

Ein multikriterielles fuzzy- und risikobasiertes Entscheidungsmodell für die Planung unterirdischer Infrastruktur

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

der

Ruhr-Universität Bochum

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Sissis Kamarianakis

aus Recklinghausen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Thewes, Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb

Prof. Dr.-Ing. M. König, Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen

Tag der Einreichung: 25. Juni 2013

Tag der mündlichen Prüfung: 08. Oktober 2013

„Man muss nicht nur mehr Ideen haben als andere, sondern auch die Fähigkeit besitzen, zu entscheiden, welche dieser Ideen gut sind.“¹

¹ Linus Carl Pauling, (1901 – 1994), US-amerikanischer Chemiker

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	vi
Abbildungsverzeichnis	xii
Tabellenverzeichnis	xvi
Abkürzungsverzeichnis	xvii
Kurzfassung	xix
Abstract	xx
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Planungsablauf eines klassischen unterirdischen Infrastrukturprojektes	7
2.1 Grundlegende Informationen	7
2.1.1 Bedarfsplanung.....	8
2.1.2 Raumordnung.....	9
2.1.2.1 Raumordnungsverfahren.....	9
2.1.2.2 Linienbestimmungsverfahren.....	10
2.1.2.3 Kriterien im Zuge der Variantenstudie.....	11
2.1.2.4 Machbarkeitsstudie.....	16
2.1.3 Vorentwurfsphase und Planfeststellungsverfahren.....	17
2.1.3.1 Erstellung eines Vorentwurfs für das Planfeststellungsverfahren.....	17
2.1.3.2 Ablauf der Vorentwurfsplanung.....	18
2.1.3.3 Landschaftspflegerischer Begleitplan.....	19
2.1.3.4 Planfeststellungsverfahren.....	19
2.1.4 Kritische Betrachtung des Planungsprozesses.....	20
3 Grundlagen der Entscheidungstheorie	27
3.1 Interaktionsprozess der Entscheidungsfindung	27
3.2 Deskriptive Entscheidungsfindung	28
3.3 Normative Entscheidungsfindung	29

3.4	Präskriptive Entscheidungsfindung	29
3.5	Die Rationalität	29
3.5.1	Axiom 1: Vollständigkeit	30
3.5.2	Axiom 2: Transitivität	30
3.5.3	Axiom 3: Objektive Richtigkeit	30
3.5.4	Axiom 4: Unabhängigkeit	31
3.6	Rationale Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung der Logik	31
3.6.1	Handlungsalternativen	33
3.6.2	Umweltzustände	34
3.6.2.1	Entscheidung unter Unsicherheit	36
3.6.2.2	Begriffliche Unschärfe	38
3.6.3	Ergebnis einer Entscheidung	38
3.6.4	Ziele und Kriterien einer Entscheidung	38
3.7	Eingrenzung von Entscheidungsmodellen	41
4	Multikriterielle Entscheidungsverfahren	44
4.1	Allgemeines	44
4.2	Multiobjektive Bewertungsverfahren	45
4.2.1	Nutzenmaximierung	45
4.2.2	Lexikographische Ordnung	46
4.2.3	Goal Programming	47
4.3	Multiattributive Bewertungsverfahren	47
4.3.1	Outranking und Prävalenzverfahren	47
4.3.1.1	ELECTRE-Methode	48
4.3.1.2	Promethee-Methode	48
4.3.1.3	TOPSIS-Methode	48
4.3.2	Multikriterielle Bewertungsverfahren	51
4.3.2.1	Nutzwertanalytische Methoden	51
4.3.2.2	Der Analytische Hierarchie Prozess	52
4.3.2.3	Multi Attributive Utility Theory (MAUT)	53
4.4	Auswahl eines Multikriteriellen Bewertungsverfahrens	54

5	Der Analytische Hierarchie Prozess (AHP)	56
5.1	Allgemeines	56
5.2	Die Axiome der AHP-Methodik.....	56
5.3	Ablauf des Analytischen Hierarchieprozesses.....	57
5.3.1	Planungsphase	58
5.3.2	Bewertungsphase	58
5.3.2.1	Bestimmung der Attribute und Alternativen	58
5.3.2.2	Kriterien- und Alternativenbewertung	58
5.3.3	Ergebnisphase.....	63
5.4	Einsatz des AHP im Bausektor	65
5.5	Kritische Würdigung des AHP	67
6	Berücksichtigung der Unschärfe bei Bewertungen	70
6.1	Grundlagen zur Unschärfebetraachtung.....	70
6.2	Einführung in die Fuzzy-Theorie.....	71
6.3	Unscharfe Mengen	72
6.4	Unscharfe Zahlen	75
6.5	Verknüpfung von Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Zahlen	77
6.6	Verknüpfung der Fuzzy-Methodik mit dem AHP	78
6.7	Einsatzbereiche der Fuzzy-Theorie in Technik und Wirtschaft.....	85
6.8	Kritische Würdigung der Fuzzy-Methodik.....	86
7	Berücksichtigung der Unsicherheit bei Bewertungen	88
7.1	Grundlagen zur Unsicherheitsbetrachtung	88
7.2	Definition Risiko.....	89
7.3	Risiko für unterirdische Infrastruktur am Beispiel Tunnelbau.....	91
7.3.1	Risikogruppen im Zuge des Lebenszyklus eines Verkehrstunnels	91
7.3.2	Einordnung der auftretenden Risiken in die Projektphasen	95
7.4	Risikomanagementprozess.....	99
7.4.1	Risikoidentifikation	100
7.4.2	Risikobewertung und Risikoklassifizierung	103
7.4.3	Risikobehandlung	105

7.5	Quantitative Risikoanalyse mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation	106
7.5.1	Ursprung der Monte-Carlo-Simulation	106
7.5.2	Funktionsweise der Monte-Carlo-Simulation	106
7.5.3	Risikomodellierung	108
7.5.3.1	Dreiecksverteilung	109
7.5.3.2	Beta-PERT-Verteilung	110
7.5.4	Analysemöglichkeiten einer Monte-Carlo-Simulation.....	110
7.6	Kritische Würdigung der Monte-Carlo-Simulation	112
8	Entwicklung eines Entscheidungsmodells für den Bau unterirdischer Infrastruktur basierend auf Unschärfen und Unsicherheiten	114
8.1	Aufbau eines Entscheidungsmodells für unterirdische Infrastruktur	114
8.2	Phase 1: Projektanalyse	117
8.2.1	Projektplanung.....	119
8.2.2	Kriterienentwicklung.....	120
8.2.3	Analyse unscharfer und risikobasierter Größen.....	121
8.2.4	Aufbau der Bewertungshierarchie.....	122
8.2.4.1	Ökonomische Kriterien	123
8.2.4.2	Ökologische Kriterien	125
8.2.4.3	Technische Kriterien.....	129
8.2.4.4	Soziale Kriterien	130
8.2.5	Zusammenfassende Betrachtung zur Phase 1	130
8.3	Phase 2: Datentypanalyse	131
8.3.1	Phase 2-1: Fuzzybasierte Bewertung	132
8.3.1.1	Unschärfe bei qualitativ zu bewertenden Größen.....	133
8.3.1.2	Unschärfe bei quantitativ zu bewertenden Größen.....	136
8.3.2	Phase 2-2: Risikobasierte Bewertung.....	141
8.3.3	Phase 2-3: Sonderfall der fuzzybasierten Bewertung	145
8.4	Phase 3: DEMUS² - Risiko -und fuzzybasierte Software-Analyse	147
8.4.1	Software DEMUS ² - Version 1.0	147
8.4.2	Software DEMUS ² -Version 2.0	147

8.4.2.1	Eingabe und Erstbewertung der Kriterien und Alternativen	148
8.4.2.2	Qualitative Bewertung mit DEMUS ²	149
8.4.2.3	Quantitative Bewertung mit DEMUS ²	150
8.4.2.4	Ergebnisauswertung	154
8.4.3	Rückschlüsse für Projektbeteiligte	157
8.4.4	Verifizierung der Software DEMUS ²	157
8.5	Zusammenfassung und Fazit.....	158
9	Einsatz des Entscheidungsmodells am Beispiel eines unterirdischen Infrastrukturprojektes	160
9.1	Allgemeines und Ansatz zur Verifizierung der Methodik	160
9.2	Projektbeschreibung	161
9.3	Spezifische Randbedingungen	161
9.3.1	Lage	162
9.3.2	Verkehr	162
9.3.3	Straße	162
9.3.4	Bebauung	162
9.3.5	Geschäfte	162
9.4	Entscheidungsprozess in der ursprünglichen Planungsphase.....	162
9.4.1	Planung mit offener Bauweise	163
9.4.1.1	Allgemeines	163
9.4.1.2	Bauablauf für die Baumaßnahme	163
9.4.1.3	Kosten als Kriterium während der Planungsphase	165
9.4.2	Planung mit geschlossener Bauweise	167
9.4.2.1	Allgemeines	167
9.4.2.2	Bauablauf für die Baumaßnahme	168
9.4.2.3	Kosten als Kriterium während der Planungsphase	170
9.4.3	Entscheidungsfindung im Zuge der ursprünglichen Planung	171
9.5	Test 1 – Nutzung des Analytic Hierarchy Process	172
9.5.1	Projektanalyse in Anlehnung an den AHP	172
9.5.1.1	Kriterienentwicklung und Bewertungshierarchie	173

9.5.1.2 Bewertung mit DEMUS ²	174
9.5.2 Kritische Betrachtung der Ergebnisse aus Test 1	179
9.6 Test 2 – Nutzung des risikobasierten Fuzzy-Analytic Hierarchy Process ...	180
9.6.1 Identifikation der maßgebenden Kriterien	181
9.6.1.1 Folgekosten als unscharfes qualitatives Kriterium.....	181
9.6.1.2 Bauzeit als unscharfes quantitatives Kriterium	181
9.6.1.3 Initialkosten und Mehrkosten aus Risiko als risikobasierte unsichere quantitative Kriterien.....	182
9.6.2 Implementierung der unscharfen und unsicheren Faktoren in das Entscheidungsmodell.....	192
9.6.2.1 Analyse der risikobasierten Initialkosten zzgl. der Mehrkosten aus Risiko.....	192
9.6.2.2 Analyse der Folgekosten und risikobasierten Initial- und Mehrkosten	193
9.6.2.3 Analyse der Folgekosten, risikobasierten Initial- und Mehrkosten und Bauzeit	197
9.6.2.4 Zusätzliche Betrachtung qualitativer unscharfer Kriterienvergleiche	197
9.7 Kritische Betrachtung der Entscheidungsanalyse	201
9.7.1 Interpretation der Ergebnisse aus beiden Untersuchungen	202
9.7.2 Präzisierung des Entscheidungsprozesses	202
9.7.3 Transparenz des Entscheidungsprozesses	203
9.7.4 Übertragbarkeit der Methodik	204
9.8 Fazit zur Nutzung von DEMUS	206
10 Zusammenfassung und Ausblick	210
10.1 Zusammenfassung	210
10.2 Ausblick	213
11 Literaturverzeichnis	216
12 Anhang	233
13 Lebenslauf	236

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spezifische Baukosten zu Gesamtbaukosten, nach [81]	13
Abbildung 2: Zusammenhang Kosten, Tunnellänge und Vortriebsverfahren, nach [108].....	15
Abbildung 3: Methoden der Kostenermittlung, nach [155]	15
Abbildung 4: Verfahrensschritte im Rahmen der Leistungsphase 3: Vorentwurf, nach [34].....	18
Abbildung 5: Verfahrensschritte im Rahmen der Leistungsphase 4: Genehmigungsplanung, nach [34].....	20
Abbildung 6: Zielsystem und Entscheidungsfeld im Zuge einer Entscheidung, nach [3, S.1]	28
Abbildung 7: Basiselemente eines Entscheidungsproblems, nach [103, S.20].....	32
Abbildung 8: Zielfunktion und Entscheidungsfeld für das Bsp. Wahl eines Bauverfahrens, nach [109, S. 9]	33
Abbildung 9: Unbestimmtheit bei Entscheidungen, nach [103, S.23].....	35
Abbildung 10: Merkmale von Kriterien, nach [91, S.50ff].....	39
Abbildung 11: Messbarkeit von Kriterien und Zielen, nach [218, S.11f.].....	40
Abbildung 12: MCDM-Methoden, nach [125, S.23].....	43
Abbildung 13: Überblick über multikriterielle Entscheidungsverfahren, nach [199, S.30]	45
Abbildung 14: Hierarchie von Kriterien und Alternativen, nach [123].....	53
Abbildung 15: Phasen im Zuge des AHP, nach [218, S.70].....	57
Abbildung 16: Beispielhafte Sensitivitätsanalyse	65
Abbildung 17: Beispielhafte Fuzzy-Mengen, nach [57]	71
Abbildung 18: Darstellung einer Singleton-Funktion	73
Abbildung 19: Charakteristische Fuzzy-Funktion für die Lautstärke in dB(A)	74
Abbildung 20: Mögliche Fuzzy-Funktionsverläufe, nach [188, S.53f].....	75
Abbildung 21: Beispiel einer triangularen Fuzzy Menge	76
Abbildung 22: α -Schnitt einer unscharfen Zahl	77
Abbildung 23: Dreiecksfunktion $\mu_{\tilde{A}x}$	80
Abbildung 24: Fuzzy-Funktionen einzelner AHP-Bewertungspunkte.....	81

Abbildung 25: Charakteristische Eigenschaften der Informationen und des Entscheiderverhaltens bei Wahl eines Alpha-Cuts und Optimismus Index.....	84
Abbildung 26: Dreiecksfunktion der Fuzzy-Zahl "5" (Fs).....	85
Abbildung 27: Struktur von Unsicherheit, nach [108, S.6].....	88
Abbildung 28: Einfluss der Unsicherheit auf die Performance eines Projekts, nach [147, S.36]	91
Abbildung 29: Lebenszyklus eines Bauwerks, nach [21]	92
Abbildung 30: Einordnung der Entscheidungsfindung in den Phasen der einzelnen HOAI-Schritte	97
Abbildung 31: Einfluss der Unsicherheit auf die Performance eines Projekts, nach [47].....	98
Abbildung 32: Übersicht der Unschärfen bzgl. Kosten, nach [146, S.18].....	99
Abbildung 33: Elemente des Risikomanagements, nach [157, S.20].....	100
Abbildung 34: Methoden zur Risikoidentifikation, nach [136, S.174].	102
Abbildung 35: Vorgehen bei der Monte-Carlo-Analyse	108
Abbildung 36: Stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung.....	109
Abbildung 37: Dichtefunktion und kumulative Dreiecksverteilung.....	110
Abbildung 38: Dichtefunktionen und kumulative PERT-Verteilungen	110
Abbildung 39: Beispiel eines Tornado-Diagramms	112
Abbildung 40: Betrachtungsfeld DEMUS	116
Abbildung 41: Aufbau des Entscheidungsmodells für unterirdische Infrastruktur ...	117
Abbildung 42: Ablauf der Projektanalyse (Phase 1).....	118
Abbildung 43: Gruppierung der einzelnen qualitativen und quantitativen Kriterien .	122
Abbildung 44: Klassische Hierarchie für den Bau unterirdischer Infrastruktur	123
Abbildung 45: Ablauf der Datentypanalyse (Phase 2)	132
Abbildung 46: Vorgehensweise bei unscharfen Eingangsgrößen.....	133
Abbildung 47: Fuzzy-Dreiecksfunktionen für AHP-Bewertungszahlen (Intervall ± 1)	134
Abbildung 48: Fuzzy-Dreiecksfunktionen für AHP-Bewertungszahlen (Intervall ± 2)	134
Abbildung 49: Fuzzyfizzierter AHP-Wert 1, Präferenz links, Intervall ± 1	135
Abbildung 50: Fuzzyfizzierter AHP-Wert 1, Präferenz rechts, Intervall ± 1	135

Abbildung 51: Fuzzyfizierter AHP-Wert 1, Präferenz links, Intervall ± 2	135
Abbildung 52: Fuzzyfizierter AHP-Wert 1, Präferenz rechts, Intervall ± 2	135
Abbildung 53: Ablauf bei der Fuzzyfizierung einer quantitativen Größe	138
Abbildung 54: Zugehörigkeitsfunktionen Transportmengen in to/Tag	139
Abbildung 55: Funktionsverläufe der Gesamtgewichtung der Alternativen für $\lambda=0,0$	140
Abbildung 56: Funktionsverläufe der Gesamtgewichtung der Alternativen für $\lambda=0,5$	140
Abbildung 57: Funktionsverläufe der Gesamtgewichtung der Alternativen für $\lambda=1,0$	141
Abbildung 58: Dichtefunktion der Alternative A nach einer MCS	144
Abbildung 59: Dichtefunktion der Alternative B nach einer MCS	144
Abbildung 60: Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse im Zuge der risikobasierten Datentypanalyse	145
Abbildung 61: Beispiel einer Fuzzyfizierung eines Wertes aus der risikobasierten Bewertung	146
Abbildung 62: Screenshot DEMUS ² ; Fuzzyfizierung scharfer qualitativer und quantitativer Daten	149
Abbildung 63: Screenshot DEMUS ² ; Bewertung der Paarvergleiche in DEMUS ² ...	150
Abbildung 64: Screenshot DEMUS ² ; Eingabe von scharfen Eingangsdaten	151
Abbildung 65: Screenshot DEMUS ² ; Eingabe von unscharfen Eingangsdaten	152
Abbildung 66: Screenshot DEMUS ² ; Eingabe von risikobasierten Simulationsdateien und Intervallen	153
Abbildung 67: Fuzzy-Funktionen für die Alternativen A1 und A2 (Kriterium K1)	155
Abbildung 68: Dichtefunktionen für die Alternativen A1 (Kriterium K2)	155
Abbildung 69: Dichtefunktionen für die Alternativen A2 (Kriterium K2)	156
Abbildung 70: Gesamtgewichtung der Alternativen A1 und A2 für $\lambda = 0,0$	156
Abbildung 71: Gesamtgewichtung der Alternativen A1 und A2 für $\lambda = 1,0$	157
Abbildung 72: Fiktive Hierarchie zur Verifizierung der Software DEMUS ²	158
Abbildung 73: Projekthierarchie zum Projekt Lotter Straße	174
Abbildung 74: Sensitivitätsanalyse des Kriteriums ‚Ökonomie‘	178
Abbildung 75: Sensitivitätsanalyse des Kriteriums ‚Ökologie‘	178

Abbildung 76: Sensitivitätsanalyse des Kriteriums ‚Technik‘	179
Abbildung 77: Fuzzy-Funktionen; Offene Bauweise (links), Geschlossene Bauweise (rechts)	182
Abbildung 78: Entwicklung des Stahlpreises von 2006 bis 2011, nach [164]	184
Abbildung 79: Beta-PERT-Verteilung für die Position Stahl	185
Abbildung 80: Szenarioeinteilung für einzelne Positionen	187
Abbildung 81: Ergebnisse der MCS-Analyse für die geschlossene Bauweise	189
Abbildung 82: Ergebnisse der MCS-Analyse für die offene Bauweise	190
Abbildung 83: Dichtefunktion der Gesamtsumme für die geschlossene Bauweise	191
Abbildung 84: Dichtefunktion der Gesamtsumme für die offene Bauweise	191
Abbildung 85: Gesamtgewichtung der Alternativen einzelner Szenario-Analysen ..	193
Abbildung 86: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; Kostenkriterien für das Szenario ‚OB 90%/GB 10%‘ (Fuzzy-Intervall ± 1)	194
Abbildung 87: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; Kostenkriterien für das Szenario ‚OB 90%/GB 10%‘ (Fuzzy-Intervall ± 2)	194
Abbildung 88: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; Kostenkriterien für das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 1)	195
Abbildung 89: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; Kostenkriterien für das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 2)	196
Abbildung 90: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; qualitative unscharfe Kriterienvergleiche für das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy- Intervall ± 1 ; Präferenz GB)	198
Abbildung 91: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; qualitative unscharfe Kriterienvergleiche für das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy- Intervall ± 2 ; Präferenz GB)	198
Abbildung 92: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; qualitative unscharfe Kriterienvergleiche für das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy- Intervall ± 1 ; Präferenz OB)	199
Abbildung 93: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; qualitative unscharfe Kriterienvergleiche Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 2 ; Präferenz OB)	200
Abbildung 94: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; qualitative unscharfe Kriterienvergleiche aller Ebenen, Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 2 ; Präferenz OB)	201

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verfahrensebenen beim Bau von Verkehrswegeprojekten, nach [30].....	8
Tabelle 2: Zusammenstellung der maßgeblichen Variablen und Ausprägungen	42
Tabelle 3: Beispiel einer Bewertungsmatrix für die Lexikographische Ordnung	46
Tabelle 4: Fiktive Matrix für die TOPSIS-Methode	49
Tabelle 5: 9-Punkte-Bewertungsskala, nach [142, S.73]	59
Tabelle 6: Reziproke 9-Punkte-Bewertungsskala, nach [142, S.73]	60
Tabelle 7: Schema zur Berechnung der AHP-Gewichtung, nach [125, S.133]	61
Tabelle 8: RI-Werte, nach [141] [142] [143]	63
Tabelle 9: Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Werte inklusive Alpha-Cut und Optimismus Index	83
Tabelle 10: Schwankungsbereich bzgl. Kostenfeststellung in Abhängigkeit der Projektphase, nach [197, S.93].....	96
Tabelle 11: Qual. und quantitative Risikomethoden, nach [147, S.63].....	103
Tabelle 12: Zusammenstellung verschiedener Risikobewertungsmethoden, nach [146, S.42].....	105
Tabelle 13: Funktionen für das Intervall ± 1	136
Tabelle 14: Funktionen für das Intervall ± 2	136
Tabelle 15: Gesamtkosten der offenen Bauweise	165
Tabelle 16: Kosten nach Bauleistungen für die offene Bauweise	167
Tabelle 17: Gesamtkosten der geschlossenen Bauweise	170
Tabelle 18: Kosten nach Bauleistungen für die geschlossene Bauweise	171
Tabelle 19: Lokale und globale Gewichtung der einflussreichsten Kriterien	175
Tabelle 20: Lokale Gewichtungen der Alternativenvergleiche	176
Tabelle 21: Risiko für Mehrmengen Boden, Pos. Kanalbau SW, offene Bauweise	186
Tabelle 22: Risiko für Mehrmengen Boden, Pos. Kanalbau RW, offene Bauweise	186
Tabelle 23: Risiko für Mehrmengen Boden, Pos. Kanalbau RW/SW, geschl. Bauweise	186
Tabelle 24: Risiko für Bauzeitüberschreitung, offene Bauweise	186
Tabelle 25: Risiko für Bauzeitüberschreitung, geschlossene Bauweise	186

Abkürzungsverzeichnis

AIDA	Analysis of Interconnected Decision Areas	GSTT	German Society of Trenchless Technology
AHP	Analytischer Hierarchie Prozess	GB	Geschlossene Bauweise
Bsp.	Beispiel	GFK-Rohre	Glasfaser verstärkte Kunststoffrohre
bspw.	beispielsweise	Hrsg.	Herausgeber
bzw.	beziehungsweise	i.d.R.	in der Regel
bzgl.	bezüglich	inkl.	inklusive
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	km/h	Kilometer pro Stunde
ca.	circa	KO-Kriterien	Knock-Out Kriterien
CI	consistency index	CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CR	consistency ratio	LV	Leistungsverzeichnis
d.h.	das heißt	LCC	Life Cycle Costing
DEMUS	Decision Management for underground Infrastructure – Entscheidungsmodell	MwSt	Mehrwertsteuer
DEMUS ²	Decision Management for underground Infrastructure – Software	m	Meter
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt	MCS	Monte-Carlo-Simulation
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.	MADM	Multi Attribute Decision Making
dB(A)	Dezibel(A)	MAUT	Multi attributive utility theory
DN	Diameter Nominal	MCDM	Multi Criteria Decision Making
p	Eintrittswahrscheinlichkeit	MODM	Multi Objective Decision Making
ELECTRE	Elimination Et Choice Translation Réalité	NRAS	Neuronales Risiko Assessment System
etc.	et cetera	NWA	Nutzwertanalyse
€	Euro	OB	Offene Bauweise
FTA	Fault Tree Analysis	PKW	Personenkraftwagen
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	PEST	Political, Economic, Social, and Technological analysis
ggf.	gegebenenfalls	Pos.	Position

Promethee	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment and Evaluations	VwVfG	Verwaltungsverfahrensgesetz
PERT	Program Evaluation and Review Technique	VBA	Visual Basic for Applications
PMBOK	Project Management Body of Knowledge	z.B.	zum Beispiel
%	Prozent	u.U.	unter Umständen
RI	random index		
RW	Regenwasserkanal	zzgl.	zuzüglich
SW	Schmutzwasserkanal		
SSM	Soft Systems Methodology		
SODA	Strategic Options Development Analysis		
SWOT	Strength Weakness Opportunity Threats		
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution		
t	Tonne		
UVE	Umweltverträglichkeitserklärung		
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung		
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz		
UVS	Umweltverträglichkeitsstudie		
et al.	und andere		
vgl.	vergleiche		
BOStrab	Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen		
HOAI	Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure)		

Kurzfassung

Bauwerke der unterirdischen Versorgungs- und Verkehrsinfrastruktur bedingen häufig technisch anspruchsvolle und kostenintensive Bauvorhaben. Hinsichtlich Technologie, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit stellen sie zumeist hohe Anforderungen an den Planungsprozess dar. Dies gilt insbesondere, wenn mehrere in ihrer grundsätzlichen Funktionalität gleichwertig erscheinende Bauverfahren in Bezug auf technische und ökonomische Kriterien miteinander konkurrieren. Im Rahmen eines ganzheitlichen Ansatzes sind zudem verstärkt ökologische und sozio-kulturelle Randbedingungen zu berücksichtigen. Die planerische Entwicklung einer baulichen Infrastrukturmaßnahme ist demnach das individuelle Ergebnis des Zusammenwirkens vielschichtiger Planungsfaktoren, spezifischer Ziele, heterogener Einflussgrößen und persönlicher Entscheidungen der am Planungsprozess Beteiligten. Als ein Manko der derzeitigen Vorgehensweise ist häufig festzustellen, dass eine Entscheidung aufgrund eines unzureichend dokumentierten Planungsprozesses und der daraus resultierenden Nichtnachvollziehbarkeit der Bewertungsergebnisse oftmals nicht mehr prüfbar und somit intransparent ist. Die Berücksichtigung der ganzheitlichen Aspekte in ein Bewertungsverfahren und die Hinzunahme projektspezifischer den Anforderungen entsprechenden Bewertungskriterien fördert die Transparenz einer gemachten Entscheidung, so dass neben Bauherren und Planern auch Gruppen der Öffentlichkeit und Politik den Planungsprozess nachvollziehen können. Die Möglichkeit zur Kontrolle, Steuerung und Nachvollziehbarkeit der Planungsentscheidung ist Voraussetzung für einen effizienten Entscheidungsprozess. Ein Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung eines solchen transparenten Bewertungsverfahrens bei der Entscheidung zur Bestimmung des bestmöglichen Bauverfahrens. Eine effiziente und nachvollziehbare Planung erfolgt dann, wenn dem Planer ein Instrument zur Verfügung steht, das die heterogenen Zielvorgaben unter Beachtung der ökonomischen, ökologischen, technischen sowie sozio-kulturellen Randbedingungen bündelt.

