die Stellungnahmen bei den weiteren Verfahrensschritten zu berücksichtigen. Die Auswertung der Stellungnahmen erfolgt durch das BfE und der BGE.

##### Herausforderung

Der Umfang, der sich aus möglichen Nachprüfverfahren ergibt, ist ungewiss, wodurch auch der Prüfaufwand für das BfE, als auch der mögliche Überarbeitungsbedarf für die BGE nicht konkret eingeschätzt werden kann. Die Auswertung der Stellungnahmen hat durch das BfE und der BGE zu erfolgen. Hier könnten unterschiedliche Ansichten bei der Auswertung der Stellungnahmen auftreten. Für das weitere Verfahren erscheint eine Regelung im Umgang mit möglichen unterschiedlichen Meinungen und Auswertungsergebnissen und der Umgang bei möglichem Dissens der Teilnehmer insgesamt im Erörterungstermin hilfreich (siehe hierzu auch VfS 17-1 und 19-1).

## Schlussfolgerung

Im Verfahren zur Öffentlichkeitsbeteiligung sind keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen vorgesehen. Inwieweit die Ergebnisse der Öffentlichkeitsbeteiligung dem Vorschlag der BGE beeinflussen können (z. B. im VfS 15-3), kann hier nicht abgeschätzt werden.

### **A.3.2      Verfahrensschritt 15-2**

#### Sachstand

Gemäß § 15 Abs. 1 StandAG hat das BfE den Vorschlag der BGE (nach § 14 Abs. 2 StandAG) für die übertägig zu erkundenden Standortregionen zu prüfen. Darüber hinaus ist der BGE die Gelegenheit zur Stellungnahme einzuräumen, wenn das BfE von dem Vorschlag abweichen will.

#### Herausforderung

Führt eine Prüfung zu einem abweichenden Vorschlag mit einer möglichen unterschiedlichen vorzuschlagenden Auswahl oder auch Rangliste an übertägig zu erkundenden Standortregionen, dann würde das BfE hierdurch aktiv in die Standortauswahl eingreifen. Ein derartiger Rollentausch würde vermutlich nicht nachvollziehbar sein. Es ist davon auszugehen, dass die Gesetzesvorgabe eher darauf abzielt, dass bei ergebenden Unklarheiten und/oder Missständen durch die Prüfung des BfE, die BGE aufgefordert wird, hierzu wie bereits in § 15 Abs. 1 Satz 2 StandAG ausgeführt, Stellung zu nehmen und ggf. die identifizierten Defizite ausräumt.

Im Rahmen der Prüfaufgaben des BfE ist es möglich, dass eigene Abwägungen und/oder Vergleiche erfolgen, um die Plausibilität, Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses zu prüfen. Es ist zu erwarten, dass die Herausforderungen und Möglichkeiten der methodischen Ansätze denen entsprechen, wie sie in den jeweils entsprechenden Verfahrensschritten der BGE durchzuführen sind. Daher erfolgt keine separate Betrachtung der Herausforderungen für den betreffenden Verfahrensschritt.

## Schlussfolgerung

Im Verfahrensschritt 15-2 prüft das BfE die Unterlagen der Vorhabenträgerin aus VfS 14-4 und 14-5. Unter Umständen kann das BfE eigene Abwägungen und/oder Vergleiche durchführen, um die Plausibilität, Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Vorschlages der BGE zu prüfen. Es ist davon auszugehen, dass die Herausforderungen einer Prüfung denen entsprechen, wie sie in den jeweils entsprechenden Verfahrensschritten der BGE durchzuführen sind.

### **A.3.3      Verfahrensschritt 15-3**

#### Sachstand

Gemäß § 15 Abs. 2 Satz 1 StandAG wertet das BfE insbesondere die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens nach VfS 15-1 einschließlich der Beratungsergebnisse des Nationalen Begleitgremiums (NBG) aus und erarbeitet eine begründete Empfehlung zum Vorschlag der BGE.

#### Herausforderung

Es ist noch unklar, ob bzw. mit welchem Gewicht die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, einschließlich der Beratungsergebnisse des NBG in die begründete Empfehlung des BfE zum Vorschlag der BGE einfließen. Dem in § 1 StandAG festgelegten Primates der Sicherheit eines Endlagersystems, könnten die oben genannten Ergebnisse für die Einengung (Anzahl) der Standortregionen nur dann ausschlaggebend sein, wenn mehrere Standortregionen als sicherheitstechnisch gleichwertig angesehen werden können. In diesem Fall stellt sich die Frage, ob die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien die gleiche Entscheidungserheblichkeit aufweisen wie die Ergebnisse der Beteiligung. Generell ist es zweifelhaft ob die Datenlage in Phase 1 bereits zu einer belastbaren Aussagekraft zur sicherheitstechnischen Vergleichbarkeit von Standortregionen ausreicht. Mit anderen Worten: Es besteht die Gefahr, dass Gebiete auf der Grundlage von nicht-sicherheitsgerichteten Kriterien aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen werden, die sich bei besserem Kenntnisstand in den nachfolgenden Phasen eventuell als sicherheitstechnisch überlegen erweisen könnten.

### Schlussfolgerung

Grundsätzlich können aus der Öffentlichkeitsbeteiligung Einwendungen kommen, welche Seitens des BfE unter Umständen zu Abwägungen und/oder zu vergleichenden Bewertungen führen, welche in die begründete Empfehlung zum Vorschlag des Vorhabenträgers eingearbeitet werden müssen. Diese Herausforderungen sind jedoch nicht Gegenstand der Aufgabenstellung dieses Vorhabens und werden deshalb nicht weiter untersucht.

### **A.3.4      Verfahrensschritt 15-4**

#### Sachstand

Gemäß § 15 Abs. 2 Satz 1 StandAG übermittelt das BfE den Vorschlag der BGE, einschließlich aller hierfür erforderlichen Unterlagen an das BMU. Zu den Unterlagen gehören die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, die Beratungsergebnisse des NBG und eine begründete Empfehlung zum Vorschlag der BGE. Das BMU wird voraussichtlich keine eigenen Prüfungen der Unterlagen der BGE vornehmen. Das BMU hat die Aufgabe, den übergebenen Vorschlag in eine Gesetzesvorlage sachlich aber auch formal zu überführen.

#### Herausforderung

Es werden keine besonderen Herausforderungen erwartet.

#### Schlussfolgerung

Die Übermittlung der oben genannten Unterlagen an das BMU stellt einen Meilenstein im § 15 StandAG dar. Abwägungen oder vergleichende Bewertungen werden im VfS 15-4 nicht durchgeführt.

### **A.3.5      Verfahrensschritt 15-5**

#### Sachstand

Gemäß § 15 Abs. 3 StandAG legt die Bundesregierung durch Bundesgesetz die übertragig zu erkundenden Standortregionen und das weitere Verfahren für Gebiete ohne hinreichende Informationen fest.

