

Can multi-criteria analysis models support the site selection for a repository for heat-generating waste?

The decision for or against a potential site for a nuclear waste repository is highly complex and requires decision-makers to consider multiple assessment criteria. The complexity of each site and its characteristics, and the differing opinions among members of the public and advocacy groups mean that conflicts of interest are likely to arise. In this paper, the author suggests that multi-criteria analysis models could be used to pro-

vide methodological support during the selection process. The models can map these types of decision situations and suggest coherent solutions with relatively little formal effort. They allow users to compare different options simultaneously and ensure that their decision-making is conscious rather than arbitrary.

Können multikriterielle Analysemodelle die Standortauswahl für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle unterstützen?

Die Entscheidung für oder gegen einen potentiellen Endlagerstandort erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl von Bewertungskriterien. Aufgrund der Komplexität der zu vergleichenden Standorte und deren Eigenschaften sowie der unterschiedlichen Standpunkte der Öffentlichkeit/Interessensgruppen ist es wahrscheinlich, dass es zu Zielkonflikten kommen wird. Um das Verfahren der Standortauswahl methodisch zu unterstützen, bietet sich aus Sicht der Autorin der Einsatz sogenannter multikriteri-

eller Analysemodelle an, die derartige Entscheidungssituationen mit vergleichsweise geringem formalem Aufwand abbilden und nachvollziehbare Lösungen vorschlagen. Multikriterielle Analysemodelle ermöglichen, verschiedene Alternativen simultan miteinander zu vergleichen und die Entscheidungsfindung aus dem Bereich der Willkürlichkeit in den der bewussten Entscheidung zu überführen.

1 Introduction

With the introduction of its Repository Site Selection Act¹ (Standortauswahlgesetz) (1) in summer 2013, Germany relaunched its efforts to find a site for a repository for heat-generating waste. The earlier process that led to the selection of the Gorleben site attracted a great deal of criticism. The main complaints were that the decision lacked transparency and sufficient public involvement, that it was politically driven and made under (time) pressure, and that the geoscientific aspects played a subordinate role. This does not, however, necessarily mean that Gorleben is

¹ Act on identifying and selecting a site for a repository for heat-generating nuclear waste
Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle

1 Einleitung

Mit dem Standortauswahlgesetz¹ (StandAG) (1) wurde im Sommer 2013 die Suche nach einem Standort für die Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle in Deutschland neu gestartet. Wesentliche Kritikpunkte des bisherigen Vorgehens zur Auswahl des Standorts Gorleben waren zum einen die mangelnde Transparenz und Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Standortauswahl und zum anderen der politische Wille und (Zeit-)Druck, unter dem die Entscheidung für Gorleben gefällt wurde. Geowissenschaftliche Aspekte spielten eine untergeordnete Rolle. Allerdings muss dies nicht zwangsläufig bedeuten, dass Gorleben als Standort für die Errichtung eines Endlagers ungeeignet ist. Das kann aktuell noch nicht abschließend beurteilt werden, da die „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG) (2) zwar abgeschlossen ist, aber weder dem ursprünglich geplanten internationalen Peer Review

an unsuitable site for a repository. It is impossible to definitively assess the situation at the moment because although the preliminary safety analysis for Gorleben (2) has been completed, it has not undergone the international peer review that was originally planned, and the additional investigations arising from it have not been carried out. Research into the Gorleben salt dome was put on hold in 2014.

The aim, or rather the need to find a site for a nuclear waste repository has been an issue in Germany since it began using nuclear energy for civilian purposes at the end of the 1950s. The German environment ministry set up a repository task force (Arbeitskreis Endlager) in 1999. In December 2002, the group published its final report entitled A Process for Selecting Repository Sites (Auswahlverfahren für Endlagerstandorte) (3).

The task force's aim was to develop a coherent process for identifying and selecting sites that could be used as repositories for all types of nuclear waste. It produced a list of geoscientific exclusion criteria, which included large-scale vertical movements and seismic and/or volcanic activity, and a list of minimum geoscientific requirements. These were used to identify regions in Germany that, from a geoscientific perspective, would in principle be suitable for building a repository. The task force also set out social criteria and described a process for involving the public in the selection process. It stressed that, before a selection process could be implemented, the process itself and the underlying criteria must be agreed politically and socially, and that efforts should be made to reach a political consensus as broad as possible. The task force said public participation should go beyond passing on information and discussing results, and that involving the public in opinion-forming and decision-making processes was crucial. In the years since the report was published, however, neither the report nor (where relevant) the calls for change that resulted from it were ever discussed. Policymakers did not pursue the task force's proposals any further.

Germany's recent Repository Site Selection Act received cross-party and near-unanimous approval in the German Bundestag and Bundesrat. It will now build on that broad political consensus by implementing a science-based and transparent approach to select a site for a repository for heat-generating waste. A commission has been appointed to prepare the selection process. Its tasks include proposing the basis for decision-making (assessment criterias), requirements for organising and conducting the process, requirements concerning participation and information, and requirements designed to guarantee transparency. Articles 5, 9 and 10 of the act stipulate that the commission's work must be public and that the public must be involved in the selection process.

The process will begin by identifying areas that will undergo surface exploration, and then move on to selecting sites for underground exploration. After a final site comparison, a site will be proposed and a decision made. The act does not say how these decisions should be made or what methods should be used to help reach them.

The decision for or against a potential repository site is highly complex and requires decision-makers to consider multiple assessment criteria. Given the complexity of each site and its characteristics, and the differing opinions among members of the

unterzogen wurde noch die daraus resultierenden weiteren Untersuchungen durchgeführt wurden. Die weitere Erkundung des Salzstocks Gorleben wurde 2014 vorerst eingestellt.