Die in dieser Arbeit untersuchten multikriteriellen Entscheidungsverfahren basieren auf mathematischen Grundlagen sowie einer stringenten Vorgehensweise. Die Vorgabe einer Methodik ermöglicht im Nachgang die vollständige Einsicht in die Kriterien und deren Gewichtung bei der Entscheidungsfindung. Dieser Kontrollmechanismus einer solchen multikriteriellen Methodik fördert die Transparenz der gemachten Entscheidung. Der Anlass zur Entwicklung eines ganzheitlichen Entscheidungsmodells geht somit von der bis dato kaum stattfindenden Anwendung dieser Methoden aus. In dieser Arbeit wird die multikriterielle AHP-Bewertungsmethode (Analytic Hierarchy Process) als wissenschaftlich anerkanntes Verfahren zur Lösung komplexer Entscheidungssituationen angewendet. Durch Bündelung des vorhandenen Expertenwissens und durch Einbezug von Elementen der Fuzzy-Set-Theorie werden individuelle Entscheidungskonstellationen als Informationen abgebildet. Die bei allen Großprojekten immanenten Unsicherheiten und Risiken werden durch Verwendung unsicherer und unscharfer Daten in das Entscheidungsmodell einbezogen. In dieser Arbeit werden zunächst klassische Entscheidungsmodelle hinsichtlich ihrer Adaptierbarkeit für die vorliegende Problematik untersucht. Im Anschluss daran wird das Entscheidungsmodell entwickelt, das gegenüber den klassischen Modellen um die Faktoren Unsicherheit und Unschärfe erweitert wird. Das Forschungsziel der Arbeit ist die Entwicklung eines mit wissenschaftlichen Methoden hinterlegten Entscheidungsmodells, das durch die Integration unsicherer und unscharfer Aspekte eine transparente und für die Zukunft nachhaltige Entscheidung bei der Wahl des Bauverfahrens gewährleistet. Das erarbeitete Modell ist in die Entwicklung der selbst programmierten Software DEMUS² eingegangen, die an einem Beispielprojekt validiert wird. Die Anwendung des Entscheidungsmodells soll den Planungsprozess langfristig effektiver gestalten und zu einer Erhöhung der Projektakzeptanz führen. Es wird Projektbeteiligten ein Verfahren zur Verfügung gestellt, das die heterogenen Zielstellungen bezüglich technischer, wirtschaftlicher und nachhaltiger Aspekte unter Beachtung von wirtschaftlichen Risiken und unterschiedlichen Entscheiderperspektiven in einem Modell vereinen kann und langfristig die Transparenz des Entscheidungsprozesses gewährleistet.

Abstract

Buildings of underground utility and traffic infrastructure are often technical and cost-intensive construction projects. In terms of technology, efficiency and sustainability, they provide high demands on the planning process. This applies particularly when in their basic functionality several equivalent appearing construction methods compete in terms of technical and economical criteria. As part of a holistic approach also ecological and socio-cultural constraints are considered increasingly. The planning development of a structural infrastructure is the individual result of the interaction between complex planning factors, specific objectives, heterogeneous factors and personal decisions by involved project participants. A shortcoming of the current approach is that a decision on the basis of an insufficiently documented planning process and the missing confirmability of the evaluation results is often not testable and therefore not transparent. The consideration of holistic aspects in an evaluation method and the addition of project-specific relevant assessment criteria promotes the transparency of a made decision, so that besides building owner and planners, also groups of public and policy can track the planning process. The ability to monitor, control and reconstruct the planning decision is a prerequisite for an efficient decision-making process. A goal of this work is the development of such transparent decision making method to determine the best construction method. An efficient and transparent planning phase occurs when the planner has a tool that combines the heterogeneous targets taking into account the economic, environmental, technical and socio-cultural constraints.

In this work the analyzed multi-criteria decision-making methods are based on mathematical foundations and a stringent approach. The specification of a methodology allows to follow up the full insight into the criteria and their weighting in the decision-making process. This control mechanism of such a multi-criteria methodology promotes the transparency of the made decision. Thus, the occasion for the development of a holistic decision analysis model is based on the barely missing application of these methods to date. In this work, the multi-criteria decision making method AHP (Analytic Hierachy Process) is used as a scientifically recognized procedure for solving complex decision situations. Through pooling of expertise and by incorporating elements of the fuzzy set theory, individual decision constellations are represented as information. The immanent uncertainties and risks of major projects will also be included into the decision model by using uncertain and fuzzy data. In this work, first classical decision models are studied with respect to their adaptability for the present problem. Subsequently, the decision analysis model is developed which is extended by factors of uncertainty and fuzziness. The research goal of this work is the development of a Decision Analysis model, which ensures a sustainable and transparent decision for the choice of a construction method by integration of fuzzy and uncertain aspects. The developed model has made in the development of self-programmed software DEMUS², which is validated to a project. In the long term the application of the decision model is to make the planning process more effective and leads to an increase of the project acceptance. Project participants get a method that can unify the diverse objectives and different perspectives in one decision model in terms of technical, economical and sustainable aspects in compliance with economical risks so that a transparency of the decision-making process is given.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Herstellung von Bauwerken der unterirdischen Infrastruktur erfordert in der Regel technisch anspruchsvolle und kostenintensive Bauverfahren. Die Randbedingungen für das herzustellende Bauwerk werden üblicherweise bereits in einem frühen Planungsstadium mit der Wahl des Bauverfahrens festgelegt. Diese beeinflussen nicht nur die Kosten für Bau und Betrieb, sondern rufen zudem Auswirkungen auf die Umwelt hervor, welche nur bedingt vorhersehbar sind. Zum Bereich Umwelt gehören dabei verschiedene Wirkungsfaktoren wie zum Beispiel der Boden, das Wasser, die Luft, die Pflanzen, die Tiere sowie der Mensch, welche sowohl in einer Wechselwirkung zueinander als auch gemeinsam im Gleichgewicht der Umwelt stehen. Projektspezifische Eingriffe in die genannten Umweltfaktoren können einzelfallbezogen nach einheitlichen Regeln ermittelt werden, um Ergebnisse zu gewinnen, die zur Bilanzierung der Bau- und Betriebsweisen und somit für eine sinnvolle Verfahrensauswahl notwendig sind.

Bspw. stehen im Verkehrstunnelbau bereits in der Planungsphase alternative Bauverfahren zur Auswahl, die bestimmten Anforderungen, Zielen und Vorschriften (z.B. Normen und Richtlinien) genügen müssen. Jene Leistungsanforderungen an die Bauverfahren werden in einen technischen und wirtschaftlichen Teil gegliedert. Zusätzlich werden in weiteren Gutachten Umweltauswirkungen beurteilt, wobei den Umweltaspekten einen hohen Stellenwert beigemessen wird. Für Tunnelbauwerke geschieht dies bislang primär auf Basis des Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetzes [27], welches Rahmenbedingungen und schützenswerte Güter für solche Bilanzierungen vorgibt und definiert.

Der zugehörige Entwurfsprozess muss diesen Leistungsanforderungen insgesamt standhalten. Erst nach Abschluss der Beurteilung werden die Entwurfs- und Bauunterlagen erstellt und das Projekt realisiert. In den ersten Planungsschritten (u.a. HOAI-Leistungsphasen, insb. Screening und Scoping) sind zunächst sämtliche Projektvorentwürfe hinsichtlich ihrer Machbarkeit zu untersuchen. Unter dem Begriff Screening versteht man eine Abschätzung der Auswirkungen eines Projekts auf die Umwelt mit dem Ziel festzustellen, ob das Vorhaben einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) bedarf. Dies ist der Fall, wenn die Abschätzung ergibt, dass ein Vorhaben negative Umweltauswirkungen haben kann. Das Scoping hingegen dient vor Einbringung des Genehmigungsantrages und der Umweltverträglichkeitserklärung (UVE) dem gegenseitigen Informationsaustausch zwischen Bauherren und Behörden und gegebenenfalls Dritten. Vor allem kann beim Scoping der Umfang des Untersuchungsrahmens und die hierfür beizubringenden Unterlagen festgelegt werden.

Im Zuge dieser Voruntersuchungen werden nicht nur Umweltbelange betrachtet, sondern auch weitere Aspekte behandelt, wie z.B.: die Trassen- und Gradientenfindung, Bahnstandsstandorte, U-Bahnstandorte, U-Bahnstandorte (z.B. Mittelbahnsteig oder Seitenbahnsteig), Bauverfahren (geschlossene Bauweise vs. offene Bauweise), Kostenschätzung und Umweltverträglichkeitsplanung. Die synoptische Gegenüberstellung vereint schließlich die wichtigen Kriterien aller gemachten Vorentwürfe, so dass im Anschluss eine Bewertung der konkurrierenden Entwürfe auf Basis eines vorher definierten Bewertungsmaßstabes durchgeführt werden kann. Diese Bewertung erfolgt in den meisten Fällen mit Hilfe einer klassischen Kosten-Nutzenanalyse.

Das Planfeststellungsverfahren ist für solche baulichen Vorhaben zwingend vorgeschrieben, z. B. wenn es sich um Bauvorhaben nach dem Personenbeförderungsgesetz (U-Bahn, Straßenbahn, Eisenbahn, Wasserbau, Flughafen) handelt. Die formellen und materiellen Regelungen für die Abwicklung des Planfeststellungsverfahrens sind in den Verwaltungsverfahrensgesetzen des Bundes und der Länder enthalten [30, §§ 72 - 78]. Bei einer positiven Entscheidung im Planfeststellungsverfahren, in dem die Wahl eines Bauverfahrens getroffen wurde, erhält der Träger des Vorhabens das Recht, die festgesetzte Planung umzusetzen.

Im Leitungstunnelbau sind aufgrund der Größe der ausgeschriebenen Projekte meist keine groß angelegten rechtlichen Randbedingungen zu beachten, so dass auch kaum Erfahrungen hinsichtlich der Verwendung der Umweltverträglichkeitsprüfung existieren. Die Planung eines Leitungstunnels bezieht sich im Normalfall auf einen Vergleich von offener und geschlossener Bauweise. In diesem Vergleich werden verfahrenstechnische und wirtschaftliche Aspekte untersucht und hinsichtlich ihrer Machbarkeit bewertet. Die Bewertung wird ebenfalls mit Hilfe einer klassischen Kosten-Nutzenanalyse durchgeführt, wobei zumeist ein konkretes Bauverfahren beschrieben wird. In diesem Stadium sind seitens des Bauherren Sondervorschläge und Nebenangebote durchaus zugelassen.

Insgesamt sollten Entscheidungen hinsichtlich der Wahl eines geeigneten Bauverfahrens für die am Planungsprozess beteiligten Gruppen zufriedenstellend festgelegt werden, da die festgesetzte Bewertung Auswirkungen auf die Akzeptanz des Projektes bei Projektbeteiligten, Politik, Medien und der Öffentlichkeit hat. Eine Problematik besteht hierbei in der Berücksichtigung mehrerer heterogener Zielstellungen im Rahmen des jeweiligen Entscheidungsprozesses. Die so entstehenden multikriteriellen Entscheidungsprobleme erfordern eine Abwägung zwischen ökologischen, ökonomischen, technischen und soziokulturellen Aspekten, was unter Zuhilfenahme von Multi-Criteria-Decision-Making-Methoden (MCDM-Methoden) möglich ist.

Eine solche Entscheidungsfindung stellt für die Auftraggeber von Infrastrukturmaßnahmen, wie z.B. Kommunen oder Länder, eine in der Planungsphase schwierige Aufgabe dar, vor allem dann wenn mehrere gleichwertig erscheinende Bauverfahren miteinander

konkurrieren. Grund hierfür ist die Vielfältigkeit der einzelnen Bauverfahren und das heterogene Zusammenspiel von Bau- bzw. Verfahrensweisen sowie ihrem Einfluss auf die Umwelt, welcher auch durch Umweltverträglichkeitsprüfungen oftmals nicht in vollem Umfang abgebildet werden kann. Gerade bei Leitungstunnelbauprojekten wird in der Regel völlig auf die Erstellung von umfangreichen Studien verzichtet. Im ungünstigsten Fall entstehen so verfahrensbedingte, schädigende Einwirkungen auf die Umwelt und Öffentlichkeit, deren Auftreten dem Auftraggeber während der Planungsphase nicht bewusst gewesen ist.

Betrachtet man nunmehr die Dimension eines solchen Infrastrukturprojektes ist die Integration entscheidender Aspekte in eine multikriterielle Umgebung sinnvoll. Gerade vor dem Hintergrund aktueller Probleme, wie bspw. bei der Baumaßnahme Stuttgart 21, ist eine Darstellung des Entscheidungsprozesses zweckmäßig. Eine stärkere Gewichtung ökonomischer Bewertungsverfahren ist deswegen wichtig, weil unterirdische Infrastrukturprojekte zumeist mit Hilfe öffentlicher Mittel realisiert werden. Aus diesem Grund muss die Effektivität solcher großen Baumaßnahmen gewährleistet sein. Die Planung spielt hierbei eine entscheidende Rolle.

Damit der Entscheidungsprozess für die am Projekt beteiligte Gruppen transparent bleibt, sind Entscheidungsmodelle heranzuziehen, die eine Möglichkeit der Darstellung und Analyse von komplexen Entscheidungssituationen geben. Eine solche Lösung erweist sich dennoch als schwierig, da eine einzige Alternative ermittelt werden muss, die alle Beteiligten zufriedenstellen und schließlich umgesetzt werden kann. Aus diesem Grund müssen die Einzelpräferenzen der Projektbeteiligten zu einer Gesamtlösung aggregiert werden. Die üblichen Methoden stoßen jedoch dabei an ihre Grenzen. In der Praxis tritt oftmals der Fall auf, dass Projektbeteiligte den gesamten Entscheidungsprozess nicht mehr nachvollziehen können, da ein Abbild der Realität im Modell nur sehr schwer zu erreichen ist. Aus diesem Grund ist neben der Schaffung eines Entscheidungsmodells die Transparenz des Entscheidungsprozesses zu gewährleisten. Multikriterielle Entscheidungsverfahren basieren zumeist auf mathematische Grundlagen sowie einer stringenten Vorgehensweise, die kaum Fehler zulässt. Dadurch dass die Methodik vorgegeben wird, kann im Nachgang der gesamte Entscheidungsprozess eingesehen werden. Dieser Kontrollmechanismus einer solchen multikriteriellen Methodik fördert die Transparenz der festgelegten Entscheidung.

Gerade im Hinblick auf die erwähnte Transparenz ist unklar, wie Informationen und Daten in ein Entscheidungsmodell integriert werden können. Zusätzlich stellt sich die Frage nach der Aussagekraft eines Entscheidungsergebnisses, was die Bedeutsamkeit einer Alternative darstellen soll. Dieses Ergebnis ist insofern nicht exakt, da ein Entscheidungsträger mit unscharfen und unsicheren Informationen in Form von Risiken und ungenauen Daten konfrontiert wird. Datengrundlagen sowie Meinungen, Einschätzungen und diverse Gutachteraussagen haben stetigen Einfluss auf die Entscheidung. Aus die-

sem Grund ist eine Erweiterung des Entscheidungsansatzes zu verfolgen, welcher die eben genannten Defizite berücksichtigen kann. Auf diesem Wege wäre nicht nur eine Dokumentation der gemachten Entscheidung möglich, sondern es lassen sich Unsicherheiten und Unschärfen lassen sich dann in das Entscheidungsmodell integrieren.

Als problematisch könnte sich schließlich der Aspekt der Handhabung all dieser Daten erweisen. Ein Entscheidungsträger sollte in der Lage sein, mit Hilfe der ihm vorliegenden Methodik sämtliche Daten nutzen und bewerten zu können. Durch die Hinzunahme weiterer Gesichtspunkte wie bspw. Unschärfe und Unsicherheit könnte die Entscheidungsfindung ohne die Nutzung einer adäquaten Software in einen durchaus komplexen Prozess münden. Folglich sollte eine entscheidungsunterstützende Software genutzt werden, um den Bewertungsprozess schnell und zielführend abzuwickeln.

Die Ausführungen verdeutlichen,

- dass ein Defizit bei der Anwendung multikriterieller Entscheidungsverfahren für unterirdische Infrastruktur besteht,
- dass eine ganzheitliche Betrachtung ökologischer, ökonomischer, technischer und sozio-kultureller Aspekte bei einer Projektuntersuchung immer bedeutsamer wird,
- dass multikriterielle Verfahren sich besonders dafür eignen, den Entscheidungsprozess transparent zu gestalten,
- dass unscharfe und unsichere Größen den Entscheidungsprozess effektiver und exakter darstellen können,
- dass verschiedene Entscheiderperspektiven nachvollziehbar integriert werden können,
- dass eine softwaregestützte Entscheidung eine Kontrolle der gemachten Entscheidung ermöglicht, die Transparenz der Ergebnisse sicherstellt und Risiken sowie finanzielle Unsicherheiten steuert.

Aus den dargestellten Ausführungen leitet sich die Zielsetzung der Arbeit ab, die im Folgenden skizziert wird.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung eines multikriteriellen Bewertungsverfahrens für die Wahl eines adäquaten Bauverfahrens im Zuge der Planungsphase einer unterirdischen Infrastruktur. Projektbeteiligten soll das Verfahren helfen, eine bestmögliche Alternative aus einem diskreten Lösungsraum zu finden, welche wiederum auf Basis abgesicherter Erkenntnisse und unter Berücksichtigung verschiedener Projektgruppen hergeleitet werden kann. Dabei soll das noch zu entwickelnde Entscheidungsmodell nicht nur scharfe exakte, sondern auch unscharfe sowie unsichere Daten in Form von Risiken berücksichtigen, um eine Transparenz der Entscheidung gewährleisten zu können.

Zum besseren Verständnis werden die einzelnen Projektziele noch einmal kurz genannt und die wesentlichen Aspekte dargestellt. Im Kern dieser Arbeit steht zunächst die Planung eines unterirdischen Infrastrukturprojektes, wobei davon ausgegangen wird, dass die am Bau beteiligten Projektgruppen einer möglichen Projektumsetzung zugestimmt haben. Durchaus lässt sich die Frage untersuchen, inwiefern ein Projekt realisierbar ist oder nicht. Der Fokus dieser Arbeit beschränkt sich somit darauf, eine Entscheidung hinsichtlich der Wahl eines auszuführenden Bauverfahrens zu unterstützen. Aus diesem Grund herrscht eine gewisse Grundakzeptanz, die ein solches Projekt überhaupt erst ermöglichen kann. Die Wahl eines Bauverfahrens hat jedoch vielfältige Auswirkungen auf das sozio-kulturelle, technische, ökonomische und ökologische Umfeld des gesamten Bauprojektes, da die Konsequenzen grundsätzlich Einfluss auf die einzelnen Projektgruppen haben. Ein Ziel dieser Arbeit ist daher, eine Handlungsalternative wählen zu können, welche das geringste Konfliktpotential bietet.

Um eine Effizienzsteigerung in der Planung von unterirdischer Infrastruktur zu erlangen, sind Analysen mit multikriteriellen Entscheidungsverfahren vorgesehen. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Wertvorstellungen einzelner Projektgruppen darstellen. Ein anderer Aspekt ist die Integration von Projektdaten, die zur Verfügung gestellt werden. Daten können durch einen Entscheider unterschiedlich behandelt werden. Bspw. unterliegen die Kosten verschiedenen Streuungen, da Kosten zu einem sehr frühen Stadium nicht exakt vorhergesagt werden können. Daten könnten bspw. nur linguale vorliegen, so dass eine gewisse Unschärfe noch berücksichtigt werden muss. Diese attributiven Informationen können einen erheblichen Anteil der Entscheidung ausmachen, so dass eine Berücksichtigung zwingend notwendig erscheint. Zur Erreichung dieser Ziele können verschiedene Zielsetzungen genannt werden. Insgesamt lassen sich folgende Arbeitsziele nennen:

- Beschreibung und kritische Analyse des Planungsprozesses von Großvorhaben,
- Beschreibung der entscheidungstheoretischen Grundlagen,
- Beschreibung der unscharfen und unsicheren Informationen bei Entscheidungen,
- Auswahl und Darstellung eines multikriteriellen Verfahrens zur Entscheidungsanalyse für unterirdische Infrastruktur,
- Darstellung von Methoden zur Erfassung unsicherer und unscharfer Eingangsgrößen,
- Erarbeitung eines Entscheidungsmodells unter Berücksichtigung ganzheitlicher Kriterien,
- Analyse eines konkreten Entscheidungsprozesses unter Berücksichtigung des ganzheitlichen Entscheidermodells,

- Variation der Präferenzen des Entscheiders und Ermittlung von verschiedenen Handlungsalternativen unter Berücksichtigung von Sensitivitätsanalysen.

Zur Erreichung dieser Zielsetzungen sind folgende Arbeitsschritte notwendig, welche kurz vorgestellt werden.

- Die Analyse des Planungsprozesses eines unterirdischen Infrastrukturprojektes soll mit einem multikriteriellen Entscheidungsverfahren durchgeführt werden, so dass die wesentlichen Grundlagen der Entscheidungstheorie dargestellt werden.
- Es soll gezeigt werden, wie unscharfe und unsichere Daten mit Hilfe von Fuzzy- und statistischen Verteilungsfunktionen den Entscheidungsprozess verbessern.
- Die grundlegenden Kriterien für einen Entscheidungsprozess unterirdischer Infrastruktur werden zusammengefasst und hierarchisch gegliedert.
- Eine Software soll den Entscheidungsprozess unterstützen.
- Abschließend wird eine Analyse an einem konkreten Entscheidungsprozess durchgeführt, so dass ein Vergleich der unterschiedlichen Entscheidungen erfolgen kann.

2 Planungsablauf eines klassischen unterirdischen Infrastrukturprojektes

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Verfahrensebenen, Planungsstufen sowie deren Entscheidungsinhalte beim Bau eines unterirdischen Infrastrukturprojektes beschrieben und mit dem Ziel kritisch hinterfragt, den derzeitigen Planungsablauf mit Hilfe entscheidungstheoretischer Grundlagen effektiver zu gestalten.

2.1 Grundlegende Informationen

Unter Berücksichtigung der HOAI [34], der DIN 276-1 ‚Kosten im Bauwesen‘ [51] sowie der DIN 18960 ‚Nutzungskosten im Hochbau‘ [54] sollen die einzelnen Phasen der gesamten Projektplanung zunächst genauer beschrieben werden. Der Planungsprozess unterirdischer Infrastruktur stellt einen wichtigen Bestandteil dar, so dass der Bau stets in der gesamten Verkehrswegeplanung Berücksichtigung findet. Weiterhin wird der Planungsprozess am Beispiel von Tunnelbauwerken gezeigt, da bei solchen Bauvorhaben grundsätzlich viele verschiedene rechtliche und organisatorische Randbedingungen betrachtet werden, welche wiederum bei einem Leitungstunnelbauwerk nicht im Vordergrund stehen.

Generell ist es in der Verkehrspolitik wichtig, eine umweltorientierte und sichere Mobilität zu gewährleisten. Dazu gehört auch, dass eine Planung mit den im Fernstraßen- und Landesstraßenbaugesetz enthaltenen Bedarfsplänen beginnt [25]. Die vorgenommene Feststellung des Bedarfs ist die Grundlage für jeden Neu- und Ausbau von Bundesfernstraßen und somit verbindlich für die Linienbestimmung und die Planfeststellung eines Projektes. Ziel des Planungsablaufs ist es, die Baugenehmigung durch eine Reihe von technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Lösungen zu erlangen. Hat der Träger einer Maßnahme das Baurecht erlangt, kann er sein Bauvorhaben auf Basis der genehmigten Unterlagen errichten lassen.

Der Planungsprozess für verkehrliche Infrastrukturprojekte durchläuft generell mehrere Stufen. Dabei nimmt die Maßstabebene, d.h. der Tiefgang der Untersuchungen, mit jeder Planungsebene zu. Maßgebliche Vorgaben werden bereits im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung und des Raumordnungsverfahrens [28] getroffen, so dass mit dem anschließenden Planfeststellungsbeschluss dem Vorhabenträger das Recht verliehen wird, das Vorhaben umzusetzen und zu bauen. In folgender Tabelle 1 sind die einzelnen Verfahrensebenen inklusive der Entscheidungsinhalte kurz zusammengefasst. Die einzelnen Schritte werden in den nächsten Abschnitten noch näher erläutert.

Verfahrensebenen	Planungsstufe	Entscheidungsinhalte
Bedarfsplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Vorbereitung des Bundesverkehrswegeplans • Projektmeldungen • Aufstellung von Bedarfsplänen, Ausbaugesetze Straße und Schiene 	<ul style="list-style-type: none"> • Bedarfsentscheidung über Zielnetze, die aus gesamtwirtschaftlich vorteilhaften Neu- und Ausbauprojekten bestehen
Raumordnung	<ul style="list-style-type: none"> • Voruntersuchungen, Erstellung der Raumordnungsunterlagen • Raumordnungsverfahren • Linienbestimmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Voruntersuchungen • Raumordnerische Verträglichkeit • Umweltverträglichkeitsprüfungen • Verlauf und grundsätzliche technische Ausführungsmerkmale • Trassen- bzw. Standortvariantenvergleich
Zulassung	<ul style="list-style-type: none"> • Entwurfsplanung • Genehmigungsplanung • Erstellung Planfeststellungsgrundlage • Planfeststellungsverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorentwurf, Feststellungsentwurf der Vorzugsvariante • Festlegung von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen • Umfassende materielle Rechtmäßigkeit
Bau	<ul style="list-style-type: none"> • Ausführungsplanung • Bauausführung 	<ul style="list-style-type: none"> • Weitere Details der Bauausführung • Technische Details der Bauausführung

Tabelle 1: Verfahrensebenen beim Bau von Verkehrswegeprojekten, nach [31]

2.1.1 Bedarfsplanung

Ein Verkehrsvorhaben wird im Allgemeinen in Anlehnung an die DIN 18205 'Bedarfsplanung im Bauwesen' [53] realisiert. Der Bedarfsplan stellt bei der Planung von Bundesfernstraßen und Eisenbahnen die Grundlage für solche Entscheidungen dar, wobei der Verkehrswegebau im Zusammenhang mit anderen staatlichen Aufgaben auf hoher politischer Ebene gewichtet und in Dringlichkeitsstufen eingeteilt wird. Handelt es sich bspw. um große Infrastrukturprojekte, so werden vor Beginn des Planfeststellungsverfahrens weitreichende Vorentscheidungen getroffen, an denen verschiedene Planungsträger beteiligt sind. Die Bedarfsplanung nach DIN 276-1 wird mit der Ermittlung eines ersten Kostenrahmens beendet [52].

Grundsätzlich stellt die Bedarfsplanung die Planungsstufe dar, in welcher lediglich der Bedarf an neuen Verkehrsprojekten geklärt wird. Eine intensive Betrachtung in dieser Phase ist dabei noch nicht vorgesehen, so dass entscheidungsrelevante Aspekte wie die Wahl des Bauverfahrens zu diesem Zeitpunkt noch nicht erörtert werden.