#### Herausforderung

In diesem Verfahrensschritt wird u. a. entschieden, wie mit den Gebieten mit unzureichenden Daten umzugehen ist. Zu dieser Entscheidung könnte durchaus die Forderung nach einer zusätzlichen Datenerhebung für diese Gebiete in Phase 2 gehören, die die Lücke von unzureichenden Standortkenntnissen schließen soll. Es sind möglicherweise einzelne Verfahrensschritte z. B. Fachkonferenz Teilgebiete, repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und Regionalkonferenzen neu zu durchlaufen. Dieser Umstand führt zwangsläufig zu einem erhöhten Zeit- und Arbeitsaufwand.

#### Schlussfolgerung

Die Bundesregierung führt in diesem Verfahrensschritt keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durch.

### **A.3.6      Verfahrensschritt 15-6**

#### Sachstand

Gemäß § 15 Abs. 4 StandAG prüft das BfE die standortbezogenen Erkundungsprogramme zur übertragigen Erkundung für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standortregionen (VfS 15-5) und legt diese fest. Die standortbezogenen Erkundungsprogramme sowie Änderungen werden im Bundesanzeiger veröffentlicht.

#### Herausforderung

Zusätzliche standortbezogene Erkundungsprogramme ergeben sich möglicherweise dann, wenn die standortbezogenen Erkundungsprogramme zur übertragigen Erkundung

für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standortregionen von denen der Prüfung nach § 15 Abs. 1 StandAG abweichen.

#### Schlussfolgerung

Für die Prüfung der standortbezogenen Erkundungsprogramme werden keine Arbeiten zu Abwägungen oder vergleichenden Bewertung erwartet.

### **A.4 Phase 2A (§ 16 StandAG)**

Die BGE führt übertägige Erkundungen durch und erarbeitet einen Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standorte.

#### **A.4.1 Verfahrensschritt 16-1**

##### Sachstand

Gemäß § 16 Abs. 1 Satz 1 StandAG werden die in VfS 15-5 festgelegten Standortregionen vom der BGE übertägig nach den in § 15 Abs. 4 StandAG (siehe VfS 15-6) festgelegten standortbezogenen Erkundungsprogrammen untersucht und Geodaten erhoben.

##### Herausforderung

Die Herausforderungen in diesem Verfahrensschritt sind überwiegend erkundungstechnischer Natur. Das StandAG macht keine Aussagen darüber, ob es möglich ist während der Erkundungsmaßnahmen auch Nachforderungen zu Messparametern zu erheben bzw. die Erkundungsprogramme anzupassen.

##### Schlussfolgerung

Im VfS 16-1 werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.



#### **A.4.2      Verfahrensschritt 16-2**

##### Sachstand

Gemäß § 16 Abs. 1 Satz 2 StandAG hat die BGE auf der Grundlage der Erkundungsergebnisse in VfS 16-1 weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 StandAG durchzuführen.

##### Herausforderung

Die grundlegenden Erkenntnisse aus dem VfS 14-1 (erstmalige Durchführung von Sicherheitsuntersuchungen) gelten auch für die Durchführung der weiterentwickelten Sicherheitsuntersuchungen. Im Wesentlichen wird sich die Weiterentwicklung der Sicherheitsuntersuchungen, von Phase 1 (VfS 14-1) zu Phase 2 (VfS 16-1) auf die detailliertere Datenbasis aufgrund der übertägigen Erkundungsergebnisse stützen. Die übertägigen Erkundungsprogramme wurden nach VfS 14-5 bzw. § 14 Abs. 1 Satz 4 StandAG insbesondere auch unter Hinsicht der Durchführung der weiterentwickelten Sicherheitsuntersuchungen erstellt. Hierdurch wird die in Phase 1 bestehende Datenheterogenität zwischen Standortregionen ausgeglichen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bestimmte Parameter erst nach der untertägigen Erkundung in Phase 3 (VfS 18-1), für die umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen vorliegen.

Die nach VfS 14-1 ermittelte Ungewissheit bezüglich der Forschung in Bezug auf die maximale Temperatur für die Endlagerbehälter für die unterschiedlichen Wirtsgesteine liegt voraussichtlich in Phase 2 vor.

##### Schlussfolgerung

Abwägungen oder vergleichende Bewertungen werden im Verfahrensschritt 16-2 nicht durchgeführt. Die Ergebnisse der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind jedoch relevant zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im VfS 16-5.

### **A.4.3      Verfahrensschritt 16-3**

#### Sachstand

Gemäß § 16 Abs. 1 Satz 3 StandAG werden zum ersten Mal im Standortauswahlverfahren sozioökonomische Potenzialanalysen gefordert. Nach /KOM 16/ sollen sozioökonomische Potenzialanalysen folgende allgemeine Fragestellung beantworten:

*„Die Potenzialanalyse soll zu einer qualitativ gewichteten und, wo immer möglich, quantitativ gestützten Aussage darüber kommen, ob die Realisierung eines Endlagers in der Standortregion positive, negative oder neutrale Entwicklungschancen erwarten lässt.“*

Wenn eine weitere Abwägung zwischen sicherheitstechnisch gleichwertig geeigneten Standortregionen durch geowissenschaftliche und planungswissenschaftliche Abwägungskriterien nicht mehr möglich ist, können die Ergebnisse der Potenzialanalysen, herangezogen werden. Nach /KOM 16/ werden in einer sozioökonomischen Potenzialanalyse Kriterien untersucht, welche sich auf die potenzielle Entwicklung des Arbeitsmarktes, der regionalen Investitionen, des regionalen Tourismus, des Wohnungsmarktes und der landwirtschaftlichen Charakteristika unter der Annahme, dass ein Endlager errichtet wird, beziehen. Sie geben zudem Anhaltspunkte für die zukünftige Kompensation sozioökonomischer Nachteile in den jeweiligen Standortregionen, damit eine möglichst gerechte Verteilung der Lasten erfolgt. Hinweise für eine Abwägung der sozioökonomischen Aspekte untereinander gibt /KOM 16/. Hier werden quantitative Schwellenwerte angegeben, die auf positive oder negative Abweichungen in Bezug auf eine vorher vereinbarte Vergleichsregion hinweisen.

#### Herausforderung

Welche zukünftige Entwicklung wird als positiv oder negativ angesehen. Hinweise für eine Abwägung gibt /KOM 16/, hier werden quantitative Schwellenwerte angegeben, die auf positive oder negative Abweichungen in Bezug auf eine vorher vereinbarte Vergleichsregion hinweisen.

Die größte Herausforderung dürfte der Blick in die Zukunft sein. Wie sich der Bau eines Endlagers auf dicht besiedelte Regionen sozioökonomisch auswirkt, ist schwer vorherzusagen.

### Schlussfolgerung

In diesem Verfahrensschritt werden nur die sozioökonomischen Potenzialanalysen durchgeführt, welche keine Abwägungen oder Vergleiche beinhalten. Eine Anwendung der Ergebnisse kann erst nach der erneuten Anwendung der Kriterien und Anforderungen nach §§ 22 bis 24 StandAG und der Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 25 StandAG erfolgen.