Das Ziel bzw. die Notwendigkeit, einen Standort für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zu finden, besteht seit dem Beginn der zivilen Nutzung der Atomenergie in Deutschland Ende der fünfziger Jahre des letzten Jahrhunderts. Zuletzt legte der 1999 vom Bundesumweltministerium (BMU) eingesetzte Arbeitskreis Endlager (AkEnd) im Dezember 2002 seinen Abschlussbericht „Auswahlverfahren für Endlagerstandorte“ vor (3).

Ziel des AkEnd war zum einen, ein nachvollziehbares Verfahren für die Standortsuche und -auswahl für die Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle zu entwickeln. Im Ergebnis wurden zunächst geowissenschaftliche Ausschlusskriterien, wie beispielsweise großräumige Vertikalbewegungen oder seismische und/oder vulkanische Aktivität als auch geowissenschaftliche Mindestanforderungen, benannt. Diese dienen zur Lokalisierung von möglichen Regionen in Deutschland, in denen die Errichtung eines Endlagers aus geowissenschaftlicher Sicht grundsätzlich möglich wäre. Zum anderen hat der AkEnd sozialwissenschaftliche Kriterien und ein Verfahren zur Beteiligung der Öffentlichkeit im Auswahlverfahren beschrieben. Es wird betont, dass für die Durchführung eines Standortauswahlverfahrens zunächst die politische und gesellschaftliche Festlegung des Auswahlverfahrens und der zugrunde liegenden Kriterien erfolgen muss, wobei ein möglichst breiter politischer Konsens anzustreben ist. Im Anschluss ist das gemeinschaftlich festgelegte Auswahlverfahren durchzuführen. Der AkEnd betont, dass die Öffentlichkeitsbeteiligung über die Weitergabe von Informationen und die Diskussion von Ergebnissen hinausgehen muss und hält die Einbeziehung der Öffentlichkeit auch in die Meinungs- und Willensbildung für unerlässlich. Eine Diskussion des Berichts und ggf. daraus resultierende Änderungswünsche in den Folgejahren blieben jedoch aus. Der Vorschlag des AkEnd wurde politisch nicht weiter verfolgt.

Das von Bundestag und Bundesrat parteiübergreifend und nahezu einstimmig verabschiedete StandAG hat nun – aufbauend auf diesem breiten politischen Konsens – zum Ziel, mit Hilfe eines wissenschaftsbasierten und transparenten Verfahrens einen Standort für die Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle zu finden. Zur Vorbereitung des Standortauswahlverfahrens ist eine Kommission eingesetzt, die u.a. Vorschläge für Entscheidungsgrundlagen (Bewertungskriterien), Anforderungen an die Organisation und das Verfahren des Auswahlprozesses und Anforderungen an die Beteiligung und Information sowie zur Sicherstellung der Transparenz erarbeiten soll. Die Öffentlichkeit der Kommissionsarbeit sowie die Beteiligung der Öffentlichkeit in dem Auswahlverfahren sind in den §§ 5, 9 und 10 des Gesetzes festgeschrieben.

Im Zuge des Verfahrens sind zunächst Standortregionen für die übertägige Erkundung auszuwählen. Es folgen Standorte für die untertägige Erkundung, ein abschließender Standortvergleich und schlussendlich ein Standortvorschlag sowie die Standortentscheidung. Aussagen, wie diese Entscheidungen getroffen werden sollen bzw. zur methodischen Vorgehensweise zur Entscheidungsunterstützung, sind nicht enthalten.

Die Entscheidung für oder gegen einen potentiellen Endlagerstandort ist hochkomplex und erfordert die Berücksichtigung

public and advocacy groups, it is safe to assume that conflicts of interest will arise. Multi-criteria analysis models (MCA)² could be used to provide methodological support during the selection process. They can map these kinds of decision situations and suggest coherent solutions with relatively little formal effort. The models can be applied to problems that have the following attributes (4):

- The subject of the decision involves multiple goals.
- Conflicts of interest routinely arise.
- The goals are measured in different units that cannot be compared.
- The main aim of the analysis is to select the best course of action.

If there are several competing goals, the decision-maker has to weigh up the pros and cons of each goal for each course of action. Multi-criteria analysis models allow users to compare different options simultaneously and ensure that their decision-making is conscious rather than arbitrary (5).

2 Multi-criteria analysis model for supporting decisions

The method for multi-criteria analysis models can always be divided into two groups. With the method of the multi-criteria decision making, it is implicitly assumed that the results no longer require a selection by the person deciding. The results from the assessment of the individual criterion are aggregated and thus result in a single series of alternative activities. In addition to the preliminary selection of the alternative activities, the participation of the person deciding is also necessary for the selection of the criterion and their weighting.

The procedures for supporting the decision on the other hand do not put together the criteria-related assessments to an individual series, but are based on the comparison of the alternatives in pairs. Expressed abstractly, these procedures reduce the complexity of the decision situation and help decision makers with the preparation of available information. Whereas in a simple decision situation, amongst others, everyday knowledge is sufficient for a good decision, in a complex situation, such as the site decision procedure for example, a method is required for simplification. On the one hand, this means a loss of information and on the other hand, leads to an explicit or implicit preliminary decision. As an intensive reduction of complexities entails the risk of incorrect decisions, the goal of all persons participating must be to find the appropriate compromise for the selection of the procedure for the decision situation. The required degree of participation of the decision makers and those affected in the respective situation must also be determined in order to be able to select a suitable procedure with regard to this (6).

einer Vielzahl von Bewertungskriterien. Aufgrund der Komplexität der zu vergleichenden Standorte und deren Eigenschaften sowie der unterschiedlichen Standpunkte der Öffentlichkeit/ Interessensgruppen ist davon auszugehen, dass es zu Zielkonflikten kommen wird. Um das Verfahren der Standortauswahl methodisch zu unterstützen, bietet sich der Einsatz sogenannter multikriterieller Analysemodelle (MKA)² an, die derartige Entscheidungssituationen mit vergleichsweise geringem formalem Aufwand abbilden und nachvollziehbare Lösungen vorschlagen. Als charakteristische Merkmale von Problemstellungen, auf die multikriterielle Analysemodelle angewendet werden können, gelten (4):

- Der Entscheidungsgegenstand zeichnet sich dadurch aus, dass mehrere Ziele bestehen.
- Üblicherweise bestehen Zielkonflikte.
- Die Ziele werden in unterschiedlichen, unvergleichbaren Einheiten gemessen.
- Das Hauptanliegen der Analyse besteht in der Auswahl der besten Handlungsalternative.