2.1.2 Raumordnung

Die gesamte Phase der Raumordnung unterteilt sich in mehrere einzelne Verfahren, die teilweise parallel durchgeführt werden. Wie bereits in Tabelle 1 gezeigt, umfasst die Phase der Raumordnung neben klassischen Voruntersuchungen das Linienbestimmungs- sowie Raumordnungsverfahren. Bezogen auf die HOAI-Phasen umfasst die Phase der Raumordnung u.a. die Grundlagenermittlung, in welcher die konkrete Aufgabenstellung sowie die erforderlichen Planungsleistungen geklärt werden. Beispielsweise werden in dieser frühen Phase nicht nur erstmalig erste Untersuchungen hinsichtlich des Baugrundes oder Baufeldes sondern auch grobe Kostenschätzungen, die entweder unter Zuhilfenahme von früheren Projekten oder Indexwerten, durchgeführt.

Wird der Untersuchungsrahmen genauer, bspw. bei der Untersuchung alternativer Lösungsmöglichkeiten wie Trassen- aber auch Tunnelvarianten, befindet man sich im Normalfall in der zweiten HOAI-Leistungsphase (Vorplanung) [34]. Im Zuge dieser Phase beschäftigen sich Planer mit der Erstellung erster Zeichnungen sowie Verhandlungen mit Fachbehörden bzgl. einer möglichen Genehmigung des Projektes. Darüber hinaus spielt in dieser Phase auch die Erstellung eines Umweltverträglichkeitsberichtes im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) eine wichtige Rolle. Zusätzlich werden technische, ökonomische und soziale Entscheidungen getroffen, die Einfluss auf die verschiedenen Varianten haben können. Diese Phase behandelt neben exakteren Kostenschätzungen auch die Erstellung von Nutzen-Kosten-Berechnungen, wobei Kosten bis zur ersten Gliederungsebene nach DIN 276-1 zu berechnen sind [28].

2.1.2.1 Raumordnungsverfahren

Im Raumordnungsverfahren wird das geplante Vorhaben mit den Erfordernissen der Raumordnung und mit anderen raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen abgestimmt. Dabei werden frühzeitig Trassenalternativen, aber auch Ausführungsvarianten (Brücke oder Tunnel) abgeklärt. Das Raumordnungsverfahren hat die Aufgabe festzustellen, ob die raumbedeutsamen Planungen mit den Zielen der Raumordnung und Landesplanung übereinstimmen [28, § 15]. Sollte ein Vorhaben Einfluss auf die Umwelt haben, einen enormen Platzbedarf aufweisen oder das Gebiet mehrerer Gemeinden betreffen, dann müssen diese Einflüsse geprüft bzw. eingeschätzt werden [46]. Die Rechtsprechung verlangt nicht, alle einbezogenen Alternativen gleichermaßen detailliert und umfassend zu untersuchen. Die Prüfungsintensität soll sich auf die positiv beurteilten Alternativen konzentrieren.

Während die Raumordnung Aufgabe der Länder ist, ist das Raumordnungsverfahren ein behördliches Verfahren, an dem Bund, Land und betroffene Gemeinden beteiligt sind. Das Verfahren lässt sich in drei Phasen aufteilen [46]:

In **Phase 1** wird geprüft, ob das Raumordnungsverfahren durchgeführt und angeordnet werden muss. Gegenstand des Raumordnungsverfahrens sind grundsätzlich alle raumbedeutsamen Einzelvorhaben von überörtlicher Bedeutung (z.B. Inanspruchnahme von Raum oder Beeinflussung der räumlichen Entwicklung oder Funktion eines Gebietes).

In **Phase 2** werden zunächst alle einzubeziehenden Personen, Gruppen, Projektbeteiligte und Organisationen ermittelt, benachrichtigt und beteiligt. Die Öffentlichkeit kann darüber hinaus in die Durchführung eines Raumordnungsverfahrens mit einbezogen werden. Im Interesse einer besseren Akzeptanz eines Vorhabens, welches erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten lässt, sehen die meisten Landesplanungsgesetze eine Einbeziehung der Öffentlichkeit vor. Privatpersonen haben auch die Gelegenheit an dem Raumordnungsverfahren teilzunehmen und können sich schriftlich bei den Gemeinden äußern.

In **Phase 3** werden die Ergebnisse der raumordnerischen Beurteilung präsentiert. Die Behörde entscheidet, ob das Bauvorhaben den Erfordernissen der Raumordnung entspricht und stimmt diese mit anderen raumbedeutsamen Planungen ab.

Das Raumordnungsverfahren beinhaltet darüber hinaus in der Regel auch die erste Stufe der Umweltverträglichkeitsprüfung des Vorhabens. Die Umweltverträglichkeitsprüfung ist also nicht als eigenständiges Verfahren ausgestattet. Sie bildet nach § 2 Abs. 1 Satz 1 UVPG einen selbständigen Teil des jeweiligen Planverfahrens [27, §2]. Entsprechend dem Planungsstand werden die Auswirkungen des Vorhabens auf verschiedene Umweltbelange ermittelt und beschrieben. Dabei erfolgt bereits auch eine Öffentlichkeitsbeteiligung. Das Raumordnungsverfahren endet mit der so genannten landesplanerischen Beurteilung oder raumordnerischen Entscheidung [27].

2.1.2.2 Linienbestimmungsverfahren

Die Linienbestimmung gemäß § 16 Bundesfernstraßengesetz [25, §16] legt die Anfangs- und Endpunkte sowie den grundsätzlichen Verlauf und die ungefähre Lage der Trasse zu den betreffenden Ortschaften, Natur-, Landschafts- oder Wasserschutzgebieten fest. Nach Abwägung aller öffentlicher Belange der landesplanerischen Beurteilung und der Umweltverträglichkeit wird die bevorzugte Trasse im Rahmen des Linienbestimmungsverfahrens zugrunde gelegt, verfeinert und zu einer Linie entwickelt, welche für die weitere Planung maßgebend ist. Die Entscheidung über die endgültige Linie trifft das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Der Abschluss des Verfahrens ist ein Erläuterungsbericht, in dem die Gründe für die Wahl der Linie dargestellt werden. Wichtige Aspekte eines solchen Verfahrens können nach [194] wie folgt zusammengefasst werden:

- verkehrliche und raumordnerische Bedeutung des Vorhabens;
- bestehende und zu erwartende Verkehrsverhältnisse, Verkehrs- und Streckencharakteristik, Lage im Straßennetz und raumordnerische Bedeutung;
- planerische Vorgeschichte;
- Variantenvergleich, wie bspw. Beschreibung der Varianten, Machbarkeitsstudie, Länge und Kosten der Varianten, Entlastungseffekte;
- Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsstudie: Beschreibung und Bewertung der Auswirkungen des Vorhabens auf die Schutzgüter des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG);
- Vergleich aller entscheidenden Punkte, um die Wahl der Variante nachvollziehbar zu gestalten;
- Darstellung der gewählten Linie: Trassenverlauf, Trassierungsquerschnitte, Querschnitt, Ingenieurbauwerke, Baugrunduntersuchungen, Netzverknüpfungen und die grob geschätzten Kosten.

Betrachtet man das gesamte Linienbestimmungsverfahren, so fällt auf, dass in dieser Phase Ergebnisse aus den verschiedenen Untersuchungen zusammengeführt werden. Insbesondere in der Varianten- sowie Machbarkeitsstudie werden offene Fragen bzgl. des zu wählenden Bauverfahrens geklärt, ohne jedoch detailliert auf die einzelnen Bauverfahren einzugehen.

2.1.2.3 Kriterien im Zuge der Variantenstudie

Zur Analyse der einzelnen Projektvarianten im Zuge des Linienbestimmungsverfahrens sind auch die auftretenden Fragen hinsichtlich der Ausführung der Tunnelvarianten von entscheidender Bedeutung. Ziele, Randbedingungen, Kriterien sowie detaillierte Strukturierungen sowie Beurteilungen werden hinsichtlich der einzelnen Varianten untersucht, wobei der Fokus nicht nur auf die Linienführungen sondern auch auf die technische Machbarkeit der Tunnel gelegt wird. Nach der HOAI werden bzgl. der Untersuchung von Lösungsmöglichkeiten mit ihren Einflüssen auf bauliche und konstruktive Gestaltung, Zweckmäßigkeit, Wirtschaftlichkeit unter Beachtung der Umweltverträglichkeit und der Ziele der Raumordnung verschiedene Faktoren betrachtet [34]. Somit ergibt sich eine Vielfalt von möglichen Varianten, so dass eine unumgängliche Variantenstudie benötigt wird. Die Ergebnisse bzw. Untersuchungen im Rahmen dieser Variantenstudie können im Nachhinein auch für die Erstellung der Kriterien genutzt werden, welche wiederum in das in dieser Arbeit noch zu entwickelnde Entscheidungsmodell implementiert werden können. Für die Variantenstudie sind dabei verschiedene Kriterien wichtig, die im Folgenden dargestellt werden und für die gesamten Trassenvarianten gelten, jedoch auch zur technischen Machbarkeit der Tunnelvarianten herangezogen werden können. Zu beachten ist, dass keine Vorgaben existieren, die vorschreiben, welche Kriterien genau zu

untersuchen sind. In dieser Arbeit werden demzufolge maßgebende Kriterien entwickelt und vorgestellt. Nochmals sei erwähnt, dass folgende Kriterien für die Wahl einer Variante genutzt werden, welche ohnehin zeitlich vor der Wahl eines Bauverfahrens stattfindet:

Geologie

Die Zusammensetzung und Struktur der Böden muss aus den verschiedenen Untersuchungen zunächst analysiert werden, wobei Entstehungsgeschichte, Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Bodens sowie die Wasserdurchlässigkeit von Beginn an berücksichtigt werden müssen. Die Baukosten können bei Lockergestein oder ungünstig ausgebildetem Fels ein Mehrfaches des bei günstigen geotechnischen Randbedingungen erforderlichen Betrages erreichen. Von den zahlreichen beeinflussenden Faktoren haben die geologischen Eigenschaften den größten Einfluss auf die Wahl des Bauverfahrens. Die erforderlichen Sicherungsmaßnahmen reduzieren sich im Allgemeinen mit Zunahme der Festigkeit. Folglich sind bei Lockergesteines aufwändigere Vortriebs- und Sicherungsmaßnahmen erforderlich, die ebenfalls Einfluss auf das Bauverfahren haben. Erste Entscheidungen für die Wahl geeigneter Kriterien können aus den einzelnen Bodengutachten gewonnen werden.

Trassenlage und Tunnellänge

Die Trasse richtet sich nach den anstehenden Verkehrs- und Transportbedürfnissen. Eine Vermeidung von geologisch schwierigen Zonen sowie längeren Strecken spielen in der Wirtschaftlichkeit der Tunnel eine entscheidende Rolle, so dass es wichtig ist, die kürzeste und möglichst gerade Strecke zu wählen. Die Wahllinie wird, wie zuvor gezeigt, im Linienbestimmungsverfahren festgelegt, kann jedoch im Laufe der Planung noch einige Änderungen erfahren. Trassenlage sowie Inanspruchnahme von Fremdgelände haben einen sehr hohen Stellenwert in der Beurteilung von Varianten. Werden die spezifischen Rohbaukosten je Tunnelmeter betrachtet, nehmen diese mit der Tunnellänge ab, da sich der Anteil der von der Länge weitgehend unabhängigen Baukosten (nichtlineare Kostenanteile) verringert (siehe Abbildung 1).

Mit zunehmender Länge fallen aber auch zusätzliche Aufwendungen für bauliche Sicherheitseinrichtungen an. Insbesondere Tunnelbauwerke mit einer Länge von mehr als 400 m verursachen erhöhte Kosten durch die daraus resultierenden erforderlichen Sicherheitseinrichtungen (z.B. Flucht und Rettungswege). Die baulichen Anforderungen an die Sicherheitseinrichtungen wie auch die erforderliche sicherheitstechnische Ausstattung sind in Abhängigkeit der Tunnellänge festgelegt [29] [68] [81].

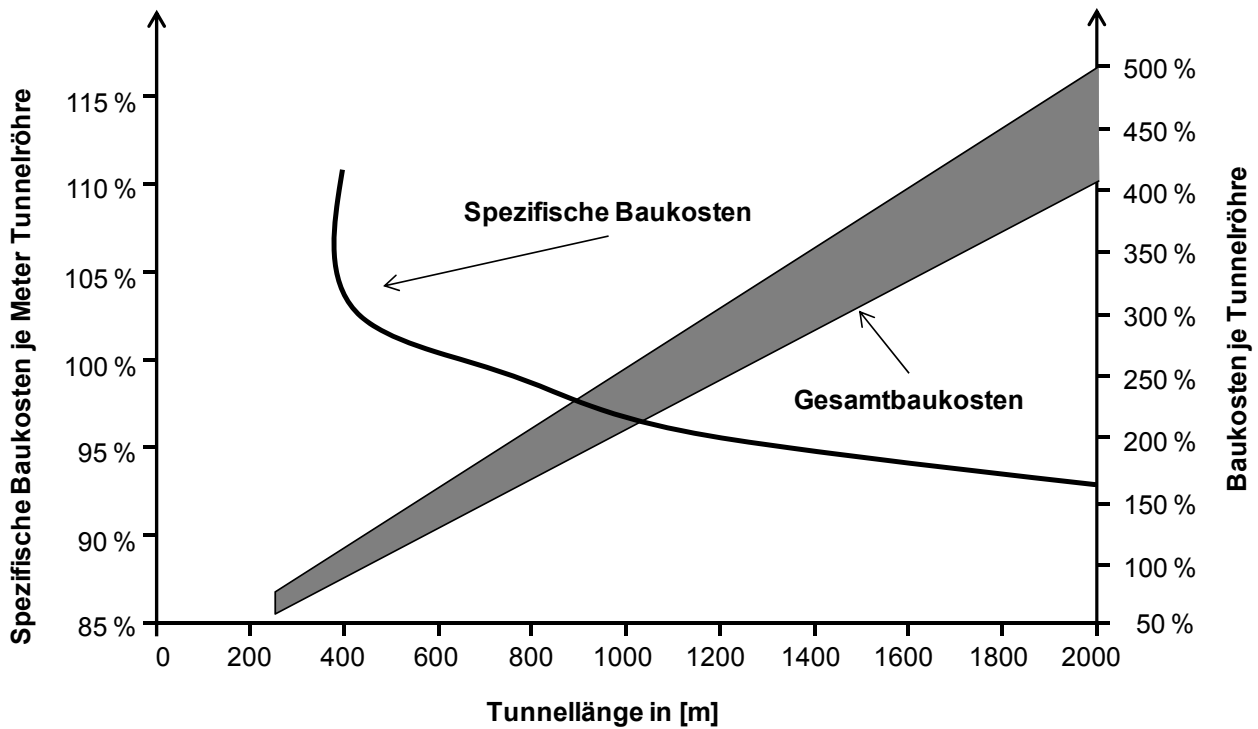


Abbildung 1: Spezifische Baukosten zu Gesamtbaukosten, nach [81]

Tunnelquerschnitt

Die Gestaltung von Tunnelquerschnitten hängt von den verschiedenen Regelwerken ab, die genaue Angaben zu Planungs-, Realisierungs- und Betriebsphase machen. Tunnel müssen hinsichtlich örtlicher Gegebenheiten geplant werden. Dazu wird zwischen Bahn-, U-Bahn-, Straßen- und Versorgungstunnel unterschieden. Die maßgeblichen Unterschiede finden sich z.B. in der Größe und Form des Querschnitts sowie der Betriebs- und Sicherheitstechnik wieder. Darüber hinaus hat die Form des Tunnelquerschnitts erhebliche Auswirkungen auf Initial- sowie Folgekosten. Je nachdem mit welchem Bauverfahren der Tunnel hergestellt wird, muss die Ausstattung der Röhre auf eine andere Art und Weise erfolgen [68] [24] [49]. Ein Beispiel dazu: Versinterungserscheinungen und Ablagerungen in den Drainageleitungen von drainierten Bauwerken können einen enormen Spülaufwand zum Entfernen der Ablagerungen erfordern, der einen nicht unerheblichen Teil der Wartungs- und Instandhaltungskosten ausmacht. Im Vergleich hierzu kommen rundum abgedichtete Tunnel zwar ohne derlei Wartungszyklen aus, sind jedoch in der Herstellung deutlich kostenintensiver. Über den gesamten Lebenszyklus hinweg gelten drainierte Bauwerke daher zwar i.d.R. als kostengünstiger, das Verhältnis kann aber im Falle starker Versinterungen und schlechter Wartung zu Gunsten der druckwasserhaltenden Bauwerke kippen [178].

Bauverfahren

Die Wahl des Bauverfahrens ist im Rahmen der klassischen Variantenstudie abhängig von Kriterien wie Bodenverhältnissen, Grundwasserverhältnissen, Topographie und verkehrstechnische Randbedingungen sowie von der vorhandenen Bebauung und den ökologischen Randbedingungen.

Ist die offene Bauweise anwendbar, dann ist sie häufig günstiger als die geschlossene Bauweise, wenn nur die Baukosten betrachtet werden. Kostensenkungen werden am einfachsten durch Böschungen erreicht, indem eine geböschte Baugrube ausgehoben und in dieser das Tunnelbauwerk erstellt wird. Zur Begrenzung der Aushubmenge oder aus Platzmangel in städtischen Gebieten werden die Baugruben allerdings mit Verbaukonstruktionen gesichert. Diese Verbaukonstruktionen können nach Fertigstellung des Tunnels zurückgebaut (z.B. Trägerbohlwände, Spundwände) oder in das Bauwerk integriert werden (z.B. Schlitzwände, Bohrpfahlwände). Ein wesentlicher Vorteil ist die freie Wahl des Querschnittes sowie die Konstruktion größerer Bahnhöfe. Eine Bindung der Trasse am Straßenverlauf ist notwendig, was Schwierigkeiten bei der Einhaltung von Trassierungselementen und eine erhebliche Störung des Oberflächenverkehrs (Umleitungen) verursacht. Außerdem ist diese Bauweise bei großer Tiefenlage unwirtschaftlich. Ökologische Beeinträchtigungen können dabei während der Bauzeit ebenfalls groß sein (z.B. Grundwasserabsenkungen, Lärmbelästigung).

Probleme wie die Einhaltung von Trassierungselementen oder die Störung des Oberflächenverkehrs sind im Zuge der Planung von Bauverfahren in geschlossener Bauweise teilweise nicht vorhanden. Außerdem kann eine Grundwasserabsenkung umgangen und die Umweltbelästigung reduziert werden. Diese Bauweise erfordert einen größeren Aufwand während der Einarbeitungs- und Planungsphase, da die technischen Herausforderungen die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Projektes positiv beeinflussen. Wechselnde Geologie wie auch das Unterfahren von bestehenden Infrastrukturen (z.B. Sicherungsmaßnahmen zum Schutz der bestehenden Bebauung) können ein Leistungsrisiko darstellen. Die Kosten durch den Grunderwerb werden auch deutlich beeinflusst.

Ein Vergleich von Vor- und Nachteilen der Leistungsfähigkeit der Bauweise sowie der geplanten Vortriebsverfahren ist unabdingbar. Die Abbildung 2 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Kosten, Tunnellänge und Vortriebsverfahren für eine geschlossene Bauweise. Zu erkennen ist, dass bei geringer Tunnellänge maschinelle Verfahren nicht zu empfehlen sind, da die Kosten pro Meter höher sind als bei konventionellen Verfahren. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass Tunnelbohrmaschinen grundsätzlich für einen Tunnel erst gefertigt werden müssen, so dass bereits die Fixkosten eine sehr hohe Position darstellen.

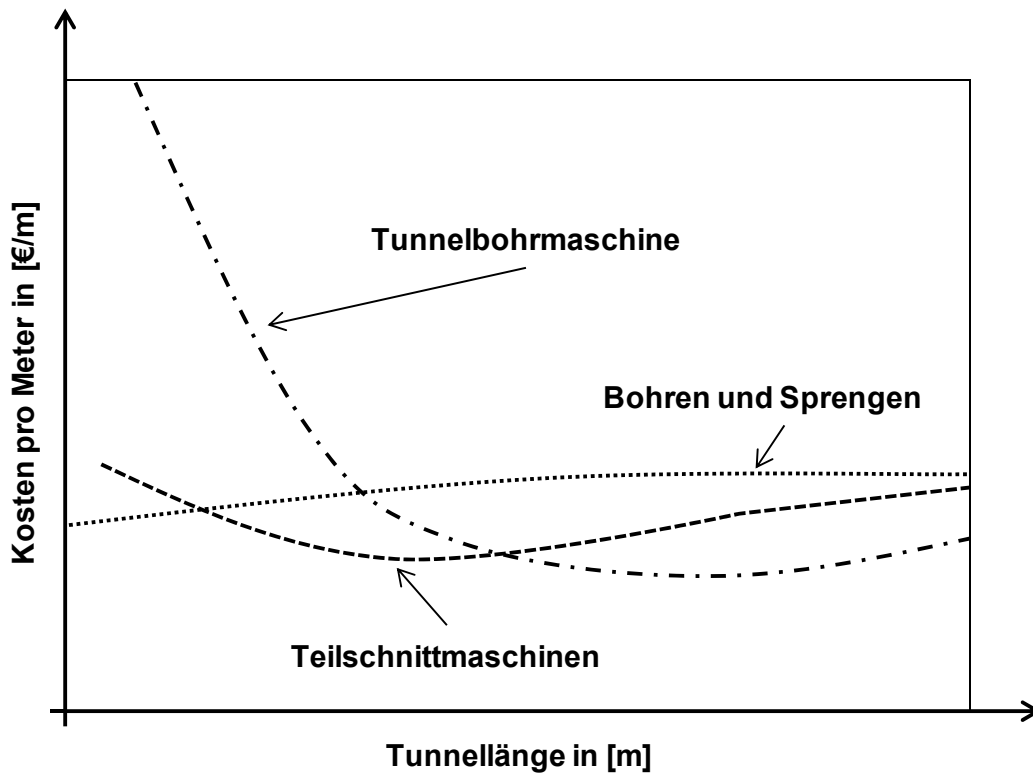


Abbildung 2: Zusammenhang Kosten, Tunnellänge und Vortriebsverfahren, nach [107]

Kostenschätzung

Wichtig für die Variantenstudie ist eine möglichst detaillierte Erfassung der Rohbaukosten, um eine genaue Kostenschätzung zu ermitteln. Kostenschätzungen sind eine wichtige Grundlage für Planungs- und Ausführungsentscheidungen bei der Vorplanung. Zur Ermittlung der Kosten können verschiedene Methoden verwendet werden, die in folgender Abbildung 3 kurz dargestellt sind und im Anschluss nach [155] erklärt werden.

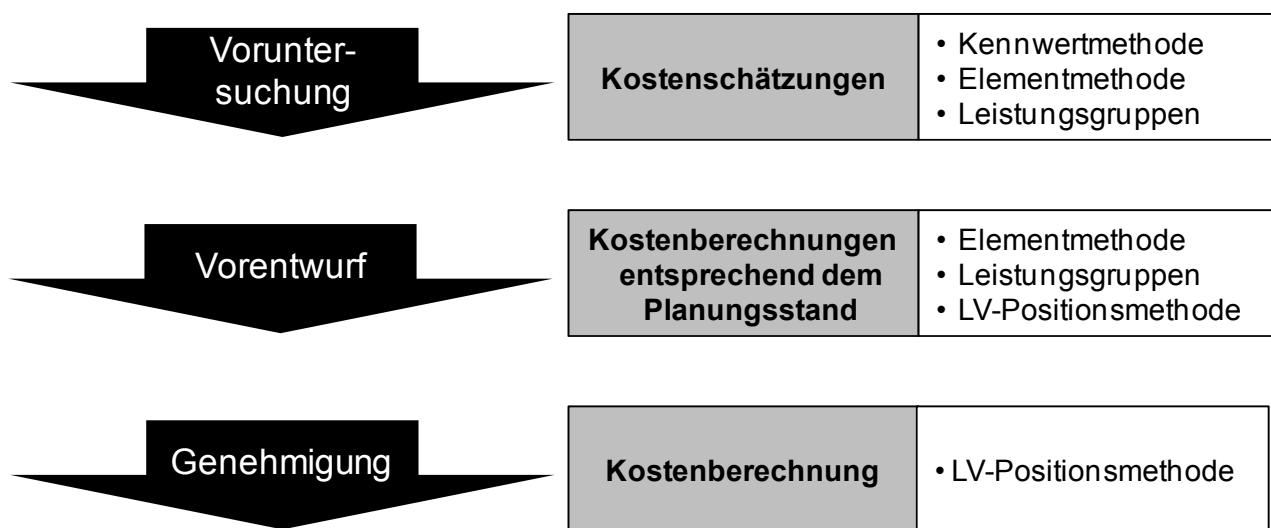


Abbildung 3: Methoden der Kostenermittlung, nach [155]

Der Kennwertmethode basiert auf veröffentlichten Baukostenkennwerten (Länge, Fläche, Kubatur) und ist für die frühen Phasen eines Projekts am besten geeignet. Baukostenkennwerte werden aus schlussabgerechneten Projekten ähnlicher Art abgeleitet und bzgl. Faktoren wie Geologie, Nutzungsart, Standort, Bauwerksgeometrie oder Ausbaustandard ausgewählt. Bei Verwendung älterer Daten ist die Preissteigerung jedoch zu berücksichtigen.

In der Leistungsgruppenmethode wird eine Unterteilung des Projekts in Bauabschnitte oder Bauteile empfohlen, wobei z.B. für Tunnel Abschnitte mit ähnlichen Löseverhalten oder ähnlichen Gebirgseigenschaften in Vortriebsabschnitte unterteilt werden können. Es sollten Planungsunterlagen aus den Ergebnissen der Vorplanung, wie bspw. zeichnerische Darstellungen vorliegen sowie erläuternde Angaben zu den planerischen Zusammenhängen vorhanden sein. Zweck dieser Methode ist, Kosten auf Leistungsgruppen, die (z.B. im Tunnelbau) die Laufmeterkosten für Ausbruch und Stützung oder Innenschale bzw. Tübbinge beinhalten können, zu beschränken. Diese Kennwerte werden als leistungsgruppenbezogene Kennwerte bezeichnet.

Sollten im Rahm der Leistungsgruppenmethode die Berechnungen der Kosten noch weiter detailliert werden, so eignet sich hierfür die LV-Positionsmethode. Es hat sich für den Spezialtief- und Tunnelbau als zweckmäßig erwiesen, wenn für die Kostenermittlung die LV-Positionsebenen herangezogen werden.

Die Elementmethode wird als eine relativ komplexe Berechnungsart beschrieben, kann aber auch durch eine korrekte und sinnvolle Ausführung sehr gute Ergebnissen liefern. Ähnlich wie bei der Leistungsgruppenmethode ist eine detaillierte Planung mit entsprechender Beschreibung der Qualitäten erforderlich, um somit die einzelnen Elementmengen zu ermitteln. Für die Berechnung über elementbezogene Baukostenkennwerte wird empfohlen, einen Elementkatalog zu erstellen, in dem für jedes Element die Baukostenkennwerte vorgehalten werden können. Für jedes Element werden Mengen ermittelt, die als Grundlage für die Berechnung dienen. Es erfolgt eine Darstellung der Datengrundlage wie auch eine Zusammenfassung der Recherchen und Geländebefunde. Alle zu prüfenden Varianten werden mithilfe geologischer Karten soweit wie möglich modelliert und die Primärdaten der geologischen Karte darauf übertragen. Die möglichen Linienvarianten werden als Gegenstand eines Bewertungsdurchgangs so lange optimiert und bewertet, bis die ungünstigen Varianten von der weitergehenden Betrachtung ausgeschlossen werden können.