#### **A.4.4      Verfahrensschritt 16-4**

### Sachstand

Gemäß § 16 Abs. 2 Satz 2 StandAG hat die BGE auf Grundlage der in VfS 16-1 ermittelten Geodaten unter erneuter Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 23 StandAG, Gebiete auszuschließen, die nicht den Anforderungen und Kriterien entsprechen.

### Herausforderung

Die erneute Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22-23 StandAG erlaubt aufgrund der konkreteren Datenlage einen weiteren Ausschluss bzw. eine Eingrenzung der erkundeten Standortregionen. Die übertägigen Erkundungsprogramme wurden insbesondere zum Zweck der Anwendung der Anforderungen und Kriterien bzw. zum Schließen der in Phase 1 möglicherweise vorhandenen Datenlücken entwickelt.

Grundsätzlich gelten auch hier die Anmerkungen aus VfS 13-1 und VfS 13-2. Bezüglich des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter“ und der Mindestanforderung „geringe Gebirgsdurchlässigkeit“ im Bereich des ewG. Es bleibt offen, ob alle Informationen zur Anwendung dieser beiden Kriterien durch die übertägigen Erkundungsmaßnahmen erhoben werden können.

### Schlussfolgerung

Die Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen erfordert keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen.

#### **A.4.5      Verfahrensschritt 16-5**

##### Sachstand

Gemäß § 16 Abs. 2 Satz 1 StandAG werden von der BGE durch die nach dem VfS 16-4 verbleibenden Gebiete, durch die erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG und unter Berücksichtigung der Ergebnisse der übertägigen Erkundungen und der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, günstige Standorte zur untertägigen Erkundung ermittelt.

##### Herausforderung

Im Gegensatz zu der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in den VfS 13-3 und VfS 14-2, wird in diesem Verfahrensschritt durch die Erhebung neuer Geodaten aufgrund der übertägigen Erkundung eine differenziertere Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erwartet (siehe auch Kap. 2.2.1.2). Zudem wird durch die bessere Datenbasis eine belastbare Bewertung bzw. Ausweisung von Standorten auf Basis der Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen erwartet.

##### Schlussfolgerung

In diesem Verfahrensschritt werden Abwägungen oder vergleichende Bewertungen zur Eingrenzung der Standortregionen zu Standorten durchgeführt.

#### **A.4.6      Verfahrensschritt 16-6**

##### Sachstand

Gemäß § 16 Abs. 2 Satz 2 StandAG werden die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 25 StandAG erneut angewendet.

##### Herausforderung

Analog zur Beschreibung der Herausforderungen in VfS 14-3 liegen voraussichtlich alle Informationen zur Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien vor. Im Grunde wird sich die Datenlage im Gegensatz zur Phase 1 nicht wesentlich ändern. Vor allem die Kriterien zum Abstand zu vorhandener bebauter Fläche (Wohngebiete und

Mischgebiete), Emissionen (Lärm, radiologische und konventionelle Schadstoffe), oberflächennahe Grundwasservorkommen zur Trinkwassergewinnung, Überschwemmungsgebiete, Naturschutzgebiete und bedeutende Kulturgüter werden sich voraussichtlich nicht ändern.

Änderungen könnten sich durch die relativ langen Verfahrenslaufzeiten zwischen den Phasen ergeben, so dass neue Konflikte durch eine Änderung der Nutzung des Untergrundes, z. B. durch Geothermie, Speicherformationen, dem Abbau von Bodenschätzen oder einer Änderung zum Schutz von Trinkwasservorkommen oder einer sonstigen Änderung und dadurch konkurrierenden Nutzung entstehen.

Die sozioökonomischen Potenzialanalysen enthalten zunächst keine Abwägung von Gebieten bzw. Regionen. Die Ergebnisse können deshalb erst nach den Arbeiten in den oben genannten Verfahrensschritten erfolgen und helfen sicherheitstechnisch gleichwertige Regionen weiter einzugrenzen. Deshalb wird angenommen dass die Ergebnisse der sozioökonomischen Potenzialanalysen nachfolgend zu den planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien angewendet werden können.

#### Schlussfolgerung

Wenn für die ermittelten Standorte in VfS 16-5 ein gleichwertiges Sicherheitsniveau besteht, kann eine Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 25 StandAG erfolgen. Hierfür müssen Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt werden.

#### **A.4.7      Verfahrensschritt 16-7**

##### Sachstand

Gemäß § 16 Abs. 2 Satz 3 StandAG erarbeitet die BGE einen Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standorte. Dabei sind auch die möglichen Umweltauswirkungen sowie sonstige mögliche Auswirkungen eines Endlagervorhabens zu erarbeiten.

##### Herausforderung

Es werden keine besonderen Herausforderungen erwartet.

## Schlussfolgerung

In diesem Verfahrensschritt werden keine Arbeiten zu Abwägungen und vergleichende Bewertungen erwartet.

### **A.4.8      Verfahrensschritt 16-8**

#### Sachstand

Gemäß § 16 Abs. 2 Satz 3 StandAG sollen Erkundungsprogramme und Prüfkriterien für die untertägige Erkundung der Standorte (nach § 16 Abs. 3 StandAG) nach Maßgabe der Anforderungen und Kriterien gemäß den §§ 22 bis 24 StandAG und für die Durchführung der umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 18 Abs. 1 erarbeitet werden.

#### Herausforderung

Die grundlegenden Herausforderungen zur Erstellung der untertägigen Erkundungsprogramme sind vergleichbar zu denen im VfS 14-5 (Erkundungsprogramme zur übertägigen Erkundung). Zur Erstellung der untertägigen Erkundungsprogramme, sollen insbesondere auch die erforderlichen Informationen für die umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Phase 3 berücksichtigt werden. Aus diesem Grund muss in diesem Verfahrensschritt bereits ein Konzept für die umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (nach § 18 Abs. 1 StandAG) erstellt werden.

Zum ersten Mal im Verfahren sollen Prüfkriterien erarbeitet werden, welche in Phase 3 zur Anwendung kommen. Nach § 2 Nr. 14 StandAG sind Prüfkriterien:

*„die nach § 16 Absatz 2, § 17 Absatz 4 und § 18 Absatz 2 für die Bewertung der Ergebnisse der untertägigen Erkundung aufzustellenden und anzuwendenden standortspezifischen Prüfmaßstäbe;“*

Eine Herausforderung stellt die Ableitung der Prüfkriterien und der standortspezifischen Prüfmaßstäbe für die Phase 3 dar, wobei die Prüfkriterien eher als Ausschlusskriterien zu verstehen sind und weniger zum Vergleich oder zur Abwägung von Standorten herangezogen werden sollen. Die Prüfkriterien sollen nach /KOM 16/ erst im Laufe des Verfahrens durch die vertiefende Entwicklung der Informationen erstellt werden.

### Schlussfolgerung

Im VfS 16-8 werden keine Arbeiten zu Abwägungen und vergleichende Bewertungen erwartet.