Konkurrieren mehrere Ziele miteinander, muss der Entscheider für jede Alternative die Vor- und Nachteile der verschiedenen Zielgrößen gegeneinander abwägen. Multikriterielle Analysemodelle ermöglichen, verschiedene Alternativen simultan miteinander zu vergleichen und die Entscheidungsfindung aus dem Bereich der Willkürlichkeit in den der bewussten Entscheidung zu überführen (5).

2 Multikriterielle Analysemodelle zur Entscheidungsunterstützung

Die Verfahren der multikriteriellen Analysemodelle lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen. Bei den Verfahren der multikriteriellen Entscheidungsfindung wird implizit davon ausgegangen, dass die Ergebnisse keiner Auswahl durch die Entscheider mehr bedürfen. Die Ergebnisse der Bewertung der Einzelkriterien werden aggregiert und ergeben so eine einzige Rangfolge der Handlungsalternativen. Eine Beteiligung der Entscheidungsträger ist außer bei der Vorauswahl der Handlungsalternativen auch bei der Wahl der Kriterien und deren Gewichtung notwendig.

Die Verfahren zur Entscheidungsunterstützung hingegen ziehen die kriterienbezogenen Bewertungen nicht zu einer einzigen Rangfolge zusammen, sondern basieren auf dem paarweisen Vergleich der Alternativen. Abstrakt ausgedrückt, reduzieren diese Verfahren die Komplexität der Entscheidungssituation und helfen den Entscheidungsträgern bei der Aufbereitung der verfügbaren Informationen. Während in einer einfachen Entscheidungssituation u. U. Alltagswissen für eine gute Entscheidung ausreicht, wird in einer komplexen Situation, wie beispielsweise dem Standortauswahlverfahren, ein Verfahren zur Vereinfachung

² Depending on the type of solution space, multi-criteria analysis models are classified as either multi-attribute decisions (in the case of discrete solution spaces) or as multi-objective decisions (in the case of stable solution spaces). Before a site for a repository can be selected, a pre-determined number of sites must be compared. It therefore makes sense to use a multi-attribute process, which involves choosing one or more courses of action.

Multikriterielle Analysemodelle werden in Abhängigkeit von der Art des Lösungsraums in Multi-Attribut-Entscheidungen (MADM) bei diskreten und in Multi-Objective-Entscheidungen (MODM) bei stetigen Lösungsräumen unterschieden. Zur Auswahl eines Endlagerstandorts ist es erforderlich, eine vorgegebene Anzahl an Standorten zu vergleichen, so dass der Einsatz von MADM-Verfahren sinnvoll ist, bei denen eine oder mehrere Handlungsalternativen ausgewählt werden.

In order to bring about decisions equally methodically in the individual steps of the procedure in the course of the implementation of the “Repository Site Selection Act”, and to design these comprehensibly for all persons involved, we recommend the use of the Hasse Diagram Technique (HDT). This is explained in the following.

3 The Hasse diagram technique

This order theoretical procedure³ operates at first without any weighting. The preference relation that describes as to how far an action alternative – in this specific case, a site – is preferred compared to another with regard to certain criterion is solely analysed by means of a scientifically-based decision matrix, for example, on the basis of measurement values or model results (7). In order to initially avoid a prioritisation, those alternatives are considered as not comparable, which are assessed as conflicting from two individual criterion. A common ranking that is as complete as possible is determined from the rankings that result for the different criterion and is represented in graphs (6).

The problem of comparing multiple characterised objects is originated from a generalised evaluation group in the process. The number of alternatives is designated by A, the alternatives by a_1, a_2, \dots, a_n . The assessment criterion q_1, q_2, \dots, q_n are summarised in the information basis IB. Finally, a so-called tuple⁴ is defined, $q(a) = (q_1(a), q_2(a), \dots, q_n(a))$, that characterises an alternative a according to the information basis. This allows the core equation of the HDT to be formulated as follows:

$$a_1, a_2 \in A \quad a_1 \leq a_2: \Leftrightarrow p(a_1) \leq p(a_2)$$

$$p(a_1) \leq p(a_2): \Leftrightarrow p_i(a_1) \leq p_i(a_2) \text{ for all } i=1, \dots, n$$

An important point in the equation above is the requirement “for all”, the so-called the “generality principle”. Objects that comply with the generality principle of the \leq -relation are designated as “comparable” and those that cannot be allocated are designated as “incomparable” (7).