2.1.2.4 Machbarkeitsstudie

Eine zusammenfassende und vergleichbare Gegenüberstellung und Bewertung der Varianten bzgl. Ziele, Randbedingungen sowie Technik und Risiko ist ein wichtiger Schritt in der Planung eines Verkehrswegeprojektes (synoptische Gegenüberstellung). Durch eine strukturierte Darstellung der Bewertungskriterien und einer überlegten Abwägung der

einzelnen Aspekte kann eine sinnvolle Entscheidung herbeigeführt werden. Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse werden zusammenfassend Bewertungskriterien entwickelt, um eine Vergleichbarkeit der Varianten zu gewährleisten. Die Kriterien können folgende Ergebnisse beinhalten: Technisches Risiko bzw. Baugrundrisiko, Auswirkungen auf Anwohner sowie angrenzende Bebauung, Auswirkungen auf den Verkehr, Umweltauswirkungen (bau-, anlagen- und betriebsbedingt), Bauzeit sowie Baukosten (Lebenszykluskosten).

Zur Bestimmung einer Bestvariante ist ein Variantenvergleich der zuvor entwickelten Planungskonzepte und –alternativen anhand vorgegebener Ziele und daraus abgeleiteter Bewertungsmaßstäbe vorzunehmen. Auf welche Weise die Bewertungs- und Gewichtungskriterien erfolgen, ist vom Entscheider abhängig, da die Anwendung bestimmter Bewertungs- und Entscheidungsmethoden nicht verbindlich vorgegeben ist. Im Normalfall werden die Trassenvarianten hinsichtlich der Kriterien zunächst einzeln ausgewertet und zusammengefasst. Bei der Bewertung werden die im 'Leitfaden für die Planungsentscheidung Einschnitt oder Tunnel' [33] vom Bundesministerium für Verkehr angegebenen Hinweise sinngemäß übertragen und angewendet. Für eine Variantenempfehlung sind kombinierte Verfahren aus Nutzwertanalyse und Kapitalwertmethode die Regel, da sich bei dem Vergleich verschiedener Lösungen zwar einige Kosten bzw. Nutzen direkt oder indirekt monetär bewerten lassen.

Es ist wichtig, die Vor- und Nachteile der Alternativen zu gewichten und zusammenzufassen, so dass die Bewertungskriterien in jedem Falle untereinander in Beziehung gesetzt werden können [36, S.148]. Die geforderte Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Bewertungsmethodik ist dennoch nicht gegeben. Wie bereits in den vorherigen Abschnitten beschrieben, ist es notwendig, die Bewertung für alle Projektbeteiligten nachvollziehbar zu gestalten, was mit der Implementierung und gleichzeitig zu berücksichtigenden qualitativen und quantitativen Bewertungskriterien ermöglicht werden sollte.

2.1.3 Vorentwurfsphase und Planfeststellungsverfahren

2.1.3.1 Erstellung eines Vorentwurfs für das Planfeststellungsverfahren

Der Vor- sowie Genehmigungsentwurf stellt in der Planung des Bauvorhabens den nächsten Schritt dar, wobei der Vorentwurf die Grundlage für die Entwurfs- und Genehmigungsplanung (dritte und vierte Leistungsphase der HOAI) bildet [34]. Der Umfang und die Genauigkeit der Beurteilung verschiedener Lösungen nehmen in dieser Phase zu, so dass durch neuere Ergebnisse oder Bewertungen die Entscheidungen vorausgegangener Planungen geändert werden können.

Wie bereits beschrieben, sind spätere Korrekturen der Planung nur noch in eng begrenztem Maße möglich. Insbesondere aus genehmigungsrechtlichen Gründen sind die Entscheidungen und detaillierten Untersuchungen sowie Kostenberechnungen und Kosten-

kontrollen in dem Vorentwurf von wesentlicher Bedeutung. Basierend auf den Leistungen im Leistungsbild Ingenieurbauwerke und im Leistungsbild Verkehrsanlagen der HOAI lässt sich die Phase Vorentwurf in folgender Abbildung 4 kurz zusammenfassen. Eine ausführliche Erklärung erfolgt im Anschluss.

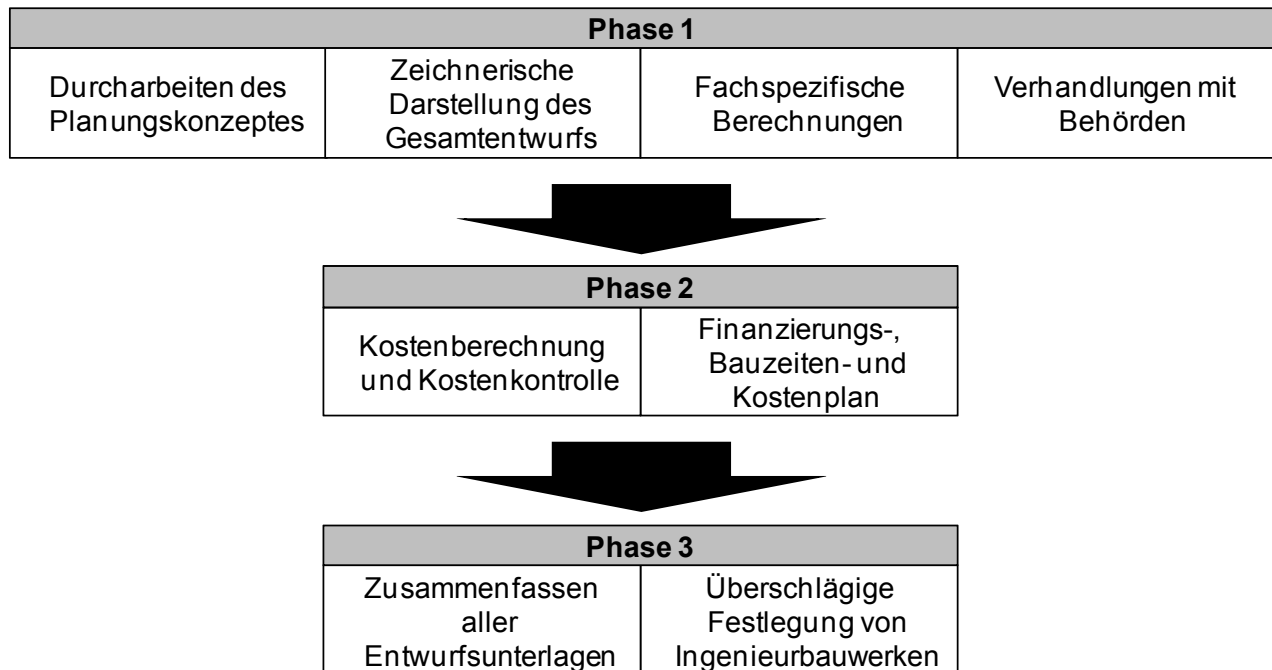


Abbildung 4: Verfahrensschritte im Rahmen der Leistungsphase 3: Vorentwurf, nach [34]

2.1.3.2 Ablauf der Vorentwurfsplanung

Phase 1

- Eine stufenweise Durcharbeitung des Planungskonzeptes, in dem die Tragwerklösungen und Abmessungen unter Berücksichtigung aller fachspezifischen Anforderungen und Beiträge aller fachlich Beteiligten zusammen betrachtet werden;
- Eine Überarbeitung des vorläufigen Entwurfs, aufgrund von Bedenken und Anregungen (z.B. landesplanerische Beurteilung, UVS Phase II) sowie Verhandlungen mit Behörden und anderen an der Planung Beteiligten über die Genehmigungsfähigkeit des Vorhabens;
- Ein Erläuterungsbericht mit fachspezifischen Berechnungen (ausgenommen Berechnungen des Tragwerks) und zeichnerischen Darstellungen des Gesamtentwurfs.

Phase 2

- Entsprechend dem Planungsstand müssen Kostenberechnungen durchgeführt und aufgebaut werden, damit aussagekräftige Vergleiche in mehrere Richtungen möglich sind. Mit LV-positionsbezogenen Baukostenkennwerten sollen in einer Leistungsgrup-

pe die Berechnungen detailliert werden, um somit eine Kostenoptimierung sowie einen Vergleich der Kostenberechnungen mit Kostenschätzungen zu ermöglichen [155].

- Finanzierungsplan, Bauzeiten- und Kostenplan sowie Begründungen der zuwendungsfähigen Kosten und Anträge auf Finanzierung;

Phase 3

- Zusammenfassen aller Entwurfsunterlagen [34]
- Mitwirken beim Erläutern des vorläufigen Entwurfs gegenüber Bürgerinnen, Bürgern und Politischen Gremien;
- Bei Verkehrsanlagen überschlägige Ermittlung der wesentlichen Bauphasen unter Berücksichtigung der Verkehrslenkung während der Bauphasen.

2.1.3.3 Landschaftspflegerischer Begleitplan

Der Landschaftspflegerische Begleitplan ist der gesetzliche [26] Fachbeitrag für einen Eingriffs-Ausgleichs-Plan zur Erlangung der naturschutzrechtlichen Zustimmung einer Baugenehmigung bei Eingriffen in die Natur und Landschaft durch Vorhaben, die der Planfeststellung bedürfen. Für die Aufstellung ist der - private oder öffentliche - Vorhabensträger zuständig. Der Plan verläuft parallel zur Vorentwurf Phase und stellt die Grundlage der UVP Stufe II dar.

Die Ermittlung von Art und Umfang von Eingriffen in Natur und Landschaft und die Ableitung von Maßnahmen zur Minderung, zum Ausgleich und zum Ersatz dieser Eingriffe sind die wesentlichen Inhalte des Landschaftspflegerischen Begleitplans. Konkrete rechtliche Vorgaben im Hinblick auf die Erfassung und damit Berücksichtigung von Flora und Fauna in Eingriffs-Ausgleichs-Plänen existieren nahezu nicht. Es gibt verschiedene zu beachtende Rechtsvorschriften, die im Wesentlichen formale Anforderungen sowie das Verfahren der Eingriffs-Ausgleichs-Bilanzierung und damit die quantitative Festlegung des Umfangs von Kompensationsmaßnahmen behandeln [66] [67].

2.1.3.4 Planfeststellungsverfahren

Nach [192] ist die Planfeststellung "das Rechtsinstrument der Fachplanung, das auf höchster Konkretisierungsebene nach Abwägung aller relevanten Auswirkungen, Zusammenhänge und *betroffenen Belange komplexe raumbeanspruchende und i.d.R. umweltbelastende Projekte verbindlich in ihrer räumlichen Umgebung verortet*".

Das Planfeststellungsverfahren dient somit in der Regel Planungen, die die räumliche Entwicklung eines Gebietes erheblich beeinflussen können. Ziel ist es den Bau von Großprojekten zu genehmigen, was im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses entschieden wird.

Zweck des Planfeststellungsbeschlusses ist, alle von dem Bauvorhaben betroffenen öffentlichen und privaten Belange gegeneinander abzuwägen und widerstrebende Interessen auszugleichen, ohne dass es weiterer öffentlicher Verfahren oder Zustimmungen anderer Behörden bedarf. Das Planfeststellungsverfahren ist ein förmliches Verwaltungsverfahren, in dem alle erforderlichen Genehmigungen, Zustimmungen und Erlaubnisse für das Vorhaben festgelegt werden. Es findet seine rechtliche Grundlage in den §§ 72 bis 79 des Verwaltungsverfahrensgesetzes [30, §§ 72-79]. Basierend auf den Leistungen im Leistungsbild Ingenieurbauwerke und im Leistungsbild Verkehrsanlagen der HOAI lässt sich die Phase Genehmigungsplanung in folgender Abbildung 5 kurz zusammenfassen:

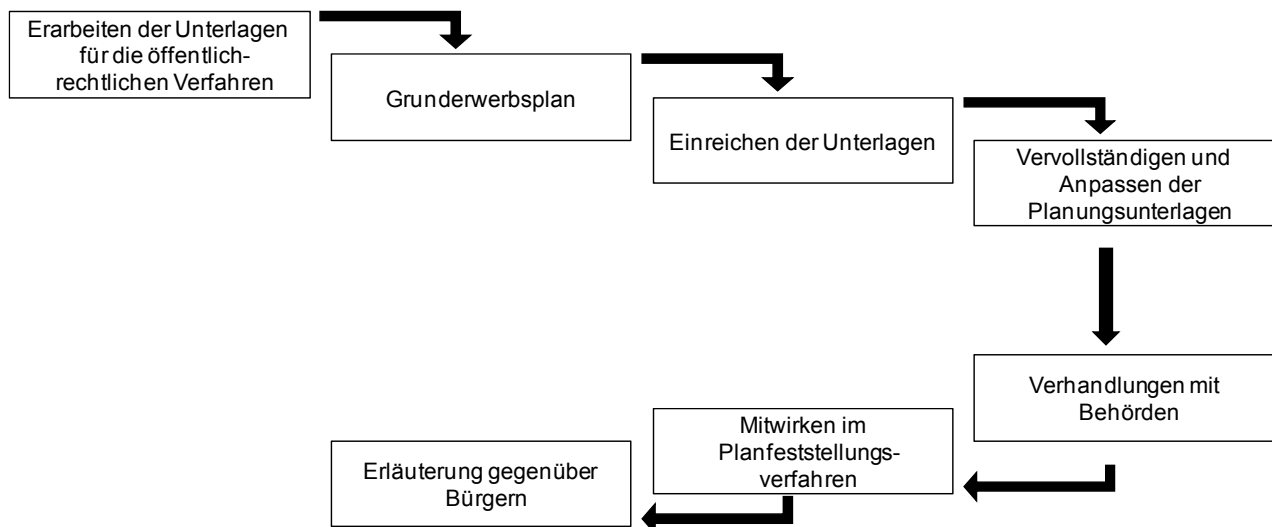


Abbildung 5: Verfahrensschritte im Rahmen der Leistungsphase 4: Genehmigungsplanung, nach [34]

Das Planfeststellungsverfahren beginnt mit einem Anhörungsverfahren, in dem sämtliche Unterlagen des Vorhabens bei der Anhörungsbehörde eingereicht werden. Der Plan wird auch der Öffentlichkeit bereitgestellt, damit alle natürlichen und juristischen Personen, die durch das Vorhaben in Ihren Rechten beeinträchtigt werden, Einwände erheben können. Rechtzeitig erhobene Einwände wie auch Stellungnahmen der Träger öffentlicher Belange werden mit den Anhörungsbehörden und Trägern des Vorhabens im Rahmen eines Erörterungstermins besprochen. Letztendlich endet das Planfeststellungsverfahren mit den Entscheidungen über die Einwände und die Zulässigkeit des Vorhabens in einem Planfeststellungsbeschluss [85].

2.1.4 Kritische Betrachtung des Planungsprozesses

Die vorliegende Darstellung des Planungsprozesses zeigt eine verwaltungsrechtliche Herangehensweise an die Beurteilung von Entscheidungsproblemen, sowohl bei der Frage nach der Wahl einer bestmöglichen Trasse als auch bei der Bewertung der Bau-

verfahren. Im Folgenden sollen in Anlehnung an die Leistungsphasen und planerischen Verfahrensebenen die einzelnen Defizite zusammengetragen werden.

Defizit zum Zeitpunkt der Bedarfsplanung

Als problematisch erweist sich zunächst die Grundlagenermittlung, welche auch die Bedarfsplanung beinhaltet. Die klassische Bedarfsermittlung basiert zunächst auf quantitativen Berechnungen. Es ist jedoch zu erkennen, dass neben dieser quantitativen Bedarfsermittlung auch die qualitativen Aspekte, wie z.B. Beurteilung einzelner Umweltfaktoren, mit einbezogen werden sollten, so dass diese Ergebnisse anschließend in die Gesamtbewertung einfließen sollten. Fehlende Perspektiven und Standpunkte können bei einem späteren Planungsstand Änderungen hinsichtlich der ursprünglichen Planung hervorrufen, was wiederum zu Mehrkosten führen kann. Aus diesem Grund ist es wichtig, externe Planer sowie Experten heranzuziehen, um spezifische Problemstellungen bezüglich des Projektes zu erörtern, so dass eine frühzeitig eingeleitete Projektsteuerung möglich ist.

Problematisch erweist sich desweiteren der fehlende Detaillierungsgrad der Planung. Sollte eine Planung im Zuge der ersten Phasen bis ins Detail ausgearbeitet sein, so ist eine Bestimmung der Projektkosten und Projektrisiken durchaus möglich. Mit Hilfe einer detaillierteren Planung ist die Erarbeitung weiterer Alternativen möglich, so dass auf unvorhergesehene Aspekte besser reagiert werden kann.

Defizit zum Zeitpunkt der Raumordnungsplanung

Gerade im Rahmen der Linienfindung wird ein großer Aufwand betrieben, um die Auswirkungen des Vorhabens möglichst vollständig zu erfassen bzw. zu prognostizieren. Allerdings bleibt unklar, wie die Ergebnisse zu bewerten sind. Bei unterschiedlichen Ergebnissen bzgl. der einzelnen festgelegten Subkriterien, welche keinen offensichtlichen Rückschluss im Hinblick auf das Gesamtranking der Baualternativen zulassen, könnten unter den gegebenen Umständen weder die Entscheidungsträger ihre Wahl rechtfertigen, noch wäre diese für Dritte nachvollziehbar. Modelle zur Unterstützung von Entscheidungsproblemen sind sicherlich nicht im Stande, eine konkrete und einzige Lösung aus einer Menge möglicher Optionen zu präsentieren, welche unanfechtbar bleibt, da es aufgrund der heterogenen Perspektiven der Projektbeteiligten zu verschiedenen Beurteilungen einzelner Sachverhalte kommen kann. Somit können durchaus mehrere Alternativen zur Auswahl stehen. Es geht jedoch zunächst darum, eine Entscheidung oder eine Wahl zu treffen, die die eigenen Wertvorstellungen und das eigene Zielsystem mit Hilfe von Bewertungsverfahren am besten in Einklang bringen und den besten Kompromiss zwischen konträren Sekundärzielen anbietet.

Insgesamt gesehen stehen im Verkehrs- sowie Leitungstunnelbau eine Vielzahl von Bauverfahren zur Verfügung. Allein aus geologischen und logistischen Überlegungen heraus ist die geschlossene Bauweise in den meisten Fällen vorzuziehen. Speziell im Vorfeld von Verkehrstunnelbauprojekten sind neben einer Bewertung der Wirtschaftlichkeit sowie anderer wichtiger Kriterien (Geologie etc.) auch ökologische Auswirkungen zu untersuchen, wobei bei der Ausführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen deutliche methodische Defizite auftreten, die darin liegen, dass die UVP/UVS nur den fertigen Zustand eines Bauwerkes bewertet. Auf die verschiedenen Bauverfahren, und die aus ihnen heraus spezifisch entstehenden Eingriffe in die Umwelt, wird in der Regel nicht, auf die während der Bauphase entstehenden Auswirkungen nur in beschränktem Maße eingegangen.

Ein besonderes Augenmerk jeder ökologischer Bilanzierung und Bewertung sollte jedoch auf den verfahrensrelevanten Wirkfaktoren liegen. Hier besteht nach Bechmann [9] ein erhebliches Defizit. Dieses Defizit basiert auf drei Faktoren:

- Praxisdefizit: Antragsteller und Behörden erfüllen ihre UVP-Aufgaben nicht angemessen
- Institutionalisierungsdefizit: Die UVP ist in Deutschland nicht leistungsfähig in eine gesellschaftlich anerkannte Form gebracht, wie es erforderlich wäre
- Professionalisierungsdefizit: Die UVP wird in Deutschland nicht mit der nötigen Professionalität betrieben

Weitere Defizite liegen insbesondere dann vor, wenn bspw. Verfahrensmängel auftreten, die negative Auswirkungen auf Beteiligte oder Öffentlichkeit haben, wobei die wichtigsten Merkmale des Praxisdefizits bei einer unzureichenden bzw. nicht nachvollziehbaren Dokumentation des Verfahrens, geringen Transparenz und dem begrenzten Vorliegen nachvollziehbarer Unterlagen liegen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass gängige Bewertungsmethoden nicht angemessen beherrscht werden und daraus resultierende unklare Bewertungsergebnisse seitens der Gutachter und anderer Projektbeteiligten vorliegen. Eine detailliertere Planung vor Baubeginn und der frühe Einbezug der Öffentlichkeit könnten durchaus zu höheren Kostenansätzen als bei herkömmlichem Vorgehen führen. Dafür muss eine funktionierende Kommunikationsplattform integriert werden, die ebenso in die Kostenplanung mit einfließen sollte. Durch das Einbeziehen der Öffentlichkeit kann durchaus ein Einfluss auf die Planung genommen werden. Dadurch lassen sich nicht nur spätere zusätzliche Kosten vermeiden, sondern ein früher Einbezug führt auch zu einer Akzeptanzsteigerung und Erhöhung der Transparenz der Entscheidungsfindung.

Weitere Aspekte für eine effiziente Planung und Berücksichtigung projektrelevanter Kriterien sind in der Bearbeitung des Gesamtprojektes zu finden. Die Ausführungen verdeutlichen, dass Entscheidungen zumeist von wenigen Verantwortlichen getroffen werden.

Dazu ist es jedoch unabdingbar, dass Expertenmeinungen mit in eine Entscheidung und Bewertung integriert werden, z.B. wenn Bauherren, Planer und bauausführende Unternehmen ihre Meinungen und Erfahrungen in den Planungsprozess mit einbringen. Auf diese Weise lässt sich das Projekt im Einzelnen analysieren, so dass die Weichen für eine kostengünstige und qualitativ hochwertige Realisierung des Projekts gestellt werden können.

Dennoch ist dabei zu achten, dass die genannten Gruppen die Planung nicht aus wirtschaftlichem Eigeninteresse beeinflussen, um bspw. bestimmte Bauverfahren von Beginn an auszuschließen bzw. stärker zu gewichten. Aus diesem Grund sind Vorschläge zu erarbeiten, um das Expertenwissen in den Planungsprozess einzubinden.

Fazit

Die Ausführungen zeigen, dass in den frühen Planungsphasen Defizite bestehen, denn momentan existieren in der Praxis keine konkreten Wertsysteme. Bspw. bemüht sich die UVS, auf jedes Lebewesen innerhalb des Untersuchungsraumes einzugehen. Die zeitliche und monetäre Investition zur Erfassung dieser Auswirkungen ist relativ hoch, wobei es sich nicht sagen lässt, welchen genauen Wert die beschriebenen Schutzgüter haben.

Defizitär wird darüber hinaus die Auswahl des bestmöglichen Bauverfahrens behandelt. Wenn die örtlichen Randbedingungen sehr schnell bestimmte Bauverfahren ausschließen, so dass nur noch ein Bauverfahren technisch und wirtschaftlich in Frage kommt, dann macht es zunächst wenig Sinn, Zeit oder finanzielle Mittel dafür aufzuwenden, die übrigen Alternativen genauer zu untersuchen. Im Hinblick auf Verständlichkeit, Nachvollziehbarkeit und somit Transparenz ist eine angemessene Erläuterung jedoch förderlich, weshalb ein bestimmtes Bauverfahren ausgeschlossen werden muss, trotz eventueller Vorteile, die es bzgl. bestimmter Kriterien bietet.

Der gesamte Planungsprozess inklusive aller gemachten Studien und Gutachten sollte weitgehend systematisch in Berichten zusammengefasst werden. Dennoch ist es oftmals der Fall, dass in nur geringem Ausmaße ein Bauverfahren favorisiert wird [214], zumal aber mehrere Verfahren, welche technisch und wirtschaftlich durchaus umsetzbar sind, miteinander konkurrieren.

Dennoch offenbart oftmals die vorgenommene Bewertung bzw. das in der Praxis allgemein durchgeführte Verfahren einige Schwächen. Die möglichen Bauverfahren werden eher allgemein beschreiben als im Hinblick auf die örtlichen Verhältnisse bewertet. Die in der UVS aufgelisteten und genannten Schutzgüter werden nicht nur durch die Wahl der Trasse, sondern im hohen Maße auch durch die Wahl des Bauverfahrens beeinflusst. In speziellen Fällen, in welchen mögliche Trassen räumlich eng beieinander liegen, ist die Wahl des Bauverfahrens im Hinblick auf Umwelteinflüsse möglicherweise von größerer

Bedeutung als die Trasse selbst. Trotzdem findet diesbezüglich zumeist keine weitere Untersuchung statt.

Bei der Untersuchung möglicher Trassenvarianten fehlt es zwar an einem Wertsystem bzgl. der einzelnen Schutzgüter, aber es wurde zumindest versucht sämtliche Auswirkungen zu erfassen. Bei der Bewertung der Bauverfahren fehlt es an beidem, einem Wertsystem und einer Untersuchung. Oftmals werden nur einige Kriterien definiert, mit welchen eine rein symbolische Bewertung der Alternativen für die Empfehlung eines Bauverfahrens durchgeführt wird.

Es soll nicht der Eindruck geweckt werden, dass der Variantenvergleich unzureichend oder nicht den Anforderungen genügend durchgeführt wird. Da es sich bei einem großen Infrastrukturprojekt um eine Maßnahme zum Ausbau der Bundesfernstraßen handelt, stellt das BMVBS auch die finanziellen Mittel für den Bau zur Verfügung.

Mit dem ‚Leitfaden für die Planungsentscheidung Einschnitt oder Tunnel‘ sollen neben der allgemeinen Entscheidung, ob eine Straße in einem Einschnitt geführt werden kann oder aufgrund der örtlichen Randbedingungen ein Tunnel vorgesehen werden muss, auch konkurrierende technische Lösungen einer Tunnelbaumaßnahme vergleichend bewertet werden. Das selbsterklärte Ziel des Leitfadens ist es „ ... die *Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“ vorzubereiten sowie transparent und nachvollziehbar zu machen.*“ [33]

Dieser Umstand wird durch die Vorgabe allgemeingültiger Kriterien erreicht, welche für die Entscheidungsfindung herangezogen und ggf. auf Grundlage projektspezifischer Randbedingungen ergänzt werden sollen. Zusätzlich ist ein Abwägungsverfahren zu nutzen. Als übergeordnete Kriterien führt der Leitfaden die Kriterien Kosten, Verkehr, Technik, Naturschutz und Landschaftspflege, Immissionsschutz, Gewässerschutz, Land- und Forstwirtschaft sowie für den Einzelfall wichtige sonstige Kriterien auf. Die genannten Kriterien können in weitere Subkriterien gegliedert werden. Im Anschluss an die Kriterienfindung und Kriterienbewertung soll die Entscheidungsfindung über eine Bewertungsmatrix erfolgen.