#### **A.4.9      Verfahrensschritt 16-9**

### Sachstand

Gemäß § 16 Abs. 3 StandAG übermittelt die BGE seinen Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standorte mit Begründung an das BfE einschließlich einer Darstellung möglicher Umweltauswirkungen, sowie sonstiger möglicher Auswirkungen eines Endlagervorhabens. Gemäß § 16 Abs. 4 StandAG sind dem Vorschlag die entsprechenden Erkundungsprogramme und Prüfkriterien für die untertägige Erkundung beizufügen.

### Herausforderung

Im § 16 Abs. 3 StandAG wird erwähnt, dass eine Darstellung möglicher Umweltauswirkungen, sowie sonstige mögliche Auswirkungen eines Endlagervorhabens dem Vorschlag beizufügen sind. Welche Informationen hier genau erarbeitet werden sollen und insbesondere was mit „sonstige mögliche Auswirkungen“ genau gemeint ist, ist im StandAG nicht definiert.

### Schlussfolgerung

Die Übermittlung der oben genannten Unterlagen an das BfE stellt einen Meilenstein im § 16 StandAG dar. Abwägungen oder vergleichende Bewertungen werden im VfS 16-9 nicht durchgeführt.

#### **A.5      Phase 2b (§ 17 StandAG)**

In § 17 StandAG werden die Standorte zur untertägigen Erkundung und deren Erkundungsprogramme festgelegt. Federführend ist hier das BfE. Die untertägig zu erkundenden Standorte werden zuletzt durch die Bundesregierung durch Bundesgesetz festgelegt.

## **A.5.1      **Verfahrensschritt 17-1****

### Sachstand

Nach § 7 Abs. 1 StandAG gibt das BfE der Öffentlichkeit und den Trägern öffentlicher Belange nach Übermittlung des jeweiligen Vorschlags, sowie im Fall einer Nachprüfung nach abgeschlossenem Nachprüfverfahren nach § 10 Abs. 5 Gelegenheit zur Stellungnahme zu den Vorschlägen sowie den dazu jeweils vorliegenden Berichten und Unterlagen.

Gemäß § 7 Abs. 3 StandAG hat das BfE in den betroffenen Gebieten nach Abschluss des jeweiligen Stellungnahmeverfahrens einen Erörterungstermin zu den Vorschlägen sowie den dazu jeweils vorliegenden Berichten und Unterlagen auf Grundlage der ausgewerteten Stellungnahmen durchführen. Nach § 7 Abs. 1 StandAG sind die Stellungnahmen bei den weiteren Verfahrensschritten zu berücksichtigen. Die Auswertung der Stellungnahmen erfolgt durch das BfE und der BGE.

### Herausforderung

Mit der Eingrenzung der Standortregionen in Phase 2 zu Standorten, wird sich der Umfang der zu beteiligenden Bevölkerung voraussichtlich reduzieren. Wie auch für die Veröffentlichung des Vorschlages in VfS 15-1, ist der Umfang, der sich aus möglichen Nachprüfverfahren ergibt trotzdem ungewiss, wodurch auch der Prüfaufwand für das BfE als auch der mögliche Überarbeitungsbedarf für die BGE nicht konkret eingeschätzt werden kann.

Da sich die potentiellen Standorte weiter konkretisieren, sind möglicherweise Änderungen in der Wahrnehmung der Bevölkerung zu erwarten. Wie sich dieses auf die Öffentlichkeitsbeteiligung auswirkt ist unklar.

### Schlussfolgerung

Im Verfahren zur Öffentlichkeitsbeteiligung sind keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen vorgesehen. Inwieweit die Ergebnisse der Öffentlichkeitsbeteiligung den Vorschlag von der BGE beeinflussen können (z. B. im VfS 17-4), kann hier nicht abgeschätzt werden.



## **A.5.2      **Verfahrensschritt 17-2****

### Sachstand

Gemäß § 17 Abs. 1 StandAG hat das BfE den Vorschlag der BGE nach § 16 Abs. 3 StandAG zu prüfen. Darüber hinaus ist der BGE die Gelegenheit zur Stellungnahme einzuräumen, wenn das BfE von dem Vorschlag abweichen will.

### Herausforderung

Durch die Prüfung des Vorschlages nach § 16 Abs. 3 StandAG, muss das BfE auch die Entscheidungen zur Eingrenzung der Standortregionen nachvollziehen können. Hier stellen sich die gleichen methodischen Herausforderungen, wie für die Arbeiten im VfS 15-2.

Führt die Prüfung (analog zu VfS 15-2) zu einem abweichenden Vorschlag, mit einer möglichen unterschiedlichen vorzuschlagenden Auswahl oder auch Rangliste an untertägig zu erkundenden Standorten, dann würde das BfE hierdurch aktiv in die Standortauswahl eingreifen. Ein derartiger Rollentausch würde vermutlich nicht nachvollziehbar sein. Es ist davon auszugehen, dass die Gesetzesvorgabe eher darauf abzielt, dass bei ergebenden Unklarheiten und/oder Missständen durch die Prüfung des BfE, die BGE aufgefordert wird, wie in § 17 Abs. 1 Satz 2 StandAG ausgeführt, hierzu Stellung zu nehmen und ggf. die identifizierten Defizite ausräumt.

Im Rahmen der Prüfaufgaben des BfE ist es möglich, dass eigene Abwägungen und/oder Vergleiche erfolgen, um die Plausibilität, Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses zu prüfen. Es ist zu erwarten, dass die Herausforderungen und Möglichkeiten der methodischen Ansätze denen entsprechen, wie sie in den jeweils entsprechenden Verfahrensschritten der BGE durchzuführen sind. Daher erfolgt keine separate Betrachtung der Herausforderungen für den betreffenden Verfahrensschritt.

### Schlussfolgerung

Im Verfahrensschritt 17-2 prüft das BfE die Unterlagen der Vorhabenträgerin aus VfS 16-4. Unter Umständen kann das BfE eigene Abwägungen und/oder Vergleiche durchführen, um die Plausibilität, Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Vorschlages der BGE zu prüfen. Es ist davon auszugehen, dass die Herausforderungen einer Prüfung

denen entsprechen, wie sie in den jeweils entsprechenden Verfahrensschritten der BGE durchzuführen sind.

### **A.5.3      Verfahrensschritt 17-3**

#### Sachstand

Gemäß § 17 Abs. 2 StandAG, Satz 1 wertet das BfE die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, einschließlich der Beratungsergebnisse des Nationalen Begleitgremiums aus und erarbeitet eine begründete Empfehlung zum Vorschlag der BGE (nach § 16 Abs. 3 StandAG).

#### Herausforderung

Analog zum VfS 15-3 stellt die Öffentlichkeitsbeteiligung eine unvorhersehbare Variable dar. Die grundlegenden Herausforderungen aus VfS 15-3 gelten auch in diesem Verfahrensschritt. Der potentielle Ausschluss von Gebieten aufgrund der übertägigen Erkundungsmaßnahmen, verringert die mögliche Anzahl an Kommunen, welche in den Prozess der Öffentlichkeitsbeteiligung einbezogen werden müssen. Mit der weiteren Eingrenzung von Regionen zu konkreten Standorten verändert sich jedoch die Wahrnehmung in der Bevölkerung, was ein nicht zu unterschätzender Faktor ist.