The HDT refers to a decision matrix. On the basis of comparing the alternatives in pairs, the Hasse diagram is then prepared as a graphical representation of the decision matrix. Alternatives that can be compared with regard to the assessment criterion are arranged above one-another and linked to one-another using lines. In doing so, the alternatives with worse criteria values are always positioned above those with better values. Alternatives that cannot be compared with one-another are not linked using lines. Reasons for this are criterion pairs whose values act contrary. The visual analysis of the diagram represented in figure 1 results in the following situation:

Two hierarchies are present here. The one comprises the alternatives a_1, a_2, a_4 and a_5 , the other only a_3 . The alternatives a_1, a_2, a_4 and a_5 therefore refer to common features in the data pat-

benötigt. Dies bedeutet einerseits einen Informationsverlust und führt andererseits zu einer expliziten oder impliziten Vorentscheidung. Da eine starke Komplexitätsreduktion die Gefahr von Fehlentscheidungen in sich birgt, muss es das Ziel aller Beteiligten sein, bei der Auswahl des Verfahrens den für die Entscheidungssituation geeigneten Kompromiss zu finden. Zusätzlich muss der erforderliche Grad von Partizipation der Entscheidungsträger und Betroffenen in der Situation ermittelt werden, um auch in dieser Hinsicht ein geeignetes Verfahren zu wählen (6).

Um die im Zuge der Umsetzung des StandAG in den einzelnen Verfahrensschritten zu treffenden Entscheidungen gleichermaßen methodisch herbeizuführen und für alle Beteiligten nachvollziehbar zu gestalten, bietet es sich an, die Hassediagrammtechnik (HDT) einzusetzen. Diese wird nachfolgend näher erläutert.

3 Hassediagrammtechnik

Dieses ordnungstheoretische Verfahren³ kommt zunächst ohne Gewichtung aus. Die Präferenzrelation, welche beschreibt, inwieweit eine Handlungsalternative – im konkreten Fall ein Standort – gegenüber einer anderen im Hinblick auf bestimmte Kriterien bevorzugt wird, wird einzig mittels einer wissenschaftlich fundierten Entscheidungsmatrix analysiert, beispielsweise anhand von Messwerten oder Modellergebnissen (7). Um eine Gewichtung zunächst zu vermeiden, werden diejenigen Alternativen als nicht vergleichbar angesehen, die von zwei Einzelkriterien gegensätzlich beurteilt werden. Aus den Rangordnungen, die sich für die verschiedenen Einzelkriterien ergeben, wird eine gemeinsame, möglichst vollständige Rangordnung ermittelt und graphisch dargestellt (6).

Das Problem des Vergleichens mehrfach charakterisierter Objekte wird dabei auf einen verallgemeinerten Ordnungsbegriff zurückgeführt. Die Menge der Alternativen wird mit A bezeichnet, die Alternativen mit a_1, a_2, \dots, a_n . Die Bewertungskriterien q_1, q_2, \dots, q_n werden in der Informationsbasis IB zusammengefasst. Schließlich wird ein sogenanntes Tupel⁴ definiert, $q(a) = (q_1(a), q_2(a), \dots, q_n(a))$, welches gemäß der Informationsbasis eine Alternative a charakterisiert. Damit kann die Grundgleichung der HDT wie folgt formuliert werden:

$$a_1, a_2 \in A \quad a_1 \leq a_2: \Leftrightarrow p(a_1) \leq p(a_2)$$

$$p(a_1) \leq p(a_2): \Leftrightarrow p_i(a_1) \leq p_i(a_2) \text{ für alle } i=1, \dots, n$$

Wichtig in obiger Gleichung ist die Forderung „für alle“, die „Allgemeinheitsprinzip“ genannt wird. Objekte, die nach dem Allgemeinheitsprinzip der \leq -Relation gehorchen, werden „vergleichbar“ genannt, solche, die sich nicht anordnen lassen „unvergleichbar“ (7).

Die HDT greift auf eine Entscheidungsmatrix zurück. Auf der Basis von paarweisen Vergleichen der Alternativen wird dann das Hassediagramm als graphische Darstellung der Entscheidungsmatrix erstellt. Alternativen, die hinsichtlich aller Bewertungskriterien vergleichbar sind, werden übereinander angeordnet und durch Linien miteinander verbunden. Dabei werden die Alternativen mit den schlechteren Kriterienwerten immer oberhalb derjenigen mit den besseren Werten platziert. Alternativen, die untereinander nicht vergleichbar sind, werden nicht durch Linien verbunden. Gründe hierfür sind Kriterienpaare, deren Werte sich

³ The order theory procedure is a sub-section of mathematics. Die Ordnungstheorie ist ein Teilgebiet der Mathematik.

⁴ The term „tuple“ is a generalisation within a row of pairs, triplets, quadruple, ... Der Begriff „Tupel“ ist eine Verallgemeinerung innerhalb der Reihe Paar, Tripel, Quadrupel, ...

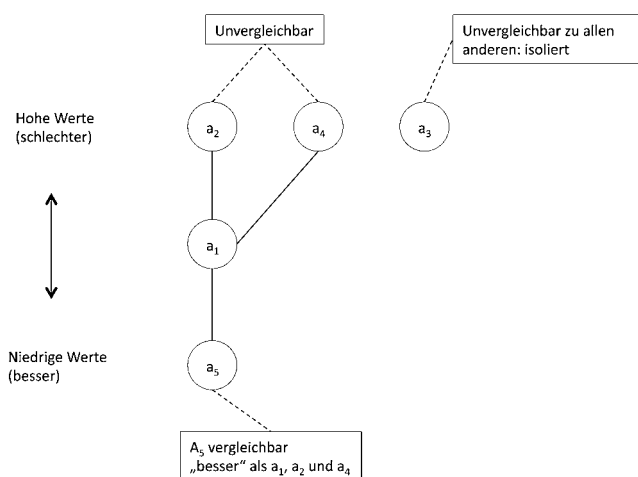


Fig. 1. Schematic representation of a Hasse diagram (8)
Bild 1. Schematische Darstellung eines Hassediagramms (8)

tern. a_3 is an “isolated element” that cannot be compared with other alternatives. a_2 and a_4 are so-called “Maximum”, thus the unfavourable alternatives as they do not refer upwards to neighbouring alternatives. a_5 , on the other hand is a “Minimum” as it does not refer downwards to any neighbouring alternatives and is therefore an alternative for a closer selection. However, it is not possible to determine if a_5 is better than a_3 , as they are incomparable. Further steps are necessary in order to make a decision between these two alternatives (8).