Die Nachvollziehbarkeit und Transparenz dieser Entscheidungsfindung über die Nutzung einer Bewertungsmatrix deckt sich mit den Zielen dieser Arbeit. Jedoch wird die Umsetzung des erklärten Ziels nicht vollständig ermöglicht. Das im Leitfaden enthaltene Musterbeispiel zur Bewertungsmatrix wird einer solchen Nachvollziehbarkeit und Transparenz kaum gerecht, denn es handelt sich dabei lediglich um eine tabellarische Auflistung der möglichen technischen Varianten, welche bzgl. der genannten Kriterien auf Grundlage vorhandener Zahlen (bspw. Kosten) oder verbaler Beschreibungen bewertet werden. Die Bewertung erfolgt dabei rein symbolisch über fünf Stufen mit (++) für die beste und (--) für die schlechteste Zielerfüllung, wie es in vielen Machbarkeitsstudien für die Bewertung der Trassenvarianten durchgeführt wird. Nach Aussage des Leitfadens wird sich

nach der vorgenommenen Bewertung in der Regel eine deutliche Tendenz für eine Vorzugsvariante ableiten lassen. Bedenkt man, welche Summen notwendig bzw. welche enormen Auswirkungen einer fehlerhaften Entscheidung möglich sind, um ein Tunnelbauvorhaben zu realisieren, mag man das für eine sehr optimistische Herangehensweise halten. Wie verfahren werden soll, sofern sich keine deutliche Tendenz ableiten lässt, also bei einer sehr inhomogenen Bewertung der konkurrierenden Varianten, bleibt hier zunächst offen. Insgesamt lassen sich sehr viele Kriterien nur vage verbal beschreiben. Die UVS arbeitet nahezu ausschließlich mit solchen verbalen Beschreibungen. So werden die Auswirkungen der einzelnen Bauverfahren auf die jeweiligen Schutzgüter bzw. die Schutzwürdigkeit der Güter selbst als 'gering', 'mittel' oder 'hoch' eingestuft. Die Methodik des Leitfadens erhöht demnach weiter die Unschärfe, denn hier ist neben der Beschreibung der Auswirkung auch die Bewertung selbst vage. Bei einer skalaren Bewertung, unabhängig vom Bewertungsverfahren, lässt sich direkt und eindeutig ein Ranking der Alternativen ableiten. Dies ist im Fall der symbolischen Bewertung, vor allem bei einem inhomogenen Ergebnis, nicht möglich, denn es lässt sich nicht sagen, ob und vor allem um wie viel eine Alternative besser ist als die andere. Ein weiteres großes Problem dieses Vorgehens stellt die mangelnde Möglichkeit einer Sensitivitätsanalyse dar. Selbst die geringste Variation einer skalaren Bewertung wirkt sich auf die Werte des Gesamtrankings aus und kann nachvollzogen werden, womit auch die Stabilität einer Lösung kontrolliert werden kann. Bei einer Variation der Symbole lässt sich nicht feststellen, wie stark sie sich auf das Gesamtergebnis auswirkt und ob es unter Umständen zu einem Rangwechsel kommt.

Positiv anzumerken ist, dass speziell der Leitfaden auf die Gewichtung der Kriterien eingeht. Es wird darauf hingewiesen, dass den aufgelisteten Kriterien nicht immer die gleiche Bedeutung zugemessen werden kann. Über diese muss von Fall zu Fall den örtlichen Randbedingungen entsprechend entschieden werden. Es wird jedoch nicht erwähnt, wie die Gewichtung der Kriterien erfolgen kann, zumal eine Darstellung der vorgestellten symbolischen Bewertung äußerst schwierig erscheint.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die angestrebten Ziele des Leitfadens einer nachvollziehbaren und transparenten Entscheidungsfindung mit der vorgestellten Methodik nicht vollständig erreicht werden können. Selbst eine einfache skalare Bewertung wie z.B. in Form einer Nutzwertanalyse bietet ein höheres Maß an Nachvollziehbarkeit und Transparenz, da es zumindest im Hinblick auf das Gesamtergebnis keinen Interpretationsspielraum gibt. Es fehlt die eindeutige Bewertung bzgl. der Kriterien, wodurch innerhalb des Gesamtergebnisses bestenfalls die tendenzielle Rangfolge der Alternativen, keineswegs jedoch der exakte Abstand zueinander abgelesen werden kann. Aus diesem Grund lässt sich die Auswirkung einer veränderten Gewichtung der Kriterien auf das Gesamtergebnis nicht darstellen, womit eine Sensitivitätsanalyse unmöglich wird.

Gelingt es auf dieser Basis ein Bewertungsverfahren zu entwickeln, das die benannten Defizite berücksichtigt und gleichzeitig einen Überblick über verfahrensimmanente Initial- und Folgekosten ermöglicht, so entsteht die praxisnahe Alternative einer Bewertungsmethodik, die bereits im Zuge der Planungsphase eines unterirdischen Infrastrukturprojektes eingesetzt werden kann, so dass ein Aufbau eines Entscheidungsmodells gerechtfertigt ist.

3 Grundlagen der Entscheidungstheorie

Die Entscheidungstheorie beschäftigt sich grundsätzlich mit der Fragestellung, wie man aus mehreren vorhandenen Alternativen die bestmögliche auswählt. Sie wird vor allem als Instrument für betriebswirtschaftliche Anwendungen genutzt, weshalb sich ein Großteil der vorhandenen Literatur und Forschung vornehmlich mit betriebswirtschaftlichen Problemstellungen auseinandersetzt. Darüber hinaus ist die Entscheidungstheorie ein spezielles Gebiet der Wahrscheinlichkeitstheorie [103, S.2]. Das Interesse in diesem Bereich sind quantitative Faktoren wie etwa der monetäre Gewinn oder die Einsparung von Produktionskapazitäten. Dennoch basiert eine Entscheidung nicht immer nur auf quantitativen Daten, sondern auch auf qualitativen Faktoren, vor allem dann, wenn Daten nicht vorliegen und der Entscheider demzufolge seine eigene subjektive Einschätzung geben muss. Gerade in den letzten Jahren hat die Entscheidungstheorie, besonders die multi-kriteriellen Entscheidungssysteme, Einzug in unterschiedliche Themengebiete (z.B. im Zuge strategischer Fragestellungen im Bereich der Wirtschaftswissenschaften) erhalten, welche vornehmlich von qualitativen Faktoren geprägt sind.

Ziel der Entscheidungstheorie ist, vorhandene Alternativen anhand von Kriterien darzustellen, zu vergleichen und mittels einer Bewertung die bestmögliche Alternative in Bezug auf ein übergeordnetes Ziel auszuwählen [103, S.4]. Die Entscheidungstheorie kann in zwei Teilbereiche unterteilt werden: die normative/präskriptive sowie die deskriptive Entscheidungstheorie [103, S.1]. Beide Bereiche beschäftigen sich grundsätzlich mit dem Themenbereich der Entscheidungsfindung, jedoch mit unterschiedlichen Herangehensweisen.

Das vorliegende Kapitel stellt die wesentlichen Grundlagen der Entscheidungstheorie dar. Dabei werden neben einzelnen Begrifflichkeiten die unterschiedlichen Arten einer Entscheidung beschrieben, wobei die einzelnen Entscheidungsverfahren aufgezeigt und deren Unterschiede erläutert werden.

3.1 Interaktionsprozess der Entscheidungsfindung

Für den gängigen Entscheidungsprozess für unterirdische Infrastruktur werden derzeit keine konkreten Vorgaben hinsichtlich eines zu wählenden Bewertungsverfahrens und –maßstabes gemacht. Den Entscheidungsträgern ist selbst überlassen, auf welche Weise die Entscheidungsfindung abläuft. Insgesamt wird deutlich, dass für eine Beurteilung über die Wahl des besten Bauverfahrens nicht nur technische und wirtschaftliche, sondern auch umweltrelevante und sozio-kulturelle Aspekte notwendig sind. Es fehlen somit nicht nur ganzheitliche Entscheidungskriterien für die Auswahl einer projektspezifischen Verfahrenstechnik, sondern vielmehr eine klare und transparente Entscheidungsfindung [179]. Zur Erklärung dieser Überlegungen wird im Folgenden die betriebswirtschaftliche Entscheidungstheorie herangezogen. In Anlehnung an [3, S.1] können im Rahmen der Vorplanung die Entscheidungsprozesse als Interaktionsprozesse zwischen dem Subjekt-

system (Projektleiter, Projektgruppe) und dem Objektsystem (Entscheidungsmodell, Leistungskatalog) verstanden werden. Das Entscheidungsfeld ist ein Teil eines Objektsystems aus dem im Kapitel 7 noch vorzustellenden Entscheidungsmodells. Das Entscheidungsfeld umfasst insgesamt alle Personen und Objekte. Diese Menge lässt sich wiederum durch einen Entscheider beeinflussen, insbesondere dann, wenn der Entscheider bestimmte Aktivitäten durchführt [3, S.2]. Ebenso leitet das Objektsystem weitere Informationen an das Subjektsystem, so dass das Ergebnis einer Entscheidung durch verschiedene Umweltzustände beeinflusst wird, welche vom Entscheider grundsätzlich unabhängig sind. Zur Erreichung einer Entscheidung bedarf es einer bestimmten Entscheidungslogik. Somit stehen dem Entscheider verschiedene Methoden zur Verfügung, um eine Entscheidung unter Berücksichtigung des Subjekt- und Objektsystems zu treffen (siehe Abbildung 6).

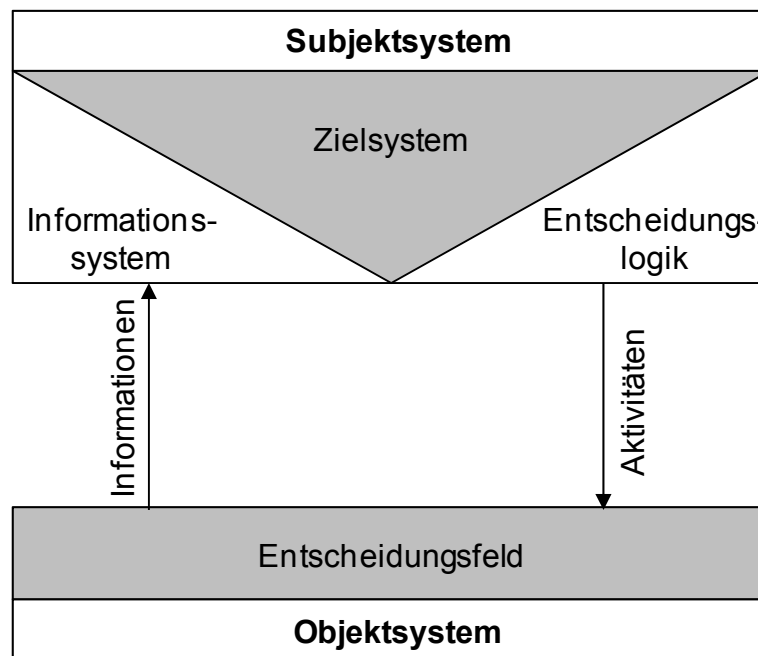


Abbildung 6: Zielsystem und Entscheidungsfeld im Zuge einer Entscheidung, nach [3, S.1]

3.2 Deskriptive Entscheidungsfindung

Der Bereich der deskriptiven Entscheidungsfindung beschäftigt sich eher mit den psychologischen und sozialen Faktoren, welche die Entscheidungsträger betreffen. Nach [103, S.2] beschreibt die deskriptive Entscheidungstheorie, wie in der Realität Entscheidungen getroffen werden. Laux beschreibt weiterhin, dass empirisch gehaltvolle Hypothesen über das Verhalten von Personen oder Gruppen zu finden. Im engeren Sinne bedeutet dies, dass eine Rationalität eines Entscheidungsverhaltens von Personen nicht betrachtet wird. Dieser Umstand ist der größte Unterschied zu der präskriptiven Forschung [200, S.9]. Im Bereich von unterirdischen Infrastrukturmaßnahmen stehen technische Abläufe,

sowie bauplanerische Gegebenheiten im Vordergrund, so dass die deskriptive Entscheidungstheorie im Hinblick auf diese Arbeit nicht weiter von Interesse ist.

3.3 Normative Entscheidungsfindung

Die normative Entscheidungstheorie unterscheidet sich von der deskriptiven Theorie dahingehend, dass das Entscheidungsverhalten nach festgelegten Axiomen vollzogen wird. Rationalität, Information sowie eine Nutzenmaximierung stellen die wichtigsten Bestandteile der normativen Entscheidungstheorie dar. Gerade Axiome sind bei dieser Theorie die maßgebenden Faktoren, die für die Erstellung normativer Modelle von Bedeutung sind. Mit Hilfe normativer Modelle lassen sich konsistente, aber auch logisch deduktive Ergebnisse herleiten, so dass die Frage geklärt werden kann, wie entschieden werden soll. Durch diese Regeln ist es dem Entscheider möglich, nutzenmaximierend zu handeln sowie unter Berücksichtigung von Risiko und Unsicherheit einen subjektiven Erwartungsnutzen zu generieren [149, S.2f].

3.4 Präskriptive Entscheidungsfindung

Die präskriptive Entscheidungstheorie verfolgt zur Beschreibung von Entscheidungssituationen dagegen einen mathematischen Ansatz [69]. Sie beschäftigt sich primär mit der Methode, welche zu einer Entscheidungsfindung genutzt wird. Zudem unterstellt sie, dass der Entscheider rational handelt [109], d.h. dass er aus den vorhandenen Alternativen diejenige auswählt, die für ihn, aufgrund von Fakten, den größtmöglichen Vorteil liefert. Vor allem wenn der Entscheider nicht in der Lage ist, komplexe mathematische Zusammenhänge rational entscheiden zu können [62, S.2-14]. Erwartungen und Präferenzen, wie es in der deskriptiven Entscheidungstheorie üblich ist, sind für die Entscheider nicht von Bedeutung, wohingegen die Struktur bzw. der prozessartige Weg als das dominierende Kriterium in der präskriptiven Entscheidungsfindung angesehen wird.

Weber unterscheidet weiterhin je nach Datengrundlage weiterhin in deterministische, stochastische und fuzzybasierte Verfahren. Darüber hinaus ist die Anzahl der Entscheidungsträger von Bedeutung: Hierbei kann in Einzel- oder Gruppenentscheidungsverfahren unterschieden werden [204, S.2 ff].

Weber [204, S.15 ff] und Geldermann [70, S.4 ff] beschreiben Anwendungen hinsichtlich unterschiedlicher Zielsetzungen. Bspw. werden zwischen uniobjektiven Verfahren (einfache Zielsetzung) und multikriteriellen Verfahren (mehrere Zielsetzungen) unterschieden. Multikriterielle Verfahren werden nochmals in multiobjektive und multiattributive Verfahren unterteilt, welche aber in Kapitel 4 genauer erläutert werden.

3.5 Die Rationalität

Eine Entscheidung kann durch Menschen sowohl rational als auch emotional gefällt werden, wobei für die weitere Bearbeitung nur der rationale Aspekt betrachtet wird. Der Be-

griff *Rationalität* ist dementsprechend für die Darstellung der Entscheidungstheorie von großer Bedeutung [62, S.3].

Nach von Nitzsch [199, S.11] und Bamberg et al. [3, S.11] wird der Begriff in instrumentaler sowie substanzieller Rationalität unterschieden. Während die substantielle Rationalität sich mit der Frage beschäftigt, ob die Erreichung festgelegter Ziele rational ist, stehen subjektive Ziele und Präferenzen im Fokus der instrumentalen Rationalität.

Betrachtet man die substantielle Rationalität, so ist festzustellen, dass sie von einem als standardisiertem Zielsystem abhängig ist, welches nicht nur vom Entscheider sondern auch von dessen Präferenzen unabhängig ist. Anders sieht es hingegen bei der instrumentalen Rationalität aus. Subjektive Präferenzen müssen innerhalb des eigenen Zielsystems nicht nur widerspruchsfrei, sondern auch rational sein. Diese Forderung stellt somit eine feste Grundlage einer Entscheidung dar. Von Nitzsch sagt dabei aus, dass Rationalitätspostulate notwendig sind. Diese sind zwar nicht zwingend vorgeschrieben, allerdings allgemein anerkannt [199, S.11-14]. Diese Rationalitätspostulate erwecken den Anschein, dass diese selbstverständlich und logisch sind. Es wird dadurch suggeriert, dass eine Missachtung der Prämissen ausgeschlossen scheint. Gerade komplexe Sachverhalte sorgen gerade wegen der unübersichtlichen Informationen bei Entscheiden für ein nicht rationales Verhalten. Nach von Nitzsch [199, S.14], und Schäfer et al. [150, S.57-58] lassen sich insgesamt vier Axiome festhalten, die für eine rationale Entscheidung maßgebend sind. Grundsätzlich muss der Entscheider eine vollständige Präferenzordnung aller für ihn denkbaren Alternativen aufstellen, so dass im Nachgang jede Alternative einen Rangplatz erhält.

3.5.1 Axiom 1: Vollständigkeit

Die Vollständigkeit bezieht sich in erster Linie auf die Vergleichbarkeit aller Alternativen. Durch einen paarweisen Vergleich kann ein Entscheidungsträger alle Alternativen somit miteinander vergleichen. Er kann darüber hinaus angeben, welche Alternative präferiert wird. Dieses Prinzip besagt weiterhin aus, dass, wenn Zustand (x) eine bessere Ausprägung verspricht als Zustand (y), Zustand (x) zu wählen ist.

3.5.2 Axiom 2: Transitivität

Wenn Zustand (x) besser bewertet wird als Zustand (y) und Zustand (y) besser als Zustand (z), so bedeutet Transitivität, dass der Zustand (x) besser bewertet werden muss als Zustand (z).

3.5.3 Axiom 3: Objektive Richtigkeit

Grundsätzlich dürfen sich Informationen und Entscheidungen für einen Entscheidungsträger nicht als objektiv falsch darstellen. Bspw. tritt diese Zustand dann auf, wenn zwei

Informationen vollkommen widersprüchliche und nicht logische Aussagen zum gleichen Zustand liefern.

3.5.4 Axiom 4: Unabhängigkeit

Zustand (x) wird vom Entscheider zunächst besser bewertet als Zustand (y). Wird nun ein dritter Zustand zusätzlich berücksichtigt, so darf sich die Präferenz zwischen Zustand (x) und (y) nicht verändern. Die einzelnen Zustände sind dementsprechend voneinander unabhängig.

3.6 Rationale Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung der Logik

Nach Bosch [17, S.9] muss eine rationale Gestaltung eines Entscheidungsprozesses zweckorientiert und zweckrational erfolgen, so dass ein richtiges Handeln bestimmt werden kann. Dabei definiert Bosch die rationale Entscheidung wie folgt: Im Zuge einer rationalen Entscheidung kann der Entscheider grundsätzlich eine von mehreren Handlungsalternativen auswählen, wobei Handlungen für das Entscheidungssubjekt stets Mittel zum Zweck sein sollten. Das Ziel der Entscheider ist nach Bosch ebenfalls ein wichtiger Bestandteil, da sich eine rationale Entscheidung stets danach orientiert, insbesondere dann, wenn diese auf rein logischem Wege aus Prämissen abgeleitet wird.

Alle Entscheidungsmodelle der präskriptiven Entscheidungstheorie gründen auf ein Grundmodell (Abbildung 7). Demnach basiert ein Entscheidungsproblem auf der Menge von Handlungsalternativen A , die Menge der möglichen Umweltzustände Γ und den daraus resultierenden Ergebnissen $E(A, \Gamma)$ [103, S.20] [113, S.17]. Nach Laux lässt sich das Entscheidungsfeld durch Aussagen charakterisieren, die das Tun des Entscheiders (Handlungsalternative), mögliche Auswirkungen der Entscheidung (Umweltzustände), auf die der Entscheider keinen Einfluss hat, und die dazugehörigen Konsequenzen (Ergebniswerte) darstellen.

Desweiteren definiert Laux [103, S.24 ff] die Zielfunktion, welche die Zielvorstellung eines Entscheiders bei der Lösung eines Entscheidungsproblems abbildet. Die Zielfunktion stellt dabei die formale Darstellung einer Entscheidungsregel dar, welches aus einer Präferenzfunktion Φ und einem Optimierungskriterium besteht. Die Präferenzfunktion ordnet den Alternativen A_a eindeutige Präferenzwerte $\Phi(A_a)$ zu, wohingegen das Optimierungskriterium die Ausprägung des Präferenzwertes zum Ausdruck bringt.

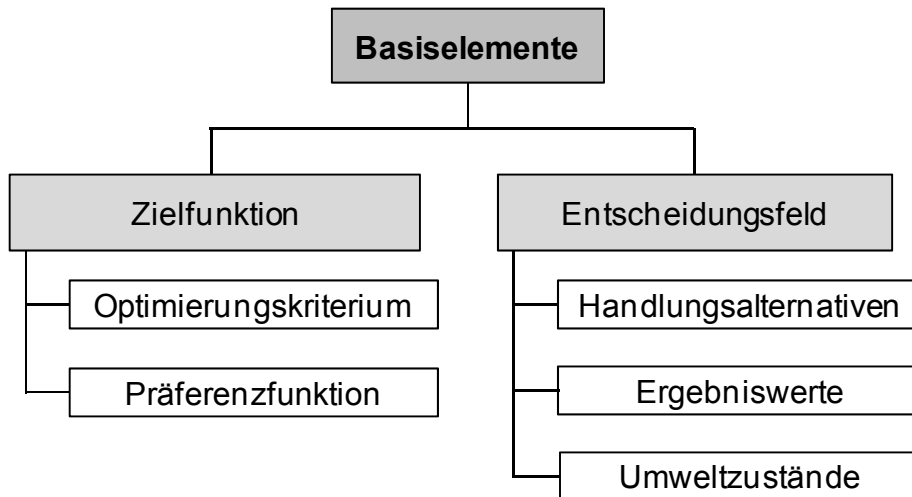


Abbildung 7: Basiselemente eines Entscheidungsproblems, nach [103, S.20]

Grundlösungsprinzip der Entscheidungssituation ist die Bildung einer Präferenzordnung $\Phi(A)$ von allen möglichen und erarbeiteten Alternativen. Diese Ordnung entsteht aus der subjektiven Bewertung der Ergebnisse $E(A, \Gamma)$. Insgesamt gibt diese Ordnung an, inwieweit der Entscheider eine Alternative gegenüber anderen Alternativen bevorzugt.

Grundsätzlich gilt also, dass jeder Entscheider versucht, die für ihn beste Lösung zu evaluieren. Die Lösung jeder Entscheidungssituation ist damit in der allgemeinen Präferenzfunktion

$$\Phi(A_a) \Rightarrow \text{Max}$$

vorgegeben und lässt sich folgendermaßen in Worte fassen:

Aus der Alternativmenge A ist ein Element (bzw. die Elemente) A_a gesucht. Das Element maximiert den Wert dieser Präferenzfunktion Φ , so dass die Alternative mit dem höchsten Präferenzwert die rationale Lösung beschreibt [103, S.24f]. Für die Bewertung der Ergebnisse $E(A, \Gamma)$ hat sich der Begriff Nutzen N (eines Ergebnisses) etabliert [193, S.50-67] [161, S.4 f]. Der Nutzen $N(E)$ resultiert aus dem Ergebnis $E(A, \Gamma)$, welcher den subjektiven Wert der Ausprägung für den Entscheider bestimmt. Insgesamt wird dadurch ermittelt, welches Ergebnis $E_1(A, \Gamma)$ einem anderen Ergebnis $E_2(A, \Gamma)$ vorzuziehen ist. Bei der Entscheidungssituation ‚Wahl eines Bauverfahrens‘ müssen in der geforderten ganzheitlichen Betrachtungsweise Ergebnisse aus dem Sachsystem und den tangierenden Handlungssystemen unter verschiedenen Umweltzuständen berücksichtigt werden. Ein mögliches Beispiel unter Berücksichtigung des Entscheidungsfeld ‚Bauverfahren‘ ist in folgender Abbildung 8 dargestellt. Die Handlungsalternativen stellen im Prinzip die möglichen Bauverfahren dar, wohingegen die Ergebnisse die Vorteile der Bauverfahren hinsichtlich der einzelnen Punkte preisgeben. Die Umweltzustände beschreiben dabei das gesamte Entscheidungsproblem bzw. bilden die maßgebenden Kriterien zur Bestimmung der besten Alternative.

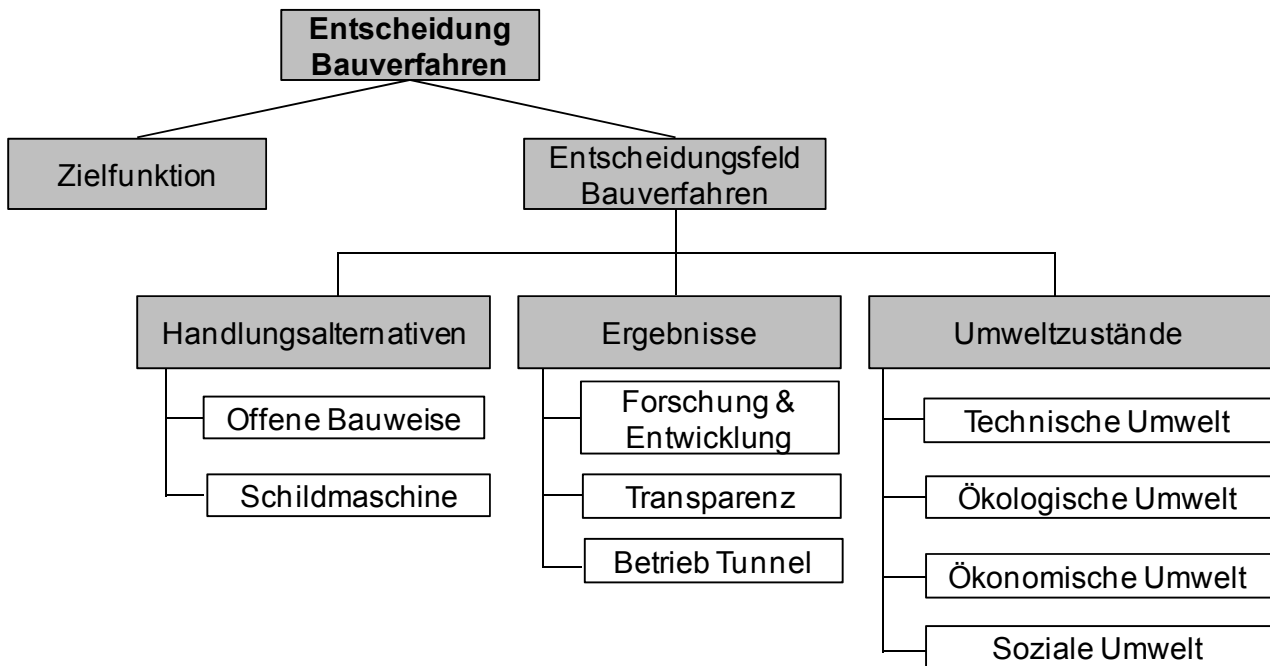


Abbildung 8: Zielfunktion und Entscheidungsfeld für das Bsp. Wahl eines Bauverfahrens, nach [109, S. 9]

3.6.1 Handlungsalternativen

Eine der Grundvoraussetzungen ob überhaupt ein Entscheidungsproblem vorliegt ist, dass ein Entscheider mindestens zwischen zwei Handlungsalternativen wählen kann [103, S.20]. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich bei diesen Alternativen um einzelne Maßnahmen handelt oder um ein ganzes Maßnahmenpaket [109, S.10]. Die Alternativen müssen jedoch nach dem ‚Prinzip der vollkommenen Alternativenstellung‘ [3, S.16] formuliert sein, das zwei wesentliche Forderungen enthält. Zum einen muss der Entscheider eine der möglichen Alternativen auch tatsächlich wählen, wobei auch die Unterlassungsalternative gewählt werden kann. Zum anderen müssen die Alternativen so strukturiert sein, dass sie sich gegenseitig ausschließen (Exklusionsprinzip), was bedeutet, dass nicht mehrere Alternativen gleichzeitig realisierbar sind [3, S.16].