#### Schlussfolgerung

Grundsätzlich können aus der Öffentlichkeitsbeteiligung Einwendungen kommen, welche Seitens des BfE unter Umständen zu Abwägungen und/oder zu vergleichenden Bewertungen führen können, welche in die begründete Empfehlung zum Vorschlag des Vorhabenträgers eingearbeitet werden müssen. Diese Herausforderungen sind jedoch nicht Gegenstand der Aufgabenstellung dieses Vorhabens und werden deshalb nicht weiter untersucht. Es werden keine sicherheitstechnischen Abwägungen oder vergleichende Bewertungen von Geodaten durchgeführt.

#### **A.5.4      Verfahrensschritt 17-4**

##### Sachstand

Bevor der Vorschlag nach § 17 Abs. 2 StandAG an das BMU übermittelt wird, stellt das BfE gemäß § 17 Abs. 3 StandAG durch Bescheid fest, ob das bisherige Standortauswahlverfahren nach den Regelungen des StandAG durchgeführt wurde und der Auswahlvorschlag diesen entspricht und veröffentlicht diesen.

##### Herausforderung

Gegen den Bescheid können nach Umwelt-Rechtsbehelfsgesetz Rechtsbehelfe eingelegt werden. Rechtsbehelfe können eingelegt werden durch die kommunalen Gebietskörperschaften, in deren Gebiet ein zur untertägigen Erkundung vorgeschlagener Standort liegt und deren Einwohnerinnen und Einwohner sowie deren Grundstückseigentümerinnen und Grundstückseigentümer den nach § 3 des Umwelt-Rechtsbehelfsgesetzes anerkannten Vereinigungen gleichstehen. Über Klagen gegen den Bescheid, entscheidet im ersten und letzten Rechtszug das Bundesverwaltungsgericht.

Der Umfang, der sich aus möglichen Nachprüfverfahren ergibt ist ungewiss, wodurch auch der Prüfaufwand für das BfE als auch der mögliche Überarbeitungsbedarf für die BGE nicht konkret eingeschätzt werden kann.

##### Schlussfolgerung

Für die Erstellung des Bescheides, ob das bisherige Standortauswahlverfahren nach den Regelungen des StandAG durchgeführt wurde, werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

#### **A.5.5      Verfahrensschritt 17-5**

##### Sachstand

Gemäß § 17 Abs. 2 Satz 1 StandAG übermittelt das BfE den Standortvorschlag des BGE (nach § 16 Abs. 3 StandAG), einschließlich aller hierfür erforderlichen Unterlagen, an das BMU. Der Vorschlag kann erst übermittelt werden, wenn gegen den Bescheid

nach § 17 Abs. 2 Satz 3 StandAG keine Rechtsbehelfe mehr eingelegt werden können oder das Bundesverwaltungsgericht über den Bescheid rechtskräftig entschieden hat.

Das BfE fügt die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, einschließlich der Beratungsergebnisse des Nationalen Begleitgremiums und eine begründete Empfehlung zum Vorschlag der BGE hinzu.

#### Herausforderung

Analog zum VfS 15-4 wird das BMU keine eigenen Prüfungen der Unterlagen der BGE vornehmen. Aus der Sicht des BfE hat das BMU die Aufgabe, den übergebenen Vorschlag in eine Gesetzesvorlage sachlich aber auch formal zu überführen.

#### Schlussfolgerung

Dieser Verfahrensschritt stellt einen Meilenstein dar. Es werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

### **A.5.6      Verfahrensschritt 17-6**

#### Sachstand

Gemäß § 17 Abs. 2 Satz 3 und 4 StandAG unterrichtet die Regierung den Deutschen Bundestag und den Bundesrat über die untertägig zu erkundenden Standorte und legt insbesondere die Unterlagen nach § 17 Abs. 2 Satz 1 StandAG vor. Die untertägig zu erkundenden Standorte werden durch Bundesgesetz bestimmt.

#### Herausforderung

Im VfS 15-5 (Phase 1) wurde durch die Bundesregierung durch Bundesgesetz festgelegt, wie mit Gebieten mit unzureichenden Daten umzugehen ist. Im § 17 StandAG werden im StandAG keine Aussagen über Gebiete mit unzureichenden Daten gemacht, was den Schluss nahelegt, dass davon ausgegangen wird, dass alle Gebiete nach der über-tägigen Erkundung eingeordnet werden können. Ob dies wirklich zutrifft kann zu diesem Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden.

### Schlussfolgerung

Dieser Verfahrensschritt stellt einen Meilenstein dar. Es werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

## **A.5.7      Verfahrensschritt 17-7**

### Sachstand

Gemäß § 17 Abs. 4 StandAG prüft das BfE die standortbezogenen Erkundungsprogramme und Prüfkriterien zur untertägigen Erkundung, für die durch Bundesgesetz ausgewählten Standorte, legt diese fest und veröffentlicht sie, sowie Änderungen im Bundesanzeiger.

### Herausforderung

Im Laufe des Verfahrens sollen mögliche Änderungen berücksichtigt werden, wodurch die Prüfung der Erkundungsmaßnahmen erst zum Schluss erfolgen. Besondere Herausforderungen werden nicht erwartet.

### Schlussfolgerung

Es werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

## **A.6      Phase 3A (§ 18 StandAG)**

Im § 18 StandAG werden vom der BGE die untertägigen Erkundungsmaßnahmen durchgeführt und Standortvorschläge erarbeitet

### **A.6.1      Verfahrensschritt 18-1**

#### Sachstand

Gemäß § 18 Abs. 1 Satz 1 StandAG werden zu Beginn der Phase 3 die nach § 17 Abs. 4 StandAG durch Bundesgesetz festgelegten Standorte (VfS 17-6), entsprechend der festgelegten Erkundungsprogramme (VfS 17-7) durch die BGE untertägig erkundet.

### Herausforderung

Analog zum Verfahrensschritt 16-1 (übertägige Erkundung) sind die Herausforderungen in diesem Verfahrensschritt überwiegend erkundungstechnischer Natur. Auch für die untertägige Erkundung stellt sich die Frage, ob es möglich ist während der Erkundungsmaßnahmen auch Nachforderungen zu Messparametern zu erheben bzw. die Erkundungsprogramme anzupassen.

### Schlussfolgerung

In diesem Verfahrensschritt werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

## **A.6.2      Verfahrensschritt 18-2**

### Sachstand

Auf der Grundlage der Erkundungsergebnisse hat die BGE gemäß § 18 Abs. 1 Satz 2 StandAG umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen.

Hierbei bildet die der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung eine wesentliche Grundlage für die nach den §§ 14, 16 und 18 StandAG im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 StandAG durchzuführende Bewertung, ob an einem Standort in Verbindung mit dem vorgesehenen Endlagerkonzept der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle erwartet werden kann.