Ascending order of objects document the synchronous increase of the attribute values (weakly monotonic) according to the generality principle. Such partial quantities are designated as chains, e.g., a_5, a_1, a_2 . An anti-chain is, on the other hand, a partial quantity A' of A in such a manner that no element a of this amount A' can be compared with another $a \in A'$, e.g., a_2, a_4 . Anti-chains refer to characteristic expression profiles as, when comparing two alternatives, the expression of the assessment criteria of the one alternative has increased “at the cost” of another alternative if one changes between the alternatives (9).

The HDT therefore permits a better-worse sorting of the alternatives on the basis of the expression of the assessment criterion for each alternative. This sorting is a mere mathematical preparation of the expressions of the assessment criterion and in particular, serves the visualisation of structures (7). Parameters exist for the interpretation of the structures that characterise the objects⁵ either by their position in the Hasse diagram or the Hasse diagram as a whole.

- Quantity of comparability and incomparability: These parameters can be read from a Hasse diagram directly or determined mathematically. The higher the number of comparability, the greater the general rank correlation for the objects. Two objects are called rank correlated when the assessment criteria growing/unchanged implies the growing/unchanged of the other. A high number of incomparabilities implies a high level of possibilities for manipulation when working with weighting (11).
- The stability of an assessment is understood to be the potential for dramatic changes when adding an initially non-specified assessment criterion to the IB, or being left out of

gegenläufig verhalten. Die visuelle Analyse des in Bild 1 dargestellten Diagramms ergibt folgende Situation:

Hier liegen zwei Hierarchien vor. Die eine besteht aus den Alternativen a_1, a_2, a_4 und a_5 , die andere nur aus a_3 . Die Alternativen a_1, a_2, a_4 und a_5 weisen somit Gemeinsamkeiten im Datenmuster auf. a_3 ist ein „isoliertes Element“, das mit den anderen Alternativen nicht vergleichbar ist. Sogenannte „Maximale“, also die ungünstigsten Alternativen sind a_2 und a_4 , da sie keine nach oben benachbarten Alternativen aufweisen. a_5 hingegen ist eine „Minimale“, da sie keine nach unten benachbarte Alternative aufweist und somit eine Alternative zur engeren Auswahl ist. Es ist jedoch keine Aussage möglich, ob a_5 besser ist als a_3 , da sie unvergleichbar sind. Um zwischen diesen beiden Alternativen eine Entscheidung zu treffen, sind weitere Schritte erforderlich (8).

Aufsteigende Folgen von Objekten dokumentieren die synchrone Zunahme der Attributwerte (schwach monoton) nach dem Allgemeinerprinzip. Solche Teilmengen werden Ketten genannt, z. B. a_5, a_1, a_2 . Eine Antikette hingegen ist eine Teilmenge A' von A derart, dass kein Element a dieser Menge A' mit einem anderen $a \in A'$ vergleichbar ist, z. B. a_2, a_4 . Antiketten weisen auf charakteristische Ausprägungsprofile hin, da beim Vergleich zweier Alternativen die Ausprägung des Bewertungskriteriums der einen Alternative „auf Kosten“ einer anderen Alternative zugenommen hat, wenn man zwischen den Alternativen wechselt (9).

Die HDT ermöglicht somit eine Besser-Schlechter-Sortierung der Alternativen auf Basis der für jede Alternative ermittelten Ausprägungen der Bewertungskriterien. Diese Sortierung ist eine rein mathematische Aufbereitung der Ausprägungen der Bewertungskriterien und dient insbesondere der Visualisierung von Strukturen (7). Für die Interpretation der Strukturen existieren Kenngrößen, die entweder die Objekte⁵ gemäß ihrer Stellung im Hassediagramm oder das Hassediagramm als Ganzes charakterisieren.

- Anzahl der Vergleichbarkeiten und Unvergleichbarkeiten: Diese Kenngrößen können aus einem Hassediagramm direkt abgelesen oder rechnerisch ermittelt werden. Je höher die Anzahl der Vergleichbarkeiten ist, desto größer ist die generelle Rangkorrelation der Objekte. Zwei Objekte nennt man rangkorreliert, wenn das Größerwerden/Gleichbleiben des einen Bewertungskriteriums das Größerwerden/Gleichbleiben des anderen impliziert. Eine hohe Anzahl von Unvergleichbarkeiten impliziert ein hohes Maß an Manipulationsmöglichkeiten, wenn mit Gewichtungen gearbeitet wird (11).
- Unter der Stabilität einer Bewertung wird das Potential zu dramatischen Änderungen bei Hinzufügen eines zunächst nicht spezifizierten Bewertungskriteriums zur IB oder Weglassen aus der IB verstanden. Bei genau einem Bewertungskriterium lassen sich die Objekte eindeutig anordnen. Bei Hinzunahme weiterer Bewertungskriterien wird es immer häufiger passieren, dass Unvergleichbarkeiten auftreten, bis zu dem Punkt, an dem keine Vergleichbarkeiten mehr bestehen (10). Eine Stabilität nahe 1 bedeutet, dass die Struktur des Hassediagramms als stabil gegenüber Erweiterungen der IB und instabil gegenüber

⁵ In this specific application case, these would be the individual sites.
Im konkreten Anwendungsfall wären dies die einzelnen Standorte.