Es ist weiterhin zu unterscheiden, ob eine begrenzte oder unbegrenzte Anzahl an Handlungsalternativen existiert. Es gilt zu überprüfen, ob das Entscheidungsproblem einen diskreten oder stetigen Aktionsraum zur Verfügung hat, da hierfür spezielle Entscheidungsverfahren notwendig.

Wie bereits angeführt, sind bauverfahrenstechnische Entscheidungssituationen durch teilweise konkurrierende Ziele und einer Vielzahl von Kriterien meist relativ komplex und mit einfachen Mitteln kaum zu lösen. Als eine Entscheidungshilfe werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit verschiedene Bewertungsmethoden vorgestellt. Auf der Grundlage jener Bewertungsmethode werden Alternativenvergleiche sowie Hierarchien der Alternativen durchgeführt, um schließlich Handlungsempfehlungen bilden zu können.

3.6.2 Umweltzustände

Mit Umweltzustand wird in der Entscheidungstheorie die Menge an Faktoren beschrieben, die die Ergebnisse bzw. Alternativen beeinflussen [3, S.16ff]. Diese Faktoren orientieren sich dabei nicht an ökologischen Maßstäben, der Begriff ‚Umwelt‘ ist in diesem Zusammenhang vielmehr mit dem Begriff ‚Umfeld‘ gleichzusetzen. Die Umweltzustände haben direkte Auswirkungen auf das Entscheidungsproblem, entziehen sich jedoch dem Einflussbereich des Entscheiders (z.B. klimatische Einflüsse, geologische Verhältnisse, konjunkturelle Entwicklung). Je nachdem, wie viele Daten und Fakten ein Entscheider über die jeweiligen Umwelteinflüsse auf seine Entscheidung hat, d.h. wie groß sein Grad an Informiertheit ist, fällt er seine Entscheidung in ‚Sicherheit‘ bzw. ‚Unsicherheit‘. Rommelfanger und Eickmeier [138, S.47 ff] unterscheiden dabei drei Fälle: ‚Entscheidungen unter Sicherheit‘, ‚Entscheidungen bei Risiko‘ sowie ‚Entscheidungen bei Ungewissheit‘.

Eine Situation bei Sicherheit ist nach [138] dadurch gekennzeichnet, dass der wahre Umweltzustand bekannt ist, wobei Entscheidungen bei Risiko für das Eintreten bestimmter Umweltzustände nur durch die Nennung von Wahrscheinlichkeiten getroffen werden können. Entscheidungen bei Ungewissheit sind dadurch charakterisiert, dass mögliche Umweltzustände bekannt, jedoch Eintrittswahrscheinlichkeiten dazu gänzlich unbekannt sind.

Comploj stellt den Begriff ‚Unbestimmtheit‘ als Oberbegriff für die Kategorien Ungewissheit, Ungenauigkeit und Informationsmängel und –unschärfen dar. Verfolgt man diesen Ansatz weiter, so wird deutlich, dass der Begriff grundsätzlich in zwei Kategorien gefasst werden kann: Unbestimmtheit aus Mangel an Information und aus begrifflicher Unschärfe. Hier kann wieder der Bezug zu Rommelfangers Theorie gesehen werden, insbesondere bei einer Unbestimmtheit aus Mangel an Information [44].

Wichtig erscheint nunmehr die Tatsache, dass der Begriff Unbestimmtheit grundsätzlich als Synonym für Informationsmängel und Unschärfe steht. Dem steht gegenüber, dass die Begriffe Informationsmangel, Unsicherheit sowie Ungewissheit niemals Synonyme für eine Unschärfe darstellen. Ungewissheit und Unsicherheit sind im Prinzip Begriffe, die im Normalfall in der Stochastik zu finden sind und für die Modellierung von Informationsmängeln genutzt werden. In Abbildung 9 ist der Begriff Unbestimmtheit mit den jeweiligen Unterbegriffen dargestellt. Eine Erklärung der Abbildung folgt darauf.

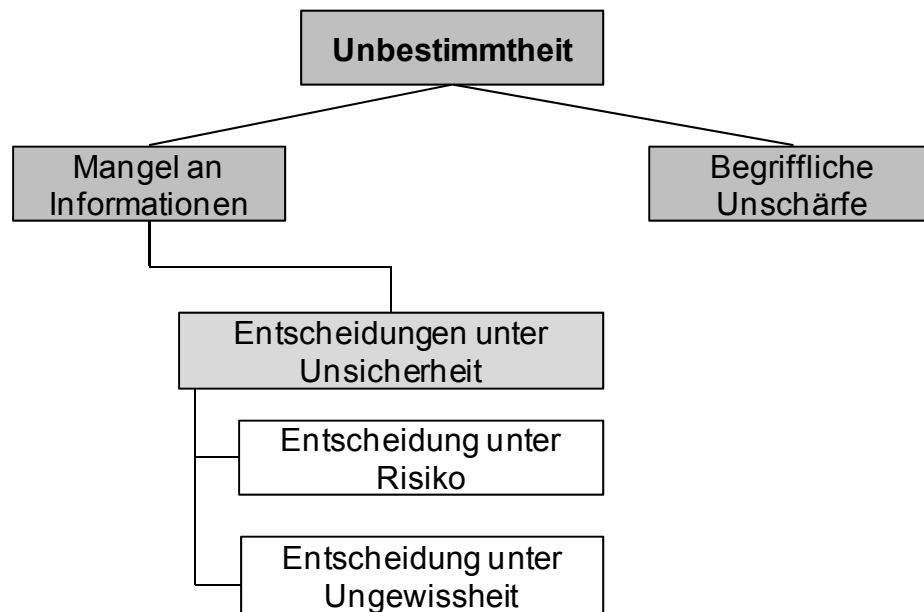


Abbildung 9: Unbestimmtheit bei Entscheidungen, nach [103, S.23]

Es stellt sich die Frage, worin eine genaue Differenzierung der beiden Begrifflichkeiten Unschärfe und Unsicherheit besteht. Betrachtet man eine klassische Entscheidungssituation für die Wahl eines Bauverfahrens, so wird schnell deutlich, dass ein Entscheidungsträger mit unscharfen und qualitativ mangelhaften Informationen konfrontiert wird. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass Daten sich nur ungenau bestimmen lassen. In einem Beispiel wäre dies mit der Bauzeit zu vergleichen. Zu Beginn einer Planung kann die Bauzeit nur abgeschätzt werden. Zwar existieren klare Vorgaben, wann der Bau beendet sein muss. Dennoch sind ausführende Unternehmen durchaus in der Lage eine Zeitspanne festzulegen, die jedoch aufgrund fehlender Informationen mit Unschärfen behaftet ist. Diese Art der Unschärfe beschreibt demnach äußere Gegebenheiten, welche direkt auf das zu untersuchende Subjekt Einfluss nehmen.

Eine zweite Form der Unschärfe stellen linguistische Größen dar. Bspw. ist dies der Fall, wenn von niedrigen Kosten oder hohem Verschleiß gesprochen wird, also wenn linguistische Terme einen Sachverhalt beschreiben wollen. Auf diese Art und Weise ist ein Projektplaner im Zuge einer Investitionsentscheidung gezwungen, solche unscharfen Größen genau darzustellen, wobei grundsätzlich mit einem scharfen Wert gerechnet wird. Entscheidungsträger erhalten auf diesem Wege eine scheinbar scharfe Zahl und somit ein scharfes, anscheinend transparentes Ergebnis. Diese Exaktheit ist jedoch in dieser Form nicht vorhanden, da äußere Einflüsse bzw. die angesprochene begriffliche Unschärfe nicht mitberücksichtigt werden. Gerade solche Entscheidungssituationen sind heutzutage weiterentwickelt worden, so dass unscharfe Faktoren in die Entscheidungsmodelle integriert werden können [117, S.9]. Zadeh hat für die Berücksichtigung unscharfer Sachverhalte die Fuzzy-Set-Theorie entwickelt, auf die in Kapitel 5 näher eingegangen wird [210].

Es stellt sich weiterhin die Frage, inwiefern sich eine begriffliche Unschärfe von einem Mangel an Informationen unterscheidet. Wie bereits beschrieben, sollte ein Entscheidungsträger zwischen Modellierungen mittels stochastischer und Fuzzy-Set-Methoden unterscheiden können. Beispielhaft sei dies an folgendem Sachverhalt zu beschreiben:

- Im Zuge einer Projektplanung erwähnt ein Gutachter, dass Lärmemissionen für angrenzende Anwohner mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% eingehalten werden können.
- Ein weiterer Gutachter sagt aus, dass Lärmemissionen grundsätzlich selten überschritten werden.

Der Unterschied der beiden Aussagen liegt im Informationsgehalt bzw. in der Beschreibung der Sachverhalte. Die erste Aussage ist dabei unsicher, die zweite Aussage unscharf. Betrachtet man die erste Aussage, so wird deutlich, dass eine unvollkommene Information bzgl. der Lärmemissionen vorliegt. Der Entscheider weiß zu diesem Zeitpunkt nicht, ob die Werte eingehalten oder überschritten werden. Folglich handelt es sich hierbei um eine Modellierung der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Der Entscheider beruft sich hier auf Meinungen und unsicheren Datengrundlagen, die lediglich Wahrscheinlichkeiten hervorrufen.

Betrachtet man hingegen die zweite Aussage, so wird hier deutlich, dass die Begriffe einen Sachverhalt beschreiben. Genaue Zahlen oder Wahrscheinlichkeiten sind hier nicht mehr von Bedeutung, so dass durch die Nutzung von Begriffen die Aussagen eine gewisse Subjektivität beinhalten. Die Begriffe 'grundsätzlich selten' können für einen Entscheider bedeuten, dass die Lärmemissionen bspw. nur in 10% der Bauzeit überschritten werden. Ein anderer Entscheider sieht diesen Sachverhalt anders, so dass er durchaus eine höhere Zahl ansetzen könnte. Eine deduktiv-logische Ableitung einer Entscheidung ist so nicht mehr möglich. Folglich kann eine Unschärfe als eine Eigenschaft von Entscheidungsprämissen angesehen werden.

3.6.2.1 Entscheidung unter Unsicherheit

Im Zuge einer Entscheidung ist es demnach von großer Bedeutung, wie Informationen vorliegen. Wie bereits beschrieben, können Entscheidungen unter Sicherheit und Unsicherheit entstehen, wobei die Art der Informationen eine entscheidende Rolle spielt. Der Charakter einer Information kann für die Wahl einer Alternative somit ausschlaggebend sein. In der Literatur wird in perfektem und unperfektem Wissen unterschieden, wobei das perfekte Wissen eine Situation unter Sicherheit kennzeichnet. Hier sagt Bosch, dass solche vollkommenen Zustände für eine Entscheidungsfindung nicht von Interesse sein müssen, da vollkommenes Wissen die Alternativenmenge bzw. das Entscheidungsfeld überflüssig machen [17, S.46]. In einem solchen Fall würde es immer genau einen exakten Weg zum Ziel geben, so dass aufgrund der deterministischen Daten eine Bildung von Erwartungen erübrigt würde [44, S.10].

Anders sieht es hingegen bei Entscheidungen aus, wenn Informationen nicht exakt vorliegen, so dass eine rationale Wahl, bedingt durch das Wegfallen von Annahmen, zu einer mit Unsicherheiten behaftete Entscheidung wird. Die Folge ist, dass ein solcher Zustand an einer Zufallskomponente geknüpft ist, so dass bspw. eine Entscheidung unter Risiko nunmehr mittels Eintrittswahrscheinlichkeiten stattfinden muss. Solche Eintrittswahrscheinlichkeiten lassen sich nach Dörsam in subjektive und objektive Eintrittswahrscheinlichkeiten unterteilen, wobei objektive Eintrittswahrscheinlichkeiten stochastisch generiert werden können [59, S.11]. Folglich lässt sich sagen, dass Entscheidungen bei Ungewissheit nicht mit Wahrscheinlichkeiten gelöst werden können. Solche Bewertungen erfolgen anhand spezieller Kriterien und Regeln, die nicht auf stochastischen Methoden basieren.

Eine weitere Definition zu Entscheidungen unter Unsicherheit liefern die Autoren Hauptmanns und Werner [77] sowie Knetsch [95], die die Unsicherheit in eine aleatorische sowie epistemische Unsicherheit unterteilen. Erstere treten grundsätzlich zufällig auf und unterliegen zumeist einer stochastischen Streuung. Die stochastische Streuung wiederum kann mit der Nutzung von Wahrscheinlichkeiten beschrieben werden, so dass die aleatorische Unsicherheit der Kategorie ‚Entscheidung unter Risiko‘ zugeordnet werden kann. Bezogen auf die Entscheidungsfindung für die Wahl des besten Bauverfahrens ist der Ausfall einer Ampelsignalanlage zu nennen, die bspw. bei einer Ausführung in offener Bauweise zum Einsatz kommt. Dadurch dass die Anlage ausfällt, ist mit längeren Stauungen und größerem Verkehrsaufkommen zu rechnen, was schließlich negative Auswirkungen für die Alternative der offenen Bauweise haben könnte.

Eine epistemische Unsicherheit ist dadurch gekennzeichnet, dass Zustände aus unvollständigem Wissen resultieren. Auf die vorliegende Problematik bezogen bedeutet diese Art der Unsicherheit, dass bspw. eine Rohrvortriebsmaschine ausfallen könnte und der genaue Umstand des Schadens nicht bekannt ist. Nach Analyse dieses Schadens lässt sich eine solche Vortriebsmaschine verfahrenstechnisch verbessern, so dass in Zukunft mit weniger Ausfällen zu rechnen ist.

Es ist zu erkennen, dass für die vorliegende Arbeit die aleatorische Unsicherheit eine maßgebende Rolle spielt, da bestimmte Zustände durch die Vergabe von Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden können. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit sollen jedoch die allgemeineren Begriffe ‚Entscheidungen unter Risiko‘ genutzt werden.

Betrachtet man eine Entscheidungssituation für unterirdische Infrastruktur, so lässt sich jetzt festhalten, dass grundsätzlich viele risikobehaftete Umweltzustände existieren, die einen Einfluss auf die Wahl eines Bauverfahrens haben. Aus diesem Grund sind solche Informationen in ein Entscheidungsmodell zu integrieren, indem für verschiedene maßgebende Zustände Wahrscheinlichkeiten vergeben werden.

3.6.2.2 Begriffliche Unschärfe

Wie bereits beschrieben soll der Begriff Unschärfe in dieser Arbeit grundsätzlich nicht im stochastischen Sinn verstanden, sondern vielmehr in Verbindung mit einer gewissen Vagheit gebracht werden. Genauer gesagt soll die hier verwendete Unschärfe aus linguistischen Begrifflichkeiten herrühren. Um die Unschärfeproblematik während einer Entscheidungssituation noch exakter zu verdeutlichen, ist eine weitere Unterteilung der Unschärfe notwendig. Nach Tietze lässt sich Unschärfe in drei Kategorien unterteilen [188, S.45-47]:

Von *intrinsic* Unschärfe wird gesprochen, wenn zur Beschreibung von Informationen Begriffe verwendet und konkrete Daten (z.B. Maßzahlen) nicht genutzt werden. Auf diese Art ist es dem Entscheider möglich, Sachverhalte subjektiv zu beschreiben und in die Entscheidung mit einfließen zu lassen. Als Beispiel sei hier die ‚hohe Vortriebsleistung‘ einer Tunnelvortriebsmaschine oder aber auch die *sehr laute Maschinentchnik* genannt.

Die *informationale Unschärfe* beschreibt im engeren Sinne Unschärfen, die komplexe oder kombinierte Informationen beinhalten, die ein Entscheider ohne weiteres nicht deutlich erfassen und prognostizieren kann. Übertragen auf eine konkrete Entscheidungssituation für unterirdische Infrastruktur sind die Auswirkungen des Baus auf die unmittelbare Umwelt zu nennen. Im Zuge der Planung könnten zwar viele Aspekte bzgl. einer möglichen Umweltbelastung erfasst werden, jedoch lässt sich erst nach Abschluss der Arbeiten feststellen, ob die Baumaßnahme eventuelle Auswirkungen auf die Umwelt hat.

Bei der *relationalen Unschärfe* hingegen wird eine Ähnlichkeit eines Umweltzustands erfasst, indem bspw. linguistische Terme wie ‚etwas kleiner als‘ oder ‚ein wenig mehr als‘ genutzt werden. Aus diesem Grund sind unscharfe Zwischenstufen notwendig.

3.6.3 Ergebnis einer Entscheidung

Nach Laux stellt das Ergebnis einer Entscheidung eine Konsequenz dar. Darüber hinaus erhält der Entscheider ein Ergebnis, welches von der Wahl einer Handlungsalternative sowie dem Umweltzustand abhängig ist [103, S.21ff]. Bezogen auf diese Arbeit könnte ein Ergebnis einer Entscheidung quantitativer Natur sein, z.B. wenn es um die Frage der geringsten Kosten geht, oder qualitativer Natur, wenn eine mögliche Umweltbelastung beurteilt werden muss. Laux unterscheidet abschließend nach sicheren, wahrscheinlichen, ungewissen sowie unscharfen Ergebnissen.

3.6.4 Ziele und Kriterien einer Entscheidung

Laux [103], Eisenführ und Weber [62] sowie Keeney [91] untersuchen in ihren Arbeiten die speziellen Aufgaben der Ziele und Kriterien einer Entscheidung. Ziele und Kriterien stehen dabei in engem Zusammenhang und werden gegenseitig beeinflusst. Das Ziel einer Entscheidung stellt einen künftigen Zustand dar, welcher durch quantifizierbare Kri-

terien erreicht werden kann. Jedoch sind für die Klassifikation von solchen Entscheidungen die Anzahl der Ziele von Wichtigkeit. Bspw. handelt es sich um ein unikriterielles Entscheidungsproblem, wenn genau nur ein Ziel verfolgt wird, wohingegen es sich um ein multikriterielles Entscheidungsproblem handelt, wenn mehrere Ziele verfolgt werden [209, S. 8]. Übertragen auf das Beispiel zur Wahl des besten Bauverfahrens ist die Verfolgung mehrerer Zielstellungen durchaus möglich. Bspw. ist nicht nur die Minimierung von Kosten, sondern auch die Reduktion von Umweltbelastungen von Bedeutung. Aus diesem Grund handelt es sich bei der Bewertung unterirdischer Infrastrukturprojekte um multikriterielle Fragestellungen.

Nach Keeney ist eine weitere Unterscheidung für Kriterien von Bedeutung [91]. Insgesamt sind für die Nutzung von Kriterien fünf Attribute notwendig. Die Vollständigkeit von Kriterien besagt, dass alle Ziele grundsätzlich erfasst werden müssen. Jedoch ist darauf zu achten, dass nicht erfasste Ziele die Entscheidung nicht beeinflussen dürfen. Eine Redundanzfreiheit ist dann gegeben, wenn Kriterien sich nicht wiederholen, vor allem dann, wenn Kriterien nicht klar definiert sind. Mehrere Kriterien können so die ein und dieselbe Bedeutung haben, was ebenfalls zu Ergebnisverfälschungen führen kann. Hierzu ist auch die Präferenzunabhängigkeit hinzuzuziehen, da diese für den Entscheider maßgebend ist. Vor allem deswegen, weil eine Präferenz hinsichtlich eines Kriteriums stets unabhängig von der Ausbildung eines anderen Kriteriums sein muss. Um Kriterien oder auch Ziele, welche beide leicht zu verstehen sein müssen und vergleichen zu können, muss eine Messbarkeit gewährleistet sein, um so den Grad der Zielerfüllung festzustellen. Die einzelnen Merkmale sind in Abbildung 10 dargestellt.

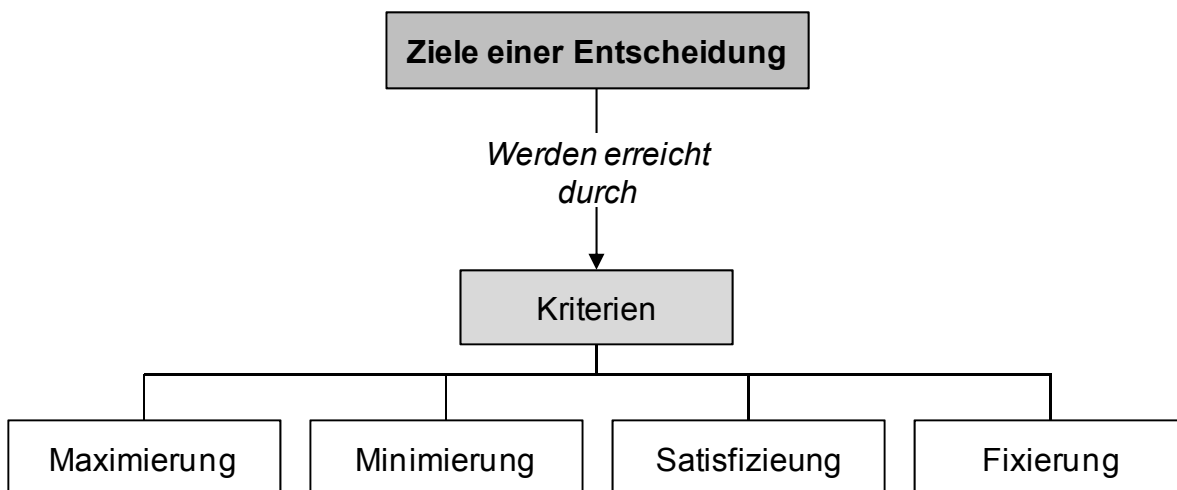


Abbildung 10: Merkmale von Kriterien, nach [91, S.50ff]

Zur Messung der Ziele und Kriterien sind unterschiedliche Skalen zu verwenden. Je nachdem welches Ziel erreicht bzw. welche Präferenz ausgedrückt werden soll, können nach Zimmermann und Gutsche insgesamt fünf klassische Skalen herangezogen werden, die in folgender Abbildung 11 dargestellt sind [218].

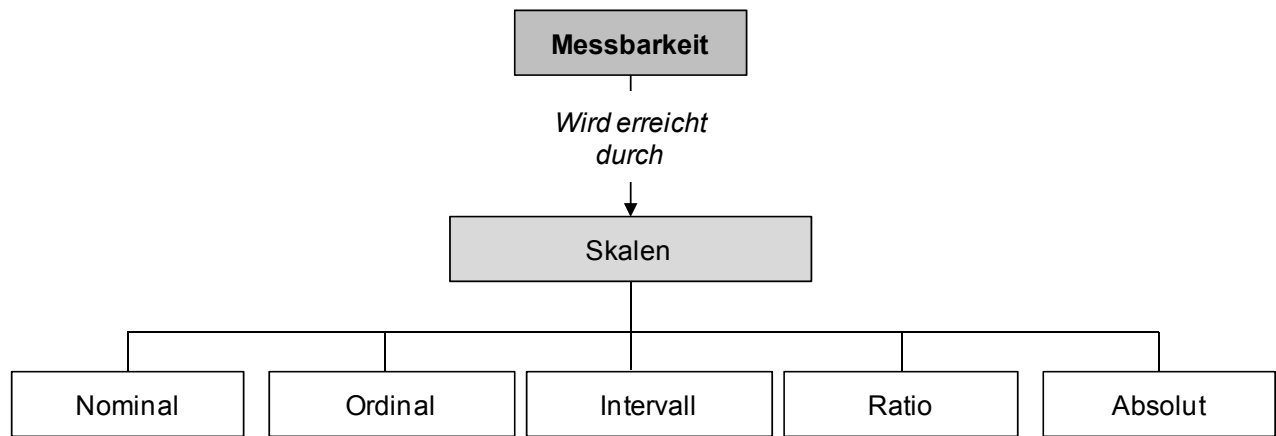


Abbildung 11: Messbarkeit von Kriterien und Zielen, nach [218, S.11f.]

Eine Nominal-Skala stellt lediglich eine Klassifizierung dar. Der Informationsgehalt für eine bevorstehende Bewertung ist hierbei relativ gering. Mit den Merkmalen einer Nominal-Skala, welche sowohl durch Zahlen als auch linguale Terme ausgedrückt werden kann, ist keine Wertung oder Anordnung verbunden. Es existiert demnach keine ersichtliche Rangfolge, so dass ihre Werte nicht vergleichbar sind. Beispiele hierfür könnten sein: Diesel- oder Benzinfahrzeug, ethnische Zugehörigkeit der Baustellenarbeiter.

Durch eine natürliche Ordnung von Zahlen sind Objekte in der Ordinal-Skala insofern messbar, als dass diese geordnet werden können. Arithmetische Verknüpfungen sind nicht möglich, genauso wenig wie natürliche Abstände zwischen den Rängen. Die ordinalskalierten Variablen geben lediglich Auskunft über die Stärke der Intensität eines Sachverhaltes. Die Abstände zwischen den Werten können jedoch nicht interpretiert werden. Bspw. ist dies der Fall bei Notenrankings oder Wassergüteklassen.

Im Unterschied zu der Ordinal-Skala lassen sich bei einer Intervall-Skala die Abstände zwischen den verschiedenen Merkmalsausprägungen exakt bestimmen. Im Vergleich zu der Ratio-Skala existiert bei der Intervall-Skala kein natürlicher Nullpunkt. Denn durch die Einführung eines natürlichen Nullpunktes ist es möglich, dass Verhältnisse zwischen einzelnen Skalenwerten geschaffen werden können. Beispiele für eine Intervall-Skala sind Jahreszahlen oder auch Temperaturen auf einer Celsius-Skala, da der Nullpunkt der Celsius-Skala willkürlich gesetzt wurde. Die Ratio-Skala stellt das höchste Skalenniveau in der Statistik dar. Es handelt sich dabei um eine metrische Skala, die im Vergleich zur Intervall-Skala einen natürlichen Nullpunkt besitzt. Im Zuge einer Planung treten fast ausschließlich derartige Merkmale auf. Beispiele dafür, die auch im Zuge einer Projektbewertung eine wesentliche Rolle spielen können, sind: Zeitdauer einer Baumaßnahme, Massen des abgebauten Bodens, Kosten, Lautstärke, Temperatur in Kelvin, Grundwasserhöhe etc.

Die Absolut-Skala unterscheidet sich von der Ratio-Skala dahingehend, dass im Gegensatz dazu eine natürliche Einheit existiert. Als Beispiel seien hier Stückzahlen aus einer Produktion oder Wahrscheinlichkeitswerte genannt.

Intervall-, Ratio- sowie Absolut-Skalen sind Unterteilungen der sogenannten Kardinal-Skala, da alle Skalenwerte reelle Zahlen sind und alle Ordnungseigenschaften der reellen Zahlen besitzen.

3.7 Eingrenzung von Entscheidungsmodellen

Aufgrund der Tatsache, dass die klassische Entscheidungstheorie häufig Anwendung in der Betriebswirtschaftslehre findet, sind auch viele Modelle auf betriebswirtschaftliche Fragestellungen ausgerichtet. Aus diesem Grund bewerten viele Modelle vor allem auf der Grundlage der quantitativen Maximierung ihrer Kriterien, bspw. bei prozentualer Darstellung der Ergebnisse. Das setzt allerdings voraus, dass die Kriterien zum einen quantifizierbar sind und zum anderen, dass sich ihre Präferenz vor allem dann herausstellt, wenn sie maximal wird. Für monetäre Kriterien wie etwa Gewinn ist diese Forderung zweifelsfrei gegeben. Im Rahmen von unterirdischen Infrastrukturmaßnahmen spielen jedoch zunehmend qualitative Kriterien, wie etwa ökologische Aspekte eine wichtige Rolle. Diese können nur schwer mit monetären Kriterien gleichgesetzt und anschließend bewertet werden.