Die der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung die derzeit noch den Status eines Referentenentwurfs hat ist nach § 26 Abs.3 StandAG spätestens alle zehn Jahre zu überprüfen und, soweit erforderlich, an den Stand von Wissenschaft und Technik anzupassen.

### Herausforderung

Die grundlegenden Erkenntnisse aus dem VfS 14-1 (erstmalige Durchführung von Sicherheitsuntersuchungen) gelten auch für die Durchführung der umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Im Wesentlichen wird sich die Weiterentwicklung der

Sicherheitsuntersuchungen, von Phase 2 (VfS 16-2) zu Phase 3 auf die detailliertere Datenbasis aufgrund der untertägigen Erkundungsergebnisse stützen. Zu diesem Zeitpunkt müssen alle Daten zur Durchführung der umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen vorliegen.

Zum Zeitpunkt der Durchführung dieses Verfahrensschrittes besteht durchaus die Möglichkeit, dass eine Revision der der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung seit den letzten durchgeführten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen stattgefunden hat. Dabei wären Modifikationen der Sicherheitsanforderungen möglich, über die jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Aussagen getroffen werden können. Das kann sowohl für die BGE als auch für das BfE ein zusätzlicher nicht abschätzbarer Arbeitsaufwand bedeuten. Unklar ist hierbei auch, ob durch eine mögliche Anpassung der Sicherheitsanforderungen bereits durchgeführte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen der vorangegangenen Auswahlphasen hinsichtlich der Veränderungen neu zu beurteilen sind.

#### Schlussfolgerung

Abwägungen oder vergleichende Bewertungen werden im VfS 18-2 nicht durchgeführt. Die Ergebnisse der umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind jedoch relevant zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im VfS 18-5.

### **A.6.3      Verfahrensschritt 18-3**

#### Sachstand

Gemäß § 18 Abs. 1 Satz 2 StandAG wird gefordert, dass die BGE zusätzlich einen UVP-Bericht nach § 16 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung UVPG /BUN 90/ erstellt. Nach § 16 UVPG beinhaltet der UVP-Bericht mindestens folgende Themenfelder:

- eine Beschreibung des Vorhabens mit Angaben zum Standort, zur Art, zum Umfang und zur Ausgestaltung, zur Größe und zu anderen wesentlichen Merkmalen des Vorhabens,
- eine Beschreibung der Umwelt und ihrer Bestandteile im Einwirkungsbereich des Vorhabens,

- eine Beschreibung der Merkmale des Vorhabens und des Standorts, mit denen das Auftreten erheblicher nachteiliger Umweltauswirkungen des Vorhabens ausgeschlossen, vermindert oder ausgeglichen werden soll,
- eine Beschreibung der geplanten Maßnahmen, mit denen das Auftreten erheblicher nachteiliger Umweltauswirkungen des Vorhabens ausgeschlossen, vermindert oder ausgeglichen werden soll, sowie eine Beschreibung geplanter Ersatzmaßnahmen,
- eine Beschreibung der zu erwartenden erheblichen Umweltauswirkungen des Vorhabens,
- eine Beschreibung der vernünftigen Alternativen, die für das Vorhaben und seine spezifischen Merkmale relevant und von der BGE geprüft worden sind, und die Angabe der wesentlichen Gründe für die getroffene Wahl unter Berücksichtigung der jeweiligen Umweltauswirkungen sowie
- eine allgemein verständliche, nichttechnische Zusammenfassung des UVP-Bereichs.

#### Herausforderung

In diesem Verfahrensschritt werden keine besonderen Herausforderungen erwartet.

#### Schlussfolgerung

In diesem Verfahrensschritt werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

### **A.6.4      Verfahrensschritt 18-4**

#### Sachstand

Gemäß § 18 Abs. 2 Satz 1 StandAG wendet die BGE die Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 23 StandAG erneut und die in VfS 16-8 erstellten Prüfkriterien auf der Grundlage der Ergebnisse der untertägigen Erkundungsergebnisse und der umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen an.

Funktional handelt es sich bei den Prüfkriterien für die Bewertung der untertägigen Erkundungsergebnisse nach § 16 Abs. 2, § 17 Abs. 4 und § 18 Abs. 2 StandAG /STA 17/



um standortspezifische Ausschlusskriterien (S. 298, 335ff in /KOM 16/), die vom Vorhabenträger BGE vorzuschlagen und vom BfE festzulegen sind. Die Charakteristika der Prüfkriterien lassen sich nach /KOM 16/ wie folgt zusammenfassen:

- standortbezogene Ableitung und Festlegung auf Grundlage der Ergebnisse der übertägigen Erkundung und weiterentwickelter vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen entsprechend § 18 des StandAG,
- Einbindung der Öffentlichkeit in die Ableitung der Kriterien sowie in die Bewertung der Ergebnisse ihrer Anwendung,
- Anwendung auf die Ergebnisse untertägiger Erkundung,
- Kriterienableitung und -festlegung vor Beginn der untertägigen Erkundung,
- inhaltliche Beschränkung der Prüfkriterien auf nach vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen wichtige sicherheitsrelevante, zuverlässig erhebbare und beurteilbare Sachverhalte,
- zeitnahe Anwendung im Rahmen der untertägigen Erkundung,
- Ausschluss des betroffenen Erkundungsbereichs oder bei fehlender räumlicher Erkundungsreserve des Standortes insgesamt bei Nichterfüllung bereits eines Prüfkriteriums.

#### Herausforderung

Abschließend ist festzulegen, wie anstelle der Mindestanforderungen und Abwägungskriterien bei Standorten, bei denen kein ewG ausgewiesen werden kann, der rechnerische Nachweis des Einschlussvermögens der technischen und geotechnischen Barrieren ermittelt werden soll. Nach § 23 Abs. 4 Satz 2 StandAG ist dieser Nachweis spätestens in der Phase 3 im Zusammenhang mit § 18 Abs. 3 StandAG zu führen.

#### Schlussfolgerung

In diesem Verfahrensschritt werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

#### **A.6.5      Verfahrensschritt 18-5**

##### Sachstand

Gemäß § 18 Abs. 2 Satz 1 StandAG werden von der BGE durch die in VfS 18-4 ermittelten Gebiete, durch die erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG, auf der Grundlage der Ergebnisse der untertägigen Erkundungen und der umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, günstige Standorte ermittelt.

##### Herausforderung

Mit Bezug zum VfS 16-5, sollten in diesem Verfahrensschritt alle Daten zur Anwendung der geow. Abwägungskriterien vorliegen. Die Herausforderungen beziehen sich deshalb im Wesentlichen auf methodische Herausforderungen, welche im Kapitel 3 behandelt werden (siehe auch Kap. 2.3.1.2).

##### Schlussfolgerung

In diesem Verfahrensschritt werden Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt, um geeignete Standorte gemäß § 18 Abs. 3 StandAG zu ermitteln.

#### **A.6.6      Verfahrensschritt 18-6**

##### Sachstand

Nach § 18 Abs. 2 Satz 2 StandAG sind zum letzten Mal die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nach den Vorgaben in § 25 StandAG anzuwenden.