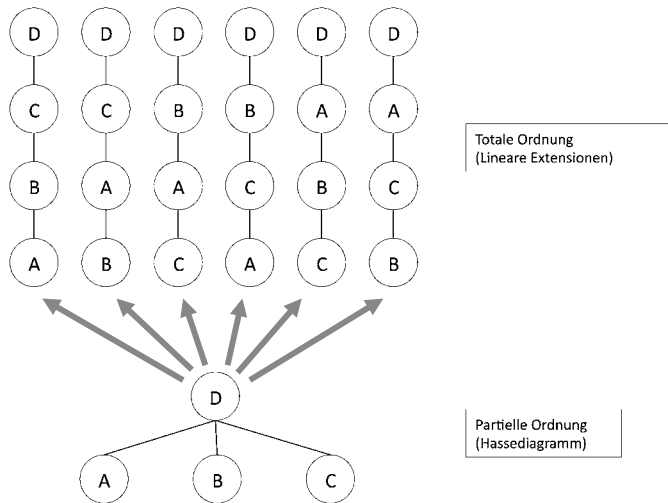


Fig. 2. Linear extensions of a fictive Hasse diagram (changed according to (11))
 Bild 2. Lineare Extensionen eines fiktiven Hassediagramms (verändert nach (11))

the IB. The objects can be clearly allocated with precisely one assessment criterion. When adding further assessment criteria, incomparability will occur more and more frequently until the point when there are no more comparisons (10). A stability factor close to 1 means that the structure of the Hasse diagram is considered as stable with respect to the extension of the IB and unstable with respect to the reduction of the IB. Conversely, a stability factor close to 0 refers to an instability with respect to the extension of the IB or stability with respect to the reduction of the IB (11).

- A linear extension features a total order that illustrates the total number of comparabilities of the partial order. Several linear extensions of one and the same partial order result due to the incomparability in the partial order (12). Linear extensions exist for each finite Hasse diagram. The example in figure 2 has six of them where the allocation of the objects A, B and C can be freely selected; only D has a fixed position as largest element (11). A rough upper estimation of the number of linear extensions results from the faculty of the number of objects. The greater the number of incomparabilities of the partial order, the higher the number of linear extensions. The “average rank” for each object within the partial order can be determined on the basis of the total number of linear extensions. This corresponds to the average of the range that every object can assume within all linear extensions (12). Relative probabilities can be determined for each object that occupies a certain rank. In doing so, the rank of an object is designated as $Rg(x)$. Equivalent objects obtain the same rank. If one now considers the different weighting g_1, g_2, \dots, g_n – e.g., due to different protective goals – the range of the objects change in the total order depending on the weighting. An object is given the maximum rank “Max $Rg(x)$ ” for a certain selection of g_i values and the minimum rank “Min $Rg(x)$ ” for another selection. The greater the difference is between the minimum and maximum rank ($Var(x)$), the greater the influence of the weighting. Moreover, the average rank “Average $Rg(x)$ ” can be determined (13).
- In the scope of the sensitivity analysis, an analysis is carried out as to which assessment criterion is of particular significance for the Hasse diagram, and which criteria have less influence. In doing so, one uses the so-called symmetrical difference between two quantities in order to obtain a quantitative

Reduktionen der IB angesehen wird. Umgekehrt weist eine Stabilität nahe 0 auf Instabilität gegenüber Erweiterungen der IB bzw. Stabilität gegenüber Reduktionen der IB hin (11).

- Eine lineare Extension ist eine totale Ordnung, die alle Vergleichbarkeiten der partiellen Ordnung abbildet. Auf Grund der Unvergleichbarkeiten in der partiellen Ordnung ergeben sich mehrere lineare Extensionen ein und derselben partiellen Ordnung (12). Zu jedem endlichen Hassediagramm existieren lineare Extensionen. Das Beispiel in Bild 2 besitzt davon sechs, wobei die Anordnung der Objekte A, B, C frei gewählt werden kann, lediglich D hat eine fixierte Position als größtes Element (11). Eine grobe obere Abschätzung der Anzahl linearer Extensionen ergibt sich aus der Fakultät der Anzahl an Objekten. Je größer die Zahl an Unvergleichbarkeiten der partiellen Ordnung, desto höher die Anzahl linearer Extensionen. Anhand der Gesamtzahl linearer Extensionen kann der „average rank“ jedes Objektes innerhalb der partiellen Ordnung ermittelt werden. Dieser entspricht dem Durchschnitt der Ränge, die jedes Objekt innerhalb aller linearen Extensionen einnehmen kann (12). Zu jedem Objekt lassen sich die relativen Wahrscheinlichkeiten ermitteln, mit denen es einen bestimmten Rang belegt. Der Rang eines Objekts wird dabei mit $Rg(x)$ bezeichnet. Äquivalente Objekte erhalten den gleichen Rang. Betrachtet man nun unterschiedliche Gewichtungen g_1, g_2, \dots, g_n – z.B. auf Grund unterschiedlicher Schutzziele – so ändern sich die Ränge der Objekte in der totalen Ordnung in Abhängigkeit von den Gewichtungen. Ein Objekt erhält den maximalen Rang „Max $Rg(x)$ “ für eine bestimmte Wahl an g_i -Werten und den minimalen Rang „Min $Rg(x)$ “ für eine andere Wahl. Je größer die Differenz zwischen minimalem und maximalem Rang ($Var(x)$), desto größer ist der Einfluss von Gewichtungen. Darüber hinaus kann der durchschnittliche Rang „Average $Rg(x)$ “ ermittelt werden (13).
- Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird analysiert, welche Bewertungskriterien für das Hassediagramm besonders bedeutsam sind und welche einen geringen Einfluss haben. Man bedient sich hierbei der sogenannten symmetrischen Differenz zwischen zwei Mengen, um einen quantitativen Ausdruck für die Verschiedenheit zweier Objektmengen zu erhalten. Die sogenannte W-Distanz bezieht sich auf zwei Ordnungsideale – O, IB_1 und O, IB_2 – mit derselben Objektmenge, aber unterschiedlichen Informationsbasen. So kann für jedes Objekt die Änderung seines Ideals beim Wechsel

expression for the diversity of two object quantities. The so-called W distance relates to two ideal orders – O , IB_1 and O , IB_2 – with the same object quantity, but different information basis. In this manner, the change of its ideal when changing the information basis, e.g., when omitting an assessment criterion ($IB_1 \rightarrow IB_2$) can be tracked for every object. A measure for the sensitiveness of a ranking is obtained when considering the assessment criterion used (13).