Bei der Bewertung solcher unterirdischer Infrastrukturmaßnahmen handelt es sich zu meist um einmalige strategische Entscheidungen. Hierbei müssen die Entscheider ermitteln, welche Lösung für die Wahl des Bauverfahrens herangezogen werden soll. Die Wahl des Bauverfahrens wird dabei aus einer diskreten Menge an Handlungsalternativen ermittelt. In der Praxis hat sich eine Untersuchung von ökonomischen, ökologischen, technischen sowie sozio-kulturellen Aspekten als zwingend notwendig erwiesen. Solche Aspekte müssen zu Zielen formuliert werden, die durch verschiedene Kriterien repräsentiert werden. Dabei ist die Beschreibung solcher Kriterien ebenfalls von enormer Bedeutung, insbesondere dann, wenn es sich um unscharfe, scharfe, stochastische oder gar statistische Beschreibungen handelt. Folglich ist für die Bewertung unterirdischer Infrastruktur ein Entscheidungsmodell heranzuziehen, welches für einmalige Einzelentscheidungen konzipiert werden kann und eine Mehrfachzielsetzung aufweist.

Eine solche Entscheidungsunterstützung ist auch unter dem Begriff Multi Criteria Decision Making (MCDM oder auch Multikriterielle Entscheidungsverfahren) bekannt, welche wiederum in Multi Objective Decision Making (MODM) sowie Multi Attribute Decision Making (MADM) unterteilt werden können. MODM-Verfahren werden für stetige Lösungsräume angewendet. Bei dieser Art der Verfahren ist eine konkrete Anzahl der Alternativen nicht bekannt, so dass die Menge der einzelnen Elemente durchaus unendlich groß sein kann., MADM-Verfahren werden für Fragen hinsichtlich diskreter Lösungsräume genutzt, so dass eine konkrete Handlungsalternative aus einer endlichen, meist kleinen Anzahl von Alternativen bestimmt wird [62] [218].

Im Gegensatz zu den unikriteriellen Entscheidungsmodellen beschreiben MCDM-Verfahren die Realität einer Entscheidung merklich idealer [125]. Bspw. ist in einer

Entscheidergruppe eine Minimierung des CO₂-Ausstoßes ein gefordertes Ziel, dennoch führt die Nutzung lediglich nur eines Zieles nicht zum Erfolg, da weitere Nebenbedingungen wichtig sind (z.B. Kostenminimierung oder die optimale Baustellenlogistik).

In Tabelle 2 sind die in diesem Kapitel gemachten Angaben zusammengefasst, wobei die hervorgehobenen Felder die Ausprägungen darstellen, die zur Wahl eines Entscheidungsverfahrens von Bedeutung sind.

Variable	Ausprägung					
Ziele	Ein Ziel			<i>Mehrere Ziele</i>		
Alternativen	<i>Diskreter Lösungsraum</i>			Stetiger Lösungsraum		
Umweltzustände	<i>Sicherheit</i>			<i>Unbestimmtheit</i>		
				Unge- wissheit	<i>Un- scharfe</i>	<i>Risiko</i>
Attributs- informationen	Keine	Nominal	Ordinal	Intervall	<i>Ratio</i>	<i>Absolut</i>

Tabelle 2: Zusammenstellung der maßgeblichen Variablen und Ausprägungen

Nach Abwägung aller oben benannten Ausprägungen kann die Wahl für ein Entscheidungsverfahren nur auf ein MCDM-Verfahren fallen. Aufgrund der Tatsache, dass Alternativen für die Wahl eines Bauverfahrens stets aus einem diskreten Lösungsraum stammen, sind nunmehr Multi Attribute Decision Making-Verfahren zu wählen, welche auch für den Umweltzustand „Sicherheit“ zutreffen. Für die übrigen Umweltzustände sind, wie bereits erwähnt, stochastische, statistische bzw. Fuzzy-Verfahren heranzuziehen. Üblicherweise beinhalten Bauprojekte stets Randbedingungen, welche unvorhersehbar bzw. nur unscharf beschreibbar sind, so dass der klassische MADM-Ansatz um diese Aspekte erweitert werden muss. Diese Erweiterungen werden in den folgenden Kapiteln noch näher beschrieben.

Bezugnehmend auf die Messbarkeit der Attributsinformationen lassen sich nach Ossadnik erstmalig genaue Angaben über spezielle Entscheidungsverfahren machen [125, S.23]. In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass MADM-Verfahren stark von der Messbarkeit der Attribute abhängig sind. Unter der Prämisse, dass eine kardinale Attributinformation für die Wahl eines Bauverfahrens wichtig ist, sind MADM-Verfahren wie die

Nutzwertanalyse, Outranking-Verfahren sowie der Analytische Hierarchie Prozess näher zu untersuchen.

Zur Vervollständigung sind in folgender Abbildung einige MODM-Verfahren aufgelistet, die sich analog zu den MADM-Verfahren hinsichtlich Ihrer Qualität und Art der Information unterscheiden.

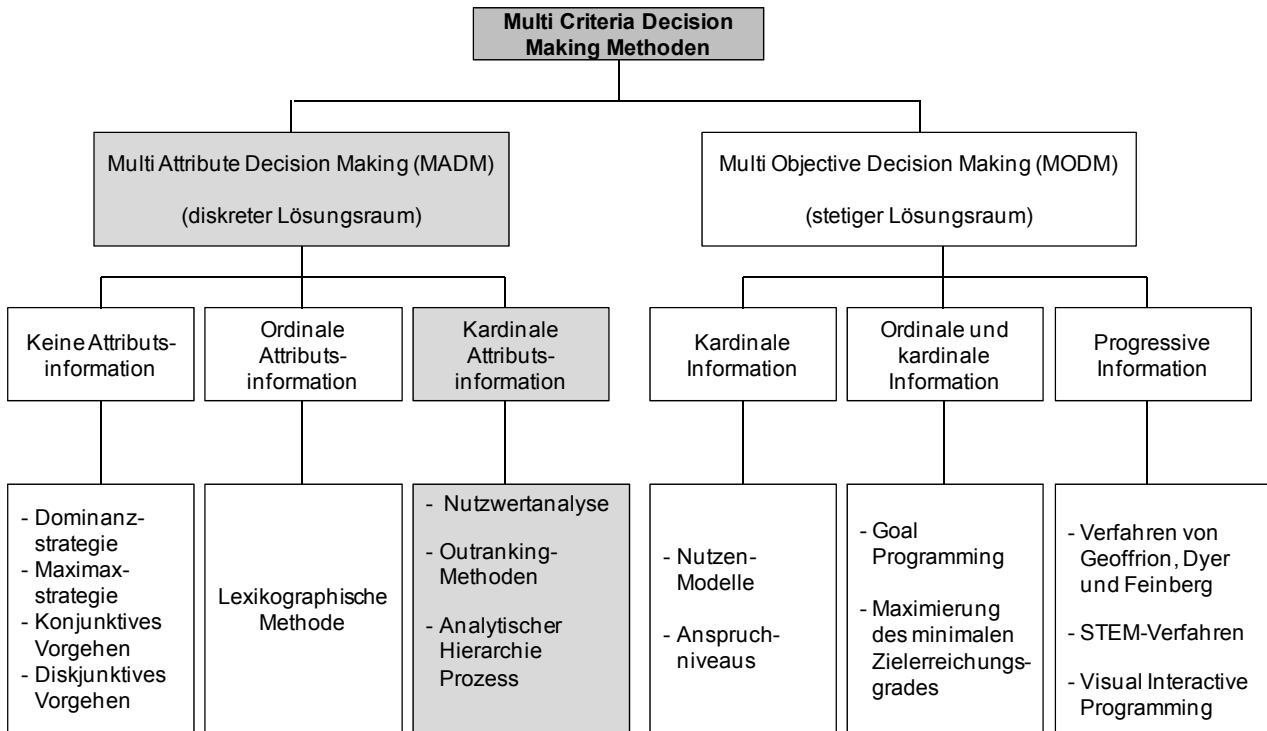


Abbildung 12: MCDM-Methoden, nach [125, S.23] [218]

Um die Wahl eines Entscheidungsverfahrens zu treffen, werden im folgenden Kapitel klassische MCDM-Verfahren vorgestellt und hinsichtlich einer Adaptierbarkeit untersucht.

4 Multikriterielle Entscheidungsverfahren

4.1 Allgemeines

Mit Hilfe der multikriteriellen Entscheidungsverfahren besteht die Möglichkeit, Entscheidungen intuitiv (personenbezogenes Ergebnis) oder analytisch (zu Hilfenahme von mathematischen Methoden und Kennzahlen) zu treffen. Ein Entscheider hat die Möglichkeit Informationen zunächst zu sammeln. In einem weiteren Schritt werden diese geordnet und bewertet. In Abhängigkeit des zu lösenden Problems kann mit beiden Methoden die bestmögliche Entscheidung getroffen werden.

Multikriterielle Entscheidungsverfahren lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen aufteilen: multiobjektive und multiattributive Verfahren [218, 25ff] [204, S.11]. Multiobjektive Verfahren beschäftigen sich mit Problemen, deren Lösungsraum stetig ist [218, S.96ff] [199, S.16]. Das bedeutet, dass es sich hierbei um Probleme mit mehreren vorgegeben Zielen handelt, die unter Einhaltung von Restriktionen erreicht werden sollen. Aufgrund dessen werden diese Entscheidungen häufig mit Hilfe von linearer Programmierung gelöst.

Bei multiattributiven Verfahren ist im Vergleich dazu der Lösungsraum diskret, d.h., es wird auf Grundlage einer festgelegten Anzahl von Attributen ein Ziel (oder mehrere Ziele) angestrebt [218, S.34ff]. Eine Möglichkeit der Klassifizierung der zahlreichen Verfahren richtet sich nach dem Grad der Informiertheit des Entscheiders. Die Bewertung der Alternativen wird durch die Wahl von Attributen gewährleistet, welche nicht zwingend in Zahlen formuliert sein müssen, sondern auch qualitativer Natur sein können. Die folgende Abbildung 13 gibt einen ersten Überblick über die Verfahren und listet zur Vervollständigung einige MODM-Verfahren auf.

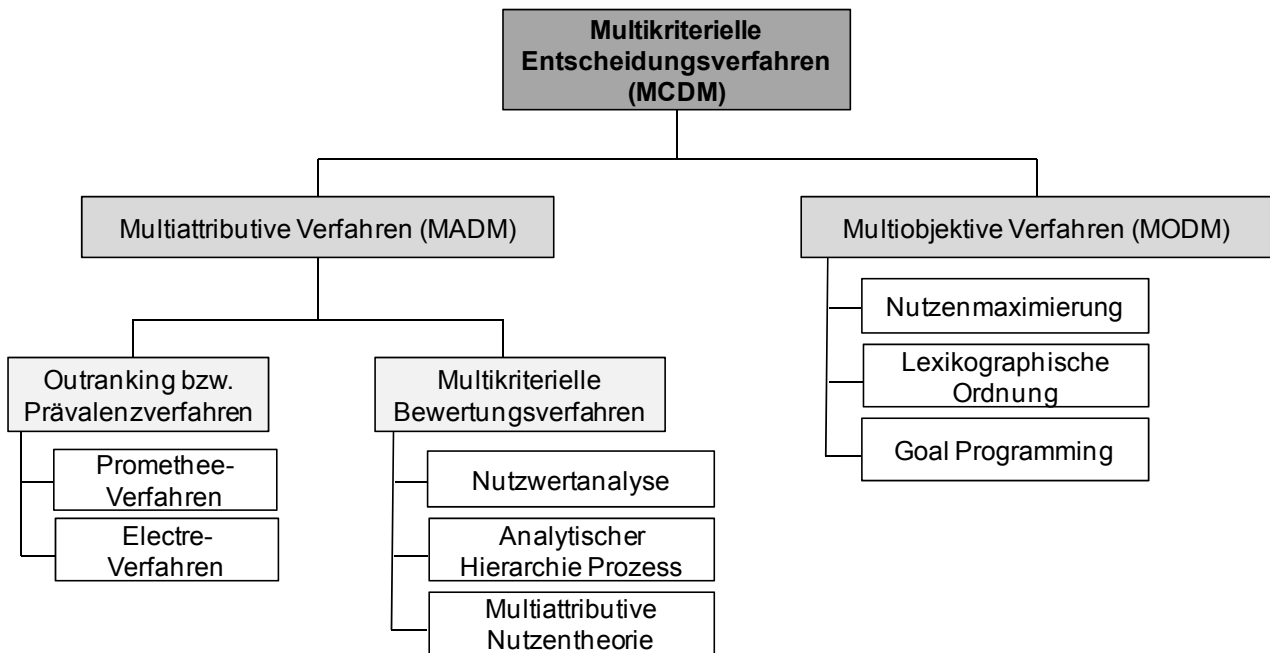


Abbildung 13: Überblick über multikriterielle Entscheidungsverfahren, nach [199, S.30]

Ein wichtiges Element, um die einzelnen Attribute bzw. Kriterien untereinander vergleichen zu können, ist das zu verwendende Messverfahren, wie es bereits im vorherigen Kapitel dargestellt wurde, wobei gerade bei qualitativ zu bewertenden Attributen die Benutzung einer einheitlichen Skala von großer Bedeutung ist.

Wie bereits in Kapitel 3 gezeigt, stellt die Kardinalskala im Allgemeinen die Skala dar, die am vielfältigsten einsetzbar ist. Sie ermöglicht alle mathematischen Operationen, so dass eindeutige Berechnungen durchführbar sind. Zudem erlaubt sie, Aussagen über das Verhältnis der Daten zueinander zu treffen, wie etwa *„Alternative A ist im Bezug auf Kriterium X fünfmal besser als Alternative B“*. Aufgrund der breit gefächerten Anwendbarkeit dieser Skala stellt sie die Grundlage für viele MADM-Verfahren dar.

4.2 Multiobjektive Bewertungsverfahren

Nach von Nitzsch besteht das Ziel multiobjektiver Bewertungsverfahren darin, dass innerhalb der Bewertung die Anzahl an unendlichen Alternativen soweit minimiert wird, bis nur noch eine Alternative mit dem größten Nutzen übrigbleibt [199, S.16]. Diese Prämisse hat zur Folge, dass solche Bewertungsprobleme nur mit mathematischen Methoden gelöst werden können, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

4.2.1 Nutzenmaximierung

Die Methode der Nutzenmaximierung geht davon aus, dass ein Entscheider die Alternative auswählt, die den größten Nutzen für ihn hat. Der Entscheider ermittelt Nutzenfunktionen und eventuelle Nebenbedingungen, welche eine Maximierung des Nutzens herbeiführen. Nutzenmaximierungen werden vermehrt in den Theorien der Volkswirtschaft verwendet, wenn es um die Ermittlung von Nutzwertbestimmungen geht [153]

4.2.2 Lexikographische Ordnung

Die lexikographische Ordnung findet im Bereich der Zielgewichtung ihre Anwendung. Die Bezeichnung leitet sich von der alphabetischen Anordnung in einem Lexikon ab [170, S. 125]. Tritt bei der Vorgehensweise der Zielunterdrückung der Fall ein, dass auch bei Betrachtung nur eines Zieles keine eindeutige Wahl getroffen werden kann, weil zwei oder mehr Handlungsalternativen bzgl. dieses Zieles gleichwertig sind, wird die lexikographische Ordnung angewendet. Die Beurteilungskriterien werden nach ihrer Wichtigkeit eingestuft. Anhand des wichtigsten Kriteriums werden die Varianten ausgewählt, die dieser wichtigsten Anforderung genügen, so dass übrige Alternativen direkt herausfallen. Die übrigen Alternativen werden dann hinsichtlich des nächst wichtigeren Kriteriums geprüft bis eine Variante letztendlich übrig bleibt. Man erkennt, dass diese Methode relativ einfach anzuwenden ist, jedoch lassen sich keine Hierarchie oder Unterkriterien erstellen, so dass eine ganzheitliche Bewertung erfolgen kann. Darüber hinaus müssen sich alle am Entscheidungsprozess beteiligten Personen über die Bedeutung der Kriterien einigen. Im Prinzip ist eine gleichzeitige Betrachtung aller Kriterien unmöglich, bspw. auch dann wenn Wechselwirkungen zwischen den betrachteten Kriterien bestehen, die ohne weiteres nicht mehr untersucht werden können [128, S. 341]. In folgendem Beispiel (Tabelle 3) wird die Problematik des Verfahrens kurz vorgestellt. Insgesamt werden vier Kriterien (Technik, Umwelt, Kosten und Soziales) und drei Alternativen untersucht. Die Bewertung erfolgt über eine Punkteskala, die jedoch frei wählbar ist, da keine klaren Richtlinien hinsichtlich einer Skala existieren.

	Technik	Umwelt	Kosten	Soziales
A1	10	12	10	9
A2	8	12	8	15
A3	10	9	5	10

Tabelle 3: Beispiel einer Bewertungsmatrix für die Lexikographische Ordnung

Bzgl. des Kriteriums Technik sind die Alternativen A1 und A3 gleichwertig, ebenso lässt sich bzgl. des Kriteriums Umwelt keine eindeutige Wahl treffen, da hier die Alternativen A1 und A2 gleichwertig sind. Erst bei dem Kriterium Kosten dominiert Alternative A1. Zwar werden die einzelnen Ziele bei der lexikographischen Ordnung nicht gegeneinander substituiert, doch fällt die Entscheidung nicht aufgrund aller vorhandenen Zielgrößen. In oben genanntem Beispiel ist etwa Alternative A2 bzgl. dem Kriterium ‚Soziales‘ gegenüber den anderen am besten geeignet, wird jedoch bei der Entscheidung nicht betrachtet, da bereits im Kriterium Kosten die Alternativen A2 und A3 wegfallen. Sind aber alle vier Zielgrößen für die Ermittlung der optimalen Handlungsalternative wichtig, kann sie anhand der lexikographischen Ordnung nicht mit eindeutiger Sicherheit durchgeführt werden. Es ist ersichtlich, dass ein Verzicht auf die Erfassung von Präferenzunterschie-

den bei den einzelnen Zielen zu erkennen ist. Aus diesem Grund ist es durchaus möglich, dass ein kleiner Unterschied bei einem erstrangigen Kriterium (hier Technik) die Präferenzordnung festlegt, während erheblich bessere Ausprägungen bei nachrangigen Kriterien (z.B. Soziales) nicht berücksichtigt werden. Zudem hat die Rangordnung der Zielgrößen eine große Auswirkung auf die Wahl der Alternativen, so dass ein solches Bewertungsverfahren nicht zu empfehlen ist.

4.2.3 Goal Programming

Das Goal Programming versucht die Summe der gewichteten Abweichungen zu minimieren. Hierzu müssen Zielfunktionen und Nebenbedingungen definiert werden, welche auf graphischem (rechnerischem) Weg gelöst werden. Beispielhaft sei hier ein Fall aus der Produktionsplanung aufgeführt. Mindestens zwei unterschiedliche Güter/Produkte sollen unter Berücksichtigung der Arbeitszeit und Maschinenkapazität aus dem gleichen Rohstoff hergestellt werden. Das Goal Programming kann nunmehr den optimalen Gütermix bestimmen. In dieser Arbeit wird aufgrund der recht umfangreichen Berechnung auf eine genaue Darstellung verzichtet, so dass auf weiterführende Literatur nach [154] verwiesen wird.

4.3 Multiattributive Bewertungsverfahren

Unterschieden werden multiattributive Bewertungsverfahren in Multikriterielle Bewertungsverfahren sowie in Outranking und Prävalenzverfahren. Multiattributive Bewertungsverfahren stützen sich grundsätzlich auf nutzwertorientierte Konzepte, darunter bspw. der Analytische Hierarchie Prozess, die Nutzwertanalyse und die Multiattributive Nutzentheorie [56, S.37]. Diese Modelle setzen dabei voraus, dass der Entscheidungsträger genaue Vorstellungen über Nutzen und Gewichtung von Kriterienausprägungen hat und diese in einem Entscheidungsverfahren integrieren kann [70, S.124f].

4.3.1 Outranking und Prävalenzverfahren

Im Gegensatz zu den Multikriteriellen Bewertungsverfahren beruhen Outranking- und Prävalenzverfahren auf der Annahme, dass es dem Entscheidungsträger nicht möglich ist, seine Präferenzen hinsichtlich der Kriterien bereits zu Beginn festzulegen [70, S.124]. Das Ergebnis ist, dass meist eine größere Auswahl an geeigneten Handlungsalternativen erzeugt wird, so dass nicht unbedingt nur eine präferierte Alternative herausarbeitet werden kann [116]. Zur Vervollständigung sollen jedoch drei Methoden kurz vorgestellt werden. Jedoch kann bereits in diesem Stadium gesagt werden, dass Outranking und Prävalenzverfahren für die Wahl eines Bewertungsverfahrens nicht zu berücksichtigen sind, da bei der Wahl eines Bauverfahrens grundsätzlich nicht nur die Verfahren bereits zu Beginn einer Planung feststehen sondern auch Randbedingungen und Kriterien durch Projektbeteiligte eindeutig definiert werden können.

4.3.1.1 ELECTRE-Methode

Das ELECTRE-Verfahren (Elimination Et Choice Translation Réalité) wurde Ende der 1960er Jahre von Roy und Benayoun entwickelt und findet vor allem im französischsprachigen Raum große Anwendung [218, S.207]. Mittlerweile wurde dieses Verfahren weiterentwickelt, so dass es die Verfahren Electre I-IV gibt.

Das Verfahren basiert auf Paarvergleichen von Alternativen, die die Dominanz einer Alternative über andere herausstellen. Diese Dominanz wird, im Gegensatz zu anderen Verfahren, jedoch nicht als absolut betrachtet. Vielmehr werden Konkordanz- und Diskordanzmengen ermittelt, um die Dominanzbeziehungen der Alternativen untereinander darzustellen [218, S.208 ff]. Auf diese Art und Weise können Outrankingbeziehungen ermittelt werden, die dazu führen, dass Alternativen anhand vorgegebener Grenzwerte ausgeschlossen werden.

4.3.1.2 Promethee-Methode

Der Name der Promethee-Methode leitet sich aus *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment and Evaluations* ab. Es werden zunächst verallgemeinerte Kriterien gebildet, welche ein Entscheider leicht bestimmen kann. Diese verallgemeinerten Kriterien dienen dazu, eine bewertete Outranking-Relation und einen bewerteten Outranking-Graph zu erstellen. Das Verfahren ist für einen Entscheider relativ schwer durchzuführen, da mehrere mathematische Funktionen bestimmt werden müssen. Ohne explizites Fachwissen kann eine Entscheidung ohne weiteres nicht durchgeführt werden [19] [218, S.220f]. Auf eine genaue Darstellung der Berechnungsmethodik wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und auf weiterführende Literatur verwiesen.

4.3.1.3 TOPSIS-Methode

Die TOPSIS-Methode (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) wurde 1981 von Hwang und Yoon entwickelt [82]. TOPSIS ist eine sehr weit verbreitete Methode, welche oftmals auch in Verbindung mit dem noch zu vorstellendem Analytischen Hierarchie Prozess genutzt wird. TOPSIS basiert auf einem geometrisch/graphischen Ansatz, der das Entscheidungsproblem als geometrisches System betrachtet mit einem Punkt A^+ als ideale Lösung und einem Punkt A^- als schlechteste Lösung. Die Auswahl der bestmöglichen Alternative erfolgt dann dadurch, dass die Alternative mit dem kürzesten Abstand zu der idealen Lösung gesucht wird. Die Ausprägungen d aller m Kriterien C_j mit $j=1, \dots, m$ für alle n Alternativen A_i mit $i=1, \dots, n$ werden in eine Entscheidungsmatrix \bar{R} eingetragen.

Anhand folgenden Beispiels soll die Methode näher erläutert werden (Tabelle 4). Fiktiv werden drei maßgebliche Kriterien inklusive einzelner Werte definiert, wobei insgesamt drei Alternativen zur Auswahl stehen.

	Zielgröße 1	Zielgröße 2	Zielgröße 3
A1	50	25	18
A2	40	80	12
A3	60	45	8

Tabelle 4: Fiktive Matrix für die TOPSIS-Methode

(1) Berechnung der normalisierten Rangfolge

Die Werte der obigen Matrix werden normalisiert, um sie auch bei unterschiedlichen Maßeinheiten, etwa Mengeneinheiten wie t oder Geldeinheiten wie €, vergleichen zu können. Hwang und Yoon schlagen für die Normalisierung folgende Formel vor:

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \quad (\text{Gl. 4-1})$$

Daraus ergibt sich die folgende normalisierte Matrix \bar{R} :

$$\bar{R} = \begin{pmatrix} 0,5698 & 0,2628 & 0,7804 \\ 0,4558 & 0,8409 & 0,5203 \\ 0,6838 & 0,4730 & 0,3468 \end{pmatrix}$$

(2) Berechnung der gewichteten normalisierten Rangfolge

Die Werte der normalisierten Matrix werden mit subjektiv ermittelten Faktoren für die einzelnen Zustände (Zielgrößen) gewichtet bzw. multipliziert. Beispielhaft werden die Zielgrößen mit den Faktoren: $w_1 = 0,4$, $w_2 = 0,3$ und $w_3 = 0,3$ multipliziert, so dass sich folgende gewichtete normalisierte Matrix \bar{V} ergibt:

$$\bar{V} = \begin{pmatrix} 0,2279 & 0,0788 & 0,2341 \\ 0,1823 & 0,2523 & 0,1561 \\ 0,2735 & 0,1419 & 0,1040 \end{pmatrix}$$

(3) Bestimmung der idealen und schlechtesten Lösung

Die ideale Lösung (A^+) und die schlechteste Lösung (A^-) werden anhand folgender Formeln bestimmt:

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_i^+, \dots, v_n^+) \quad (\text{Gl. 4-2})$$

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_i^-, \dots, v_n^-) \quad (\text{Gl. 4-3})$$

Geht man davon aus, dass es sich bei den Matrixwerten ausschließlich um Nutzenwerte handelt, ergibt sich die ideale Lösung aus den Maximalwerten der Spalten und die schlechteste Lösung dementsprechend aus den Minimalwerten. Bei vorliegendem Beispiel erhält man damit:

$$A^+ = (0,2735, 0,2523, 0,2341)$$

$$A^- = (0,1823, 0,0788, 0,1040)$$

(4) Berechnung des Abstands der Alternativen zur idealen Lösung

Der Abstand der Alternativen zur idealen Lösung S^+ bzw. zur schlechtesten Lösung S^- wird durch den n-dimensionalen euklidischen Abstand mit folgenden Formeln berechnet:

$$S_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2} \quad (\text{Gl. 4-4})$$

$$S_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2} \quad (\text{Gl. 4-5})$$

Für den Abstand zur idealen Lösung bzw. zur schlechtesten Lösung ergeben sich damit für die einzelnen Alternativen folgende Werte:

$$S_{A1}^+ = 0,1794 \qquad S_{A1}^- = 0,1379$$

$$S_{A2}^+ = 0,1200 \qquad S_{A2}^- = 0,1812$$

$$S_{A3}^+ = 0,1706 \qquad S_{A3}^- = 0,1109$$

(5) Berechnung der Ähnlichkeit zur idealen Lösung

Die Berechnung der Ähnlichkeit erfolgt mit der Formel:

$$c_j^+ = \frac{s_j^-}{s_j^+ + s_j^-} \quad (\text{Gl. 4-6})$$

Für die einzelnen Alternativen ergeben sich daraus die Werte:

$$C_{A1}^+ = 0,4346$$

$$C_{A2}^+ = 0,6016$$

$$C_{A3}^+ = 0,3940$$

Die Rangfolge der Alternativen lässt sich aus diesen Werten ebenfalls ablesen, so dass in diesem Beispiel Alternative 2 zu empfehlen ist.