##### Herausforderung

Nach § 18 Abs. 2 Satz 1 StandAG sollen für die Identifizierung geeigneter Standorte die Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24 StandAG sowie die Prüfkriterien angewendet werden. Es ist dadurch ebenso wie beim VfS 16-6 unklar wie die Ergebnisse der Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien einzuordnen sind, speziell ob bzw. mit welchem Gewicht sie in die Ausweisung geeigneter Standorte durch

die BGE in VfS 18-7 eingehen. Im Übrigen gelten die Anmerkungen zu VfS 14-3 sinnesentsprechend.

Im Gegensatz zur Phase 1 (VfS 14-3) können die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien hier nur zum Vergleich von sicherheitstechnisch gleichwertigen Standorten herangezogen werden. Eine weitere Einengung von großen, potenziell für ein Endlager geeignete Untersuchungsräume findet in der Phase 3 nicht statt (siehe auch Kap. 2.3.1.2).

#### **A.6.7      Verfahrensschritt 18-7**

##### Sachstand

Gemäß § 18 Abs. 3 Satz 2 StandAG erarbeitet die BGE einen Vorschlag für (mindestens zwei, s. §19 Abs. 1 Satz 1 StandAG) geeignete Standorte auf der Grundlage der vergleichenden Bewertung der zu betrachtenden Standorte aus VfS 18-5 bzw. 18-6.

##### Herausforderung

In diesem Verfahrensschritt werden wenige konkrete Standorte direkt miteinander verglichen. Der Vergleich hat keinen generischen Charakter mehr. Nicht abzuschätzen ist die Menge an Standorten, welche untersucht werden (siehe auch Kap. 2.3.1.2).

##### Schlussfolgerung

In diesem Verfahrensschritt erfolgt eine durch wechselseitige Abwägung vergleichende Bewertung der Standorte. Somit werden Abwägungen und vergleichende Bewertungen durchgeführt.

#### **A.6.8      Verfahrensschritt 18-8**

##### Sachstand

Gemäß § 18 Abs. 3 Satz 1 StandAG wird von der BGE der in VfS 18-7 erarbeitete Standortvorschlag mit Begründung an das BfE übermittelt. Die Begründung beinhaltet eine vergleichende Bewertung der zu betrachtenden Standorte.

### Herausforderung

In diesem Verfahrensschritt werden keine verfahrenstechnischen Herausforderungen erwartet.

### Schlussfolgerung

Die Übermittlung der oben genannten Unterlagen an das BfE stellt einen Meilenstein im § 18 StandAG dar. Abwägungen oder vergleichende Bewertungen werden hier nicht durchgeführt.

## **A.6.9      Verfahrensschritt 18-9**

### Sachstand

Gemäß § 18 Abs. 3 Satz 3 StandAG führt das BfE standortspezifische Umweltverträglichkeitsprüfungen durch. Entsprechend den §§ 17 bis 21 und 54 bis 57 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung /BUN 90/ auf Grundlage der von BGE vorgelegten Unterlagen.

### Herausforderung

Es handelt sich um ein gesetzlich geregeltes, vielfach bereits angewendetes Verfahren. Es werden deshalb keine besonderen Herausforderungen erwartet.

### Schlussfolgerung

In diesem Verfahrensschritt werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

## **A.7      Phase 3B (§ 19 StandAG)**

Im § 19 StandAG wird der Standortvorschlag der BGE durch das BfE geprüft und letztendlich an die Bundesregierung weitergeleitet.

## **A.7.1      **Verfahrensschritt 19-1****

### Sachstand

Nach § 7 Abs. 1 StandAG gibt das BfE der Öffentlichkeit und den Trägern öffentlicher Belange nach Übermittlung des jeweiligen Vorschlags sowie im Fall einer Nachprüfung nach abgeschlossenem Nachprüfverfahren nach § 10 Abs. 5 Gelegenheit zur Stellungnahme zu den Vorschlägen sowie den dazu jeweils vorliegenden Berichten und Unterlagen.

Gemäß § 7 Abs. 3 StandAG hat das BfE in den betroffenen Gebieten nach Abschluss des jeweiligen Stellungnahmeverfahrens einen Erörterungstermin zu den Vorschlägen sowie den dazu jeweils vorliegenden Berichten und Unterlagen auf Grundlage der ausgewerteten Stellungnahmen durchführen. Nach § 7 Abs. 1 sind die Stellungnahmen bei den weiteren Verfahrensschritten zu berücksichtigen. Die Auswertung der Stellungnahmen erfolgt durch das BfE und der BGE.

### Herausforderung

Da sich in Phase 3 nur lokale Standorte in der engeren Auswahl befinden, wird sich der Umfang der zu beteiligenden Bevölkerung weiter reduzieren. Da nun potentielle Standorte benannt werden, sind möglicherweise Änderungen in der Wahrnehmung der Bevölkerung zu erwarten. Wie sich dieses auf die Öffentlichkeitsbeteiligung auswirkt ist unklar.

### Schlussfolgerung

Im Verfahren zur Öffentlichkeitsbeteiligung sind keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen vorgesehen. Inwieweit die Ergebnisse der Öffentlichkeitsbeteiligung die Standortentscheidung beeinflussen können (z. B. im VfS 19-3), kann hier nicht abgeschätzt werden.

## **A.7.2      Verfahrensschritt 19-2**

### Sachstand

Gemäß § 19 Abs. 1 Satz 1 StandAG hat das BfE den Standortvorschlag der BGE nach § 18 Abs. 2 StandAG zu prüfen. Darüber hinaus ist der BGE die Gelegenheit zur Stellungnahme einzuräumen, wenn das BfE von dem Vorschlag abweichen will.

Gemäß § 19 Abs. 2 Satz 2 StandAG bewertet das BfE, welcher der Standorte derjenige mit der bestmöglichen Sicherheit ist. Die Standortentscheidung erfolgt unter Berücksichtigung einer zusammenfassenden Darstellung und Bewertung der Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, der Umweltauswirkungen entsprechend den §§ 24 und 25 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung und eine Begründung der Raumverträglichkeit, sowie die Ergebnisse der Prüfung in VfS 19-2.

### Herausforderung

Das BfE muss alle Arbeiten der BGE nachvollziehen. Der Umfang, der sich aus möglichen Nachprüfverfahren ergibt ist ungewiss, wodurch auch der Prüfaufwand für das BfE als auch der mögliche Überarbeitungsbedarf für die BGE nicht konkret eingeschätzt werden kann.

Im Rahmen der Prüfaufgaben des BfE ist es möglich, dass eigene Abwägungen und/oder Vergleiche erfolgen, um die Plausibilität, Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses zu prüfen. Es ist zu erwarten, dass die Herausforderungen und Möglichkeiten der methodischen Ansätze denen entsprechen, wie sie in den jeweils entsprechenden Verfahrensschritten der BGE durchzuführen sind. Daher erfolgt keine separate Betrachtung der Herausforderungen für den betreffenden Verfahrensschritt.