In the current discussion on selecting a new site for the final storage of heat-generating nuclear waste, it is important to achieve a high level of objectivity and transparency and, in particular, avoid the influence of subjective senses of values. Nevertheless, the use of expert knowledge for classification and/or aggregating the assessment criteria can be beneficial. The HDT reacts to the smallest numerical differences that, however, are not necessarily relevant or significant. In order to avoid this, data can be classified so that minor differences which are not relevant in practice and which for example, partially originate from different sampling procedures or are even caused by rounding errors, no longer have an impact on the Hasse diagram. At the same time, differences resulting justifiably due to the knowledge of experts could also be recognised as irrelevant and thus be ruled out. The significance of the individual numeric differences must therefore, where appropriate, be queried from the respective experts or determined by statistical tests. As already mentioned above, it is possible and, if required, also expedient to work with the aggregating and/or weighting within the HDT. Thus, there is an option to aggregate and / or to weight individual assessment criteria in coordination with the stakeholders and/or the experts.

As the HDT requires a high computing power, we recommend the application of the software PyHasse-exp or PyHasse-inet (14). Algorithms of the HDT necessary for creating the Hasse diagram and for calculating the parameters as well as many other functions can be carried out using these tools. It allows interrelationships to be checked between the criterion and objects, and supports their identification. Ultimately, the interpretation of the results is however, the task of experts and can only be carried out reasonably with the respective professional know-how.

4 Conclusion

It is immediately clear that even with the instrument of the Hasse diagram technique presented here, there is no procedure present whose use leads to a clear and optimum decision as a result of a sole analytical approach. It remains necessary to integrate this into a comprehensive process for decision and target setting.

The site selection for a repository for heat-generating waste represents a difficult situation that will still affect many generations after us. Thus, the selection should be carried out on the basis of the greatest possible objective professional knowledge as well as highest possible social consensus. The decision must be made promptly as the generation of today is responsible for the decisions that need to be taken now. The geoscientific and technical as well as sociological aspects are known or are currently being prepared. It is still not clear as to how these aspects, and as a consequence the assessment criteria derived from this should be brought together in order to make a decision for a final re-

der Informationsbasis, z.B. durch Wegfall eines Bewertungskriteriums ($IB_1 \rightarrow IB_2$) verfolgt werden. Es ergibt sich ein Maß für die Sensitivität eines Rankings unter Berücksichtigung der genutzten Bewertungskriterien (13).

In der aktuellen Diskussion um die Suche nach einem Standort für die Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle gilt es, ein Höchstmaß an Objektivität und Transparenz zu erreichen und insbesondere den Einfluss von subjektivem Wertempfinden zu vermeiden. Gleichwohl kann der Einsatz von Expertenwissen zur Klassifizierung und/oder Aggregation der Bewertungskriterien von Nutzen sein. Die HDT reagiert auf kleinste numerische Differenzen, die jedoch nicht unbedingt relevant bzw. signifikant sein müssen. Um dies zu vermeiden, können die Daten klassifiziert werden, damit kleine, in der Praxis nicht relevante Unterschiede, die beispielsweise durch z.T. unterschiedliche Probenahmeverfahren oder gar nur durch Rundungsfehler entstehen, keine Auswirkungen mehr auf das Hassediagramm haben. Gleichzeitig können zu Recht entstandene Unterschiede auf Grund von Expertenwissen als nicht relevant erkannt und somit ausgeschlossen werden. Die Signifikanz der einzelnen numerischen Unterschiede ist daher ggf. bei den jeweiligen Experten zu erfragen oder durch statistische Tests herauszuarbeiten. Wie oben bereits angeklungen, ist es innerhalb der HDT durchaus möglich und ggf. auch zielführend, mit der Aggregation und/oder Gewichtung von Daten zu arbeiten. Es besteht somit die Möglichkeit, einzelne Bewertungskriterien in Abstimmung mit Betroffenen und/oder Experten zusammenzufassen und/oder zu gewichten.

Da die HDT einen großen Rechenaufwand erfordert, bietet sich die Anwendung der Software PyHasse-exp or PyHasse-inet an (14). Mit Hilfe dieser Tools können die notwendigen Algorithmen der HDT zur Erstellung des Hassediagramms und zur Berechnung der Kenngrößen sowie eine Vielzahl weiterer Funktionen durchgeführt werden. Es ermöglicht die Überprüfung von Zusammenhängen zwischen den Kriterien und Objekten und unterstützt deren Identifikation. Die Interpretation der Resultate ist schlussendlich jedoch die Aufgabe von Experten und kann nur sinnvoll mit entsprechendem fachlichem Know-how erfolgen.

4 Fazit

Es ist unmittelbar einsichtig, dass auch mit dem hier vorgestellten Instrument der HDT kein Verfahren vorliegt, dessen Einsatz als Ergebnis einer rein analytischen Vorgehensweise zu einer eindeutigen, optimalen Entscheidung führt. Es bleibt notwendig, dies in einen umfassenderen Entscheidungs- und Zielfindungsprozess zu integrieren.

Die Standortauswahl für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle stellt eine Herausforderung dar, die noch viele Generationen nach uns betreffen wird. Daher sollte die Auswahl sowohl auf der Basis größtmöglichen objektiven Fachwissens als auch eines größtmöglichen gesellschaftlichen Konsenses erfolgen. Die Entscheidung ist zeitnah zu treffen, da die heutige Generation die Entscheidungsnotwendigkeit verursacht hat. Die geowissenschaftlichen und technischen, aber auch die sozialwissenschaftlichen Aspekte sind bekannt bzw. werden aktuell erarbeitet. Offen ist, wie diese Aspekte, d. h. die daraus abgeleiteten Bewertungskriterien, zusammengeführt werden sollen, um eine Entscheidung für einen

pository site possible. The approach to how to best achieve a balance of interests, resolve target conflicts and finally how to reach a consensus is still missing. The method of the HDT presented here may be one means to support this decision-making process. Many applications, e.g., for assessing environmental chemicals, for evaluating ecological systems but also in urban planning for the definition of so-called "Hot Spots" show the practical suitability of the HDT.

In the scope of the site selection processes, HDT contributes to making the procedure transparent, to outlining alternatives and to making clear why such (a) site(s) should be selected. Whereas the selection of the assessment criteria should predominantly be carried out by experts of the individual disciplines – geologists, hydro geologists, social economists, etc. –, the participation of the public should be considered for the selection of the weighting in order to achieve a perceivable procedure which is supported by all stakeholders.

Endlagerstandort zu treffen. Es fehlt der Weg zur Abwägung, der Auflösung von Zielkonflikten und letztlich der Konsensfindung. Die hier vorgestellte Methodik der HDT kann ein Weg sein, diese Entscheidung zu unterstützen. Zahlreiche Anwendungen, z.B. zur Bewertung von Umweltchemikalien, zur Ökosystembewertung, aber auch in der Städteplanung zur Definition sogenannter sozialer „Hot Spots“, zeigen die Praxistauglichkeit der HDT.

Die HDT bietet im Rahmen des Standortauswahlverfahrens die Möglichkeit, das Vorgehen transparent zu machen, Alternativen aufzuzeigen und deutlich zu machen, warum welche(r) Standort(e) ausgewählt wurde(n). Während die Auswahl der Bewertungskriterien vorrangig von Experten der einzelnen Disziplinen – Geologen, Hydrogeologen, Sozioökonomien etc. – vorgenommen werden sollte, kann eine Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Auswahl der Gewichtungen erfolgen, um im Ergebnis ein für alle Beteiligten nachvollziehbares und gemeinsam getragenes Vorgehen zu erreichen.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). Standortauswahlgesetz vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2553).
- (2) Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS et. al., 2013.
- (3) Arbeitskreis Endlager: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AKEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Abschlussbericht 2002.
- (4) Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L.: Multi-Criteria Analyse: Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Springer Verlag, Berlin, 1991.
- (5) Rauschmayer, F.; Drechsler, M.: Entscheidungen zwischen Arten? In: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung (ZAU), Sonderheft 13 (2001), S. 83-93.
- (6) Horsch, H.; Ring, I.; Herzog, F. (Hrsg.): Nachhaltige Wasserbewirtschaftung und Landnutzung. Methoden und Instrumente der Entscheidungsfindung und –umsetzung. Metropolis Verlag, Marburg, 2001.
- (7) Pudenz, S.; Brüggemann, R.; Voigt, K.; Welzl, G.: Nachhaltige Entwicklung von Managementstrategien: Multikriterielle Bewertungs- und Entscheidungshilfe-Instrumente. 6. SETAC Tagung, Übersichtsbeitrag, UWSF – Z Umweltchem Ökotox 14 (1), 2002.
- (8) Heinrich, R. et. al.: Leitfaden Nachhaltige Wasserwirtschaft – ein Weg zur Entscheidungsfindung. Wasserforschung e. V. Interdisziplinärer Forschungsverbund Berlin (Hrsg.), 2001.
- (9) Brüggemann, R.; Steinberg, Ch.: Einsatz der Hassediagrammtechnik zur vergleichenden Bewertung von Analysendaten – am Beispiel von Umweltuntersuchungen in den Regionen Baden-Württembergs. In: Analytiker Taschenbuch 21 (2000); Springer-Verlag: S. 3–33.
- (10) Brüggemann, R.; Drescher-Kaden, U.: Einführung in die modellgestützte Bewertung von Umweltchemikalien; Datenabschätzung, Ausbreitung, Verhalten, Wirkung und Bewertung. Springer Verlag Berlin, 2003.
- (11) Luther, B.: Ökosystembewertung mit Hilfe von Hassediagrammen: Ein Verfahren zur multikriteriellen Bewertung. II WHASSE Tutorial: Motivation und theoretische Grundlagen des EDV-Tools. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Ökosysteme und Umweltinformatik, 2002.
- (12) Lerche, D.; Brüggemann, R.; Sørensen, P.; Carlsen, L.; Nielsen, O. J.: A Comparison of Partial Order Technique with Three Methods of Multi-Criteria Analysis for Ranking of Chemical Substances. In: J. Chem. Inf. Comput. Sci., 42 (2002), S. 1086-1098.
- (13) Brüggemann, R.; Halfon, E.; Welzl, G.; Voigt, K.; Steinberg, Ch.: Applying the Concept of Partially Ordered Sets on the Ranking of Near-Shore Sediments by a Battery of Tests. In: J. Chem. Comput. Sci., 41 (2001), S. 918-925.
- (14) <http://www.pyhasse.org/> (Stand: 13.04.2015).

Author / Autor

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Daniela Gutberlet,
Geschäftsentwicklung Nukleare Entsorgung,
DMT GmbH & Co. KG, Essen