Grundsätzlich können aus der Öffentlichkeitsbeteiligung Einwendungen kommen, welche Seitens des BfE unter Umständen zu Abwägungen und/oder zu vergleichenden Bewertungen führen können. Diese Herausforderungen sind jedoch nicht Gegenstand der Aufgabenstellung dieses Vorhabens und werden deshalb nicht weiter untersucht.

### Schlussfolgerung

Analog zum VfS 17-2 prüft das BfE den Vorschlag der BGE nach § 18 Abs. 2 StandAG. Unter Umständen kann das BfE eigene Abwägungen und/oder Vergleiche durchführen, um die Plausibilität, Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Vorschlages der BGE zu prüfen. Es ist davon auszugehen, dass die Herausforderungen einer Prüfung denen entsprechen, wie sie in den jeweils entsprechenden Verfahrensschritten der BGE durchzuführen sind.

### **A.7.3      Verfahrensschritt 19-3**

#### Sachstand

Gemäß § 19 Abs. 2 Satz 3 StandAG muss das BfE bevor es den Vorschlag nach § 18 Abs. 2 StandAG an das BMU übermittelt, durch Bescheid feststellen, ob das bisherige Standortauswahlverfahren nach den Regelungen des StandAG durchgeführt wurde und der Auswahlvorschlag diesen entspricht. Der Bescheid wird veröffentlicht.

#### Herausforderung

Analog zum VfS 17-4 können gegen den Bescheid nach Umwelt-Rechtsbehelfsgesetz Rechtsbehelfe eingelegt werden. Der Umfang, der sich aus möglichen Nachprüfverfahren ergibt ist ungewiss, wodurch auch der Prüfaufwand für das BfE als auch der mögliche Überarbeitungsbedarf für die BGE nicht konkret eingeschätzt werden kann.

#### Schlussfolgerung

Für die Erstellung des Bescheides, ob das bisherige Standortauswahlverfahren nach den Regelungen des StandAG durchgeführt wurde, werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

### **A.7.4      Verfahrensschritt 19-4**

#### Sachstand

Gemäß § 19 Abs. 1, Satz 3 und 4 StandAG erarbeitet das BfE einen Standortvorschlag auf der Grundlage der Ergebnisse aus VfS 19-2.

### Herausforderung

Es werden in diesem Verfahrensschritt keine relevanten Herausforderungen erwartet.

### Schlussfolgerung

Es werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

## **A.7.5      Verfahrensschritt 19-5**

### Sachstand

Gemäß § 19 Abs. 2 Satz 1 StandAG übermittelt das BfE den Standortvorschlag (nach § 18 Abs. 2 StandAG) des BGE, einschließlich aller hierfür erforderlichen Unterlagen an das BMU. Der Vorschlag kann erst übermittelt werden, wenn gegen den Bescheid nach § 19 Abs. 2 Satz 3 StandAG keine Rechtsbehelfe mehr eingelegt werden können oder das Bundesverwaltungsgericht über den Bescheid rechtskräftig entschieden hat.

Das BfE fügt dem Standortvorschlag die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens, einschließlich der Beratungsergebnisse des Nationalen Begleitgremiums und eine begründete Empfehlung zum Vorschlag der BGE hinzu.

### Herausforderung

Es werden in diesem Verfahrensschritt keine relevanten Herausforderungen erwartet.

### Schlussfolgerung

Dieser Verfahrensschritt stellt einen Meilenstein dar. Es werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

## **A.8      Phase 3C (§ 20)**

Der § 20 StandAG legt den Verfahrensablauf zur endgültigen Standortentscheidung durch die Bundesregierung in ein Bundesgesetz fest.



### **A.8.1      Verfahrensschritt 20-1**

#### Sachstand

Gemäß § 20 Abs. 1 Satz 1 StandAG legt das BMU dem Deutschen Bundestag und dem Bundesrat den Standortvorschlag in Form eines Gesetzentwurfs vor. Der Vorschlag enthält einen zusammenfassenden Bericht über die Ergebnisse des Standortauswahlverfahrens und die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens einschließlich der Beratungsergebnisse des Nationalen Begleitgremiums.

#### Herausforderung

Es werden keine besonderen Herausforderungen erwartet.

#### Schlussfolgerung

In diesem Verfahrensschritt wird der Standortvorschlag an die Regierung übermittelt. Es werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

### **A.8.2      Verfahrensschritt 20-2**

#### Sachstand

Gemäß § 20 Abs. 2 StandAG wird über die Annahme des Standortvorschlags durch Bundesgesetz entschieden.

#### Herausforderung

Der Bundestag und Bundesrat müssen über den Standortvorschlag beraten. Es stellen sich die Fragen, ob hierdurch abweichende Beratungsergebnisse resultieren können oder auch die Möglichkeit einer Rückweisung des Standortvorschlages denkbar ist.

#### Schlussfolgerung

Für die Beratungen zum Standortvorschlag sind insbesondere die Ergebnisse des Standortauswahlverfahrens, des Beteiligungsverfahrens und der Beratungsergebnisse

des Nationalen Begleitgremiums entscheidend. Es werden keine Nachprüfungen durch Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

### **A.8.3      Verfahrensschritt 20-3**

#### Sachstand

Gemäß § 20 Abs. 3 StandAG ist auf der Grundlage der Entscheidung in VfS 20-2 bzw. nach § 20 Abs. 2 StandAG die Eignung des Vorhabens im Genehmigungsverfahren nach § 9b Abs. 1a des Atomgesetzes für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers verbindlich und vollumfänglich zu prüfen.

#### Herausforderung

Es werden die allgemeinen Herausforderungen eines Genehmigungsverfahrens erwartet.

#### Schlussfolgerung

Im Genehmigungsverfahren werden keine Abwägungen oder vergleichende Bewertungen durchgeführt.

## **Verteiler zum fachlichen Abschlussbericht im Vorhaben 4718F13001**

### **GRS-A-Bericht 3974**

Berichtstitel:

„MABeSt - Methoden für sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertungen im Standortauswahlverfahren“

#### **Druckexemplare:**

##### **Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)**

Fachgebiet FA 2  
Frau Dr. Ute Maurer-Rurack 5 x

##### **Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH**

Bibliothek 1 x  
Projektleiter/Autoren (FRI, FAP, BEU, BGU) 4 x

---

**Gesamt** 10 x

#### **PDF-Version:**

##### **Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)**

Fachgebiet FA 2  
Frau Dr. Ute Maurer-Rurack (ute.maurer-rurack@bfe.bund.de) 1 x

##### **Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)**

Fachgebiet FA 1 ([FA1@bfe.bund.de](mailto:FA1@bfe.bund.de)) 1 x

##### **Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH**

Geschäftsführer (STJ, SUW) 2 x  
Bereichsleiter (KUS, FIL) 2 x

Projektleiter/Autoren (KES, FAP, BEU, BGU) 4 x

Projektcontrolling (HNC) 1 x  
TECDO (WEV) 1 x

---

**Gesamt** 12 x