Die Vorteile des Verfahrens sind in der schnellen Durchführbarkeit begründet, da das Verfahren mathematisch weniger ausgearbeitet ist und Tabellenkalkulationsprogramme den Einsatz erheblich erleichtern. Als Nachteil können die evtl. eingeschränkten, selbst-erstellten Bewertungsfaktoren sein, da diese stark subjektiv ausgewählt werden und keiner speziellen Methode unterliegen, so dass Verfälschungen relativ schnell vorliegen können. Problematisch ist auch die Tatsache, dass Subkriterien nicht erstellt werden

können, so dass eine Feingliederung auf diese Art und Weise ohne weiteres nicht möglich ist bzw. weitere Methoden berücksichtigt werden müssten.

4.3.2 Multikriterielle Bewertungsverfahren

4.3.2.1 Nutzwertanalytische Methoden

a) Nutzwertanalyse in der Standardversion

Die Nutzwertanalyse (NWA) ist ein Mehrzielentscheidungsverfahren zur Bewertung von Handlungsalternativen [171] [10] [6] [140]. Nach Zangemeister versteht man unter einer Nutzwertanalyse die *“...Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bzgl. eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen. Die Abbildung dieser Ordnung erfolgt durch die Angabe der Nutzwerte (Gesamtwerte) der Alternativen.“* [213, S.45]

Die Nutzwertanalyse dient dazu, Planungsalternativen hinsichtlich verschiedenster Bewertungskriterien mit unterschiedlichen Wertdimensionen vergleichend zu bewerten und so eine Rangfolge für die Eignung von Alternativen aufzustellen. Sinnvoll ist ihr Einsatz nur für Alternativenvergleiche, bei denen alle Alternativen eine grundsätzliche Eignung aufweisen müssen und es nur um die vergleichende Bewertung der abwägbaren Vor- und Nachteile und die Ermittlung einer Rangfolge der Alternativen geht.

Wesentliches Kennzeichen von Nutzwertanalysen ist der Aufbau eines hierarchischen Zielsystems, an dessen Spitze der Gesamtnutzen und an dessen Ende kardinal skalierte Indikatoren stehen. Für jedes Unterziel wird logisch geschlossen, welchen Beitrag es für seine Oberziele leistet, wodurch sich die Basis für die Gewichtung bildet. Der Zielerfüllungsgrad einer Alternative wird für jeden Indikator über Nutzenfunktionen ermittelt, um auf dieser Weise den Teilnutzen aus der Multiplikation von Zielerfüllungsgrad mit zugeordnetem Gewicht zu erhalten, während sich der Gesamtnutzen aus der Addition der Teilnutzen ergibt. Das Anliegen der Nutzwertanalyse ist die technische Optimierung. In der Standardversion erweist sie sich als ungeeignet, wenn bspw. Umweltbelange bei der Bewertung von Planungsvorhaben eine Rolle spielen, da sich diese (z.B. Lärmschutz) nicht miteinander verrechnen lassen können und demnach eine Bewertung nur schwer durchgeführt werden kann [135, S.154].

b) Nutzwertanalyse der 2. Generation

Um inakzeptable Alternativen ausschließen zu können, wurde die Nutzwertanalyse durch Bechmann unter Berücksichtigung von Tabu-Kriterien weiterentwickelt [10, S.76ff]. Diese weiterentwickelte Nutzwertanalyse ersetzt die kardinale durch ordinale Nutzenschätzungen, bildet Klassen durch Relevanzbäume und entwickelt eine Wertsynthese, die schrittweise durch Logik aggregiert und alle Wertbeziehungen (Substitution, Konkurrenz, Komplementarität, Indifferenz) zulässt. Komplexe Bewertungsaufgaben mit vielen Kriteri-

en führen zu einem sehr hohen Aufwand und zu einer recht schwierigen Nachvollziehbarkeit für Dritte, so dass die praktischen Anwendungsmöglichkeiten dieser Methodenbausteine an ihre Grenzen stoßen [135, S.156f]. Die Nutzwertanalyse stellt jedoch die Grundlage für weitere Weiterentwicklungen, welche bis hin zu Expertensystemen führen.

4.3.2.2 Der Analytische Hierarchie Prozess

Der Analytische Hierarchie Prozess (kurz: AHP) ist eine Sonderform der NWA und ein Verfahren, das von dem Mathematiker Thomas Lorie Saaty in den 70er Jahren in den USA entwickelt wurde. Die Besonderheit ist die mehrstufige Anordnung von Kriterien und deren Gewichtung, die über mehrere Ebenen abläuft (siehe Abbildung 14). Über die wachsende Feingliederung der Kriterien entsteht eine Baumstruktur [143, S.11-15]. Der Grundgedanke liegt darin, die Ziele und möglichen Lösungsalternativen in einer hierarchischen Struktur zu erfassen und zu gliedern [160]. Der AHP basiert auf den paarweisen Vergleich von Kriterien und Alternativen, welcher mit einer 9-Punkte-Bewertungsskala (AHP-Skala) durchgeführt wird. Im Zuge dieser Bewertung werden im Anschluss über verschiedene Matrizenberechnungen Eigenvektoren berechnet, welche zu einem Gesamtergebnis aggregiert werden [217, S.17-22]. Aufgrund der großen Anzahl an Kriterien, Alternativen und Bewertungen ist der gesamte Rechenprozess ohne die Nutzung einer Software kaum zu bewältigen, so dass der AHP in der Praxis erst ab den 90er Jahren mit Beginn des Computer-Zeitalters erfolgreich zur Verfügung stand [123].

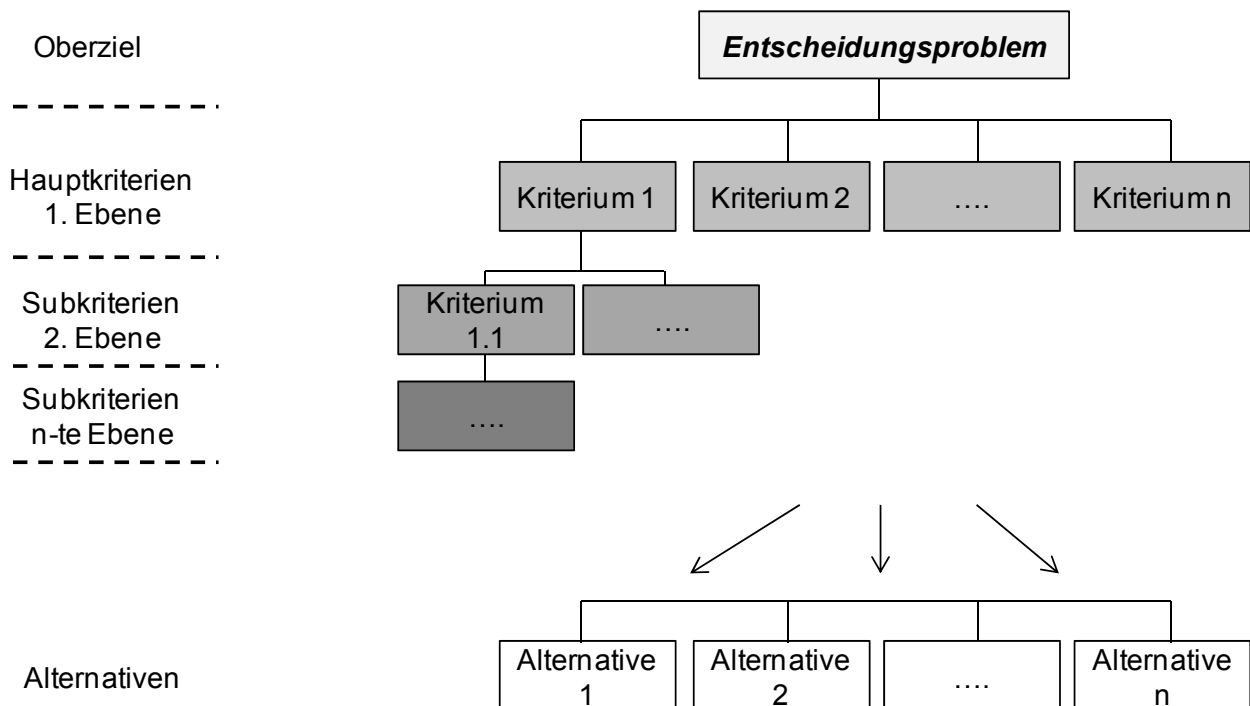


Abbildung 14: Hierarchie von Kriterien und Alternativen, nach [123]

Als analytisch wird der AHP deswegen bezeichnet, weil er die Problemkonstellation in all ihren Abhängigkeiten analysiert. Die entscheidungsrelevanten Informationen werden in eine hierarchische Struktur gebracht. Bei dem AHP handelt es sich ferner um einen Prozess, weil ein prozessualer Ablauf vorgegeben wird, wie Entscheidungen strukturiert und analysiert werden können. Die Entscheidungsfindung und das Ergebnis können mit Hilfe des AHP nachvollziehbar gestaltet werden. Eine weitere Stärke des AHP liegt in dem Aufdecken von Inkonsistenzen, wenn bspw. ein Entscheider unlogische Bewertungen abgegeben hat [218, S.66].

4.3.2.3 Multi Attributive Utility Theory (MAUT)

Die MAUT ist ein weiteres Verfahren zur Ermittlung von Rangfolgen aus Höhen- und Artenpräferenzen, welches im Gegensatz zur Nutzwertanalyse die Einhaltung der nutzentheoretischen Rationalitätsaxiome zur Bedingung macht, so dass ein exakteres Ergebnis zu erwarten ist. In der Praxis wird diese Methode relativ selten angewandt, da hohe Anforderungen an die Entscheider in Bezug auf die Qualität der Informationen gestellt werden. Die vermeintlich hohe Präzision kann in der Praxis ohnehin selten erreicht werden. Wie bereits in den vorherigen Abschnitten beschrieben, unterliegen Informationen zum Teil der subjektiven Wahl des Entscheiders, so dass eine gewisse Unschärfe stets vorhanden ist. Unschärfetrachtungen lassen sich in der MAUT-Methode aufgrund ihrer Komplexität nur schwierig berücksichtigen. Darüber hinaus rückt die fehlende Praxisnähe die MAUT-Methode gegenüber der NWA und dem AHP in den Hintergrund, so dass diese hier nicht näher erläutert wird [60].

4.4 Auswahl eines Multikriteriellen Bewertungsverfahrens

Die hier gezeigten Methoden eignen sich für eine Vielzahl an Entscheidungsproblemen. Für die Entwicklung eines Entscheidungsmodells für unterirdische Infrastruktur ist es wichtig, dass dieses

- einfach zu verstehen ist,
- eine hohe Funktionstüchtigkeit gegenüber komplexen Situationen bietet,
- in Attributen und Merkmalen unterteilt werden kann, so dass Haupt- und Subkriterien entwickelt werden können,
- qualitative und quantitative Kriterien berücksichtigen kann,
- unscharfe und unsichere Daten einbeziehen kann,
- zielorientiert, nachvollziehbar und transparent für Projektbeteiligte gestaltet werden kann.

Moffett und Sarkar zeigen ein Vorgehen auf, wie die richtige Entscheidungsmethodik gewählt werden kann. Dabei bedienen sie sich folgender Fragestellung [114].

„Kann die Performance jeder einzelnen Alternative zu jedem Kriterium auf einer gemeinsamen Skala bewertet werden?“

Nach [114] ist dies nur mit wenigen Methoden wie z.B. dem Analytic Hierarchy Process und Promethee möglich. Unter Berücksichtigung der zuvor erwähnten Forderungen wie z.B. eine einfache Handhabung/Programmierung lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Wahl nach intensiver Abwägung aller Vor- und Nachteile für die weitere Betrachtung der Problematik auf den Analytic Hierarchy Process fällt. Der AHP eignet sich sehr, wenn es um die Strukturierung komplexer Entscheidungsprobleme geht. Das Verfahren arbeitet auf der Basis entscheidungsrelevanter Alternativen und Ziele, und berücksichtigt sowohl qualitative als auch quantitative Daten. Für den praktikablen Einsatz verfügt das Verfahren darüber hinaus über eine relativ einfache Struktur. Nach Meixner und Haas weist der AHP Merkmale wie eine einfache Anwendung, die Nutzung für Einzelpersonen und Gruppen, die Förderung von Kompromiss und Konsens, und die Kommunikation und Transparenz von Ergebnissen auf [112, S.170].

Es ist sinnvoll, ein transparentes und nachvollziehbares Verfahren zu verwenden, um technische, wirtschaftliche, umweltrelevante und soziale Aspekte gleichzeitig und vor allem projektorientiert berücksichtigen zu können. Beim AHP entstehen die Gewichtungen durch Paarvergleiche der Alternativen bzgl. der Kriterien und im Gegensatz dazu werden in der NWA die Werte und Gewichtungen direkt den Alternativen und Kriterien zugeteilt. Die darauf folgende Berechnung ist beim AHP und der NWA wieder gleich. Nach dem Vergleich aller Vor- und Nachteile gilt der besondere Vorzug dennoch dem AHP. Der AHP besitzt die Möglichkeit, komplexe Entscheidungssysteme in einer überschaubaren

Hierarchie darzustellen. Weiterhin kann der AHP sowohl qualitative als auch quantitative Kriterien miteinander kombinieren, Kriterien in Subkriterien unterteilen und diese in einer Hierarchie darstellen, welche über eine einheitliche Skala verfügt, die die Konsistenz und die Stabilität überprüft. Dennoch ist durch den klassischen AHP eine Berücksichtigung unscharfer und unsicherer Daten derzeit nicht gegeben, so dass der AHP in einigen Bereichen noch modifiziert werden muss. Im nächsten Abschnitt soll jedoch zunächst die klassische AHP-Methode vorgestellt werden.

5 Der Analytische Hierarchie Prozess (AHP)

5.1 Allgemeines

Der AHP wurde, wie bereits beschrieben, Anfang der 1970er Jahre von Thomas L. Saaty entwickelt [141] [142] [143] [144]. Im Gegensatz zu vielen anderen Bewertungsmethoden ist das Verfahren nicht nur auf betriebswirtschaftliche Problemstellungen ausgerichtet, sondern ist auch in Bereichen der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften bekannt [5] [191] [202]. Ferner dient das Verfahren zur Unterstützung bei komplexen Situationen, die vor allem durch subjektive Aspekte geprägt sind. Das Prinzip des AHP-Verfahrens wird vor allem an dessen drei Hauptbestandteilen deutlich: Analyse der Entscheidungssituation, Aufbau einer hierarchischen Struktur und Ablauf der Entscheidung als Prozess [112, S.159].

Die analytische Vorgehensweise bedeutet, dass das Verfahren mit Hilfe von mathematisch-logischen Funktionen arbeitet, die nachvollziehbar gegenüber Entscheidern dargestellt werden können. Der Aufbau einer hierarchischen Struktur führt zu einer Aufteilung in Ebenen, deren Elemente den jeweiligen Kriterien oder Alternativen entsprechen. Der prozessartige Charakter ermöglicht es schließlich, das Verfahren mehrmals ablaufen zu lassen, Entscheidungen zu reproduzieren und den Weg der Entscheidungsfindung nachvollziehbar und für den Entscheider somit vorteilhafter zu gestalten [82]. Der AHP ist eine Methode, ein Ranking für Alternativen zu schaffen, um mit Hilfe einer Vielzahl von Kriterien die beste Alternative zu wählen [173]. Dabei hilft dieser den Entscheidern dahingehend, die kritischen Aspekte eines Problems zu strukturieren, indem eine Hierarchie in Form einer Baumstruktur geschaffen wird, so dass der Überblick über das Entscheidungsproblem stets gewährleistet wird [11].

5.2 Die Axiome der AHP-Methodik

Für die Anwendung des AHP müssen bestimmte Axiome erfüllt sein. Saaty formulierte insgesamt vier Axiome [141]. Harker und Vargas haben diese Axiome in Untersuchungen weiter beschrieben, die im Folgenden zusammengefasst werden [76]:

Axiom1: Liegen zwei Elemente, i und j aus der endlichen Menge A , vor, so ist es dem Entscheider anhand einer rationalen, reziproken Skala möglich, einen Wert a_{ij} anzugeben. Mit Hilfe dieses Wertes können diese beiden Elemente in einem Paarvergleich miteinander verglichen werden, so dass gilt:

$$a_{ij} = 1/a_{ji} \text{ für alle } i, j \in A \quad (\text{Gl. 5-1})$$

Gemäß den eben genannten Ausführungen (Nutzung einer reziproken Skala) beläuft sich die Anzahl der erforderlichen Paarvergleiche nur auf $\frac{1}{2} \cdot n \cdot (n-1)$ Vergleiche bei n Alternativen.

Axiom 2: Bei zwei vorliegenden Elementen wird ein Element niemals unendlich besser als ein anderes Element bewertet. Die Nutzung einer endlichen Skala ist demnach vorgeschrieben, so dass gilt:

$$a_{ij} \neq \infty \text{ für alle } i, j \in A \quad (\text{Gl. 5-2})$$

Axiom 3: Der Entscheider muss in der Lage sein, das vorliegende Entscheidungsproblem in eine hierarchische Struktur zu überführen (Aufteilung in einem Oberziel, Unterzielen, Kriterien, Sub-Kriterien und Alternativen als unterste Ebene) [12, S.15-20].

Axiom 4: In der Hierarchie müssen alle Kriterien und Alternativen enthalten sein, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten.

5.3 Ablauf des Analytischen Hierarchieprozesses

Während der Entscheidungsfindung ist die Nutzung des AHP als ein Prozess zu verstehen, der einem Ablauf in drei Phasen folgt. Diese sind die Phasen Planung, Bewertung und Ergebnis gliedern. Das Flussdiagramm ist in Abbildung 15 wiedergegeben.

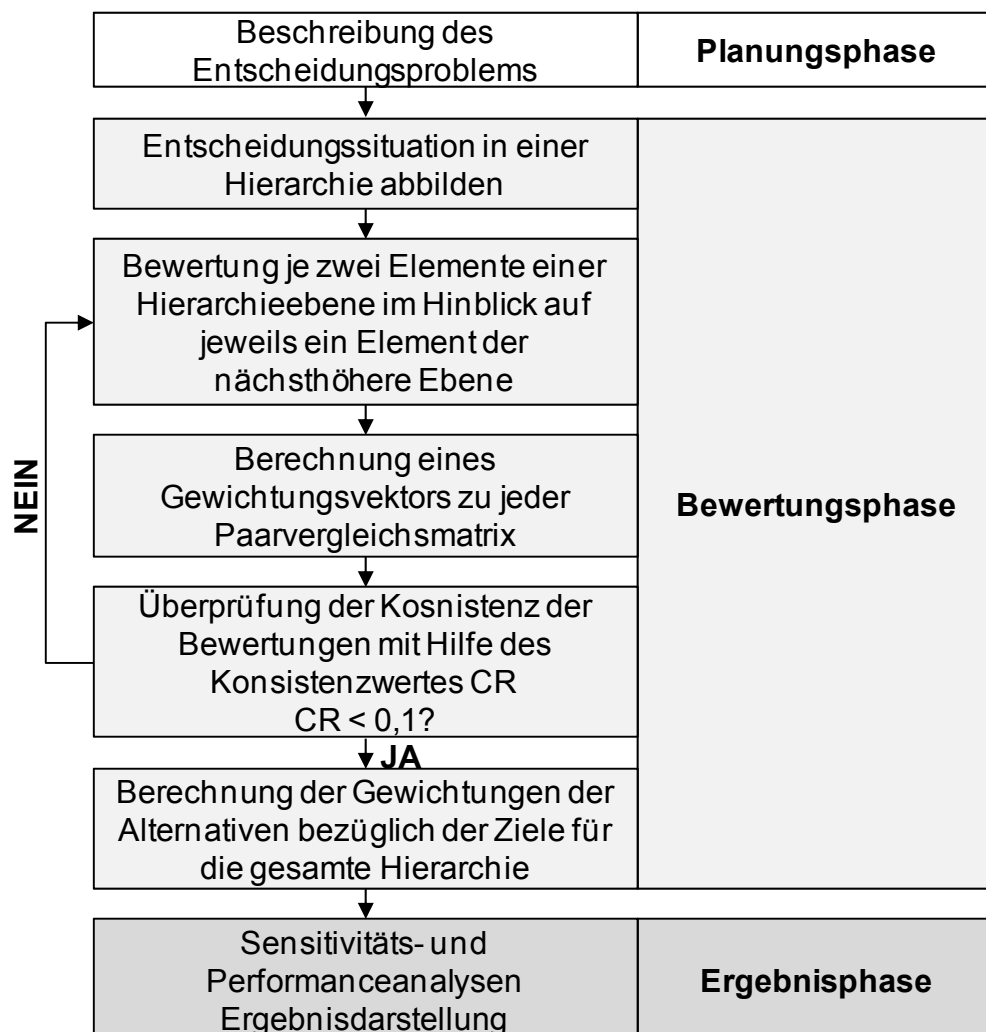


Abbildung 15: Phasen im Zuge des AHP, nach [218, S.70]

5.3.1 Planungsphase

Die erste Phase einer Entscheidungsanalyse beinhaltet zunächst die Umschreibung der Aufgabe des zu entscheidenden Sachverhaltes. Im Zuge dieses Schrittes werden nicht nur finanzielle Regelungen getroffen, sondern auch ein erster Ablauf der unmittelbar bevorstehenden Entscheidungssituationen diskutiert [204, S.73ff]. Die Entscheider gestalten zunächst aus den vorgegebenen Zielen eine Zielhierarchie. Grundsätzlich ist zu Beginn zu klären, welches Ziel die Projektbeteiligten verfolgen. Ziele wie die Ermittlung der Alternative mit dem größten Nutzen (Nutzenhierarchie), den geringsten Kosten (Kostenhierarchie) oder mit dem geringsten Risiko (Risikohierarchie) sind durchaus möglich. In diesem Zusammenhang ist ferner die Unsicherheit des Entscheidungsproblems zu bestimmen und abzubilden [126, S.4].

5.3.2 Bewertungsphase

Das Entscheidungsproblem wird in dieser Phase konkreter formuliert. Dabei werden zur Beschreibung der Zielhierarchie Kriterien (Attribute) herangezogen, wobei diese wiederum auf einer Stufe mit denen der nächst niedrigeren Stufe in Beziehung stehen (Bezug zu den einzelnen Ebenen). Die Attribute werden schließlich gewichtet und die Alternativen evaluiert.

5.3.2.1 Bestimmung der Attribute und Alternativen

Während der Planungsphase werden einzelne, entscheidungsrelevante Alternativen ausgewählt, die für die Entscheidungsproblematik als wichtig deklariert werden. Nicht relevante Alternativen werden ausgeschlossen. Das Ausschlussverfahren kann bspw. durch die Festlegung von Ausschlusskriterien erfolgen. Kriterien müssen dabei klar erfassbar sein und vor allem relevante Merkmalsausprägungen aufweisen. Die darauf folgenden Bewertungen sollten dann mit den jeweiligen Experten stattfinden, die auch für die Evaluation der Kriterien herangezogen werden. Hierzu ist es erforderlich, das fachübergreifende Wissen der Experten wie bspw. Boden-, Umwelt- und Verkehrsgutachter, in die Bewertungsphase mit einzubinden, um die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Entscheidung zu erhöhen [204, S. 76ff].

5.3.2.2 Kriterien- und Alternativenbewertung

Die Kriterienbewertung beinhaltet die entscheidenden Kernpunkte des AHP-Ansatzes, in denen die Kriterien eingestuft und gewichtet werden.

Einstufung der Kriterien

Als Top-down und Bottom-up werden zwei entgegengesetzte Arbeitsrichtungen bezeichnet, die in verschiedenen Sinnzusammenhängen für Analyserichtungen verwendet wer-

den, so dass die Einstufung der Kriterien nach einer dieser Methoden erfolgen sollte. Nach [12, S.15ff] sollte eine Strukturierung der Hierarchie beginnend beim Ziel ‚nach unten‘ erfolgen (Top-down).

Vergleich der Kriterien

Anhand einer 9-Punkte-Werteskala (Tabelle 5) werden im folgenden Schritt die Kriterien gewichtet. Die Kriterien werden untereinander paarweise im Hinblick auf alle relevanten Elemente der nächst höheren Stufe verglichen [125, S.94]. Für eine aussagekräftige Bewertung müssen die verschiedenen Informationen gegeneinander gewichtet werden, um die Bedeutsamkeit für die Entscheidung zu verdeutlichen. Die von Saaty verwendete Skala beinhaltet ein weiteres wichtiges Element des AHP-Verfahrens, nämlich die Verwendung von reziproken Skalenwerten, die von ihm zwingend vorschrieben werden. D.h., wenn ein Element eine etwas größere Bedeutung hat als ein anderes Element (Wert 3), bedeutet dies im Umkehrschluss, dass dem anderen Element der Wert 1/3 zugeordnet wird. Bei einem umgekehrten Verhältnis werden demzufolge die Kehrwerte der in Tabelle 6 aufgezeigten Skalenwerte verwendet.

	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element
3	Etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	Erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	Sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
9	Stark dominierend	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	

Tabelle 5: 9-Punkte-Bewertungsskala, nach [142, S.73]

	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element
1/3	Etwas geringere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas geringere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
1/5	Erheblich geringere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich geringere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
1/7	Sehr viel geringere Bedeutung	Die sehr viel geringere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
1/9	Stark unterlegen	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Zwischenwerte	

Tabelle 6: Reziproke 9-Punkte-Bewertungsskala, nach [142, S.73]

Ein vorteilhaftes Charakteristikum des AHP ist es, neben qualitativen auch quantitative Informationen in den Entscheidungsprozess mit einzubeziehen. Bei der Verarbeitung quantitativer Daten ist es nicht nötig, diese Daten mit Hilfe der 9-Punkte-Skala zu bewerten. Die Gewichte können direkt berechnet werden. Beispiele für solche quantitative Daten sind Kosten, Emissionen oder auch Immissionen.

Werden im Zuge einer Untersuchung maximale Werte gesucht, lässt sich eine Verhältniszahl zwischen den einzelnen Werten und der Summe der Werte bilden. Ein Beispiel hierfür ist die Einsparung an CO₂-Emissionen. Je höher ein Wert ist, desto höher ist auch sein Nutzen. Werden jedoch bspw. die minimalen Werte einer Bewertung gesucht, muss das Verhältnis mit den reziproken Werten berechnet werden. Je höher ein Wert ist, desto niedriger ist sein Nutzen (siehe Formeln 5 und 6):

$$w_i = \frac{a_i}{a_1 + a_2 + \dots + a_n} \quad (\text{Gl. 5-3})$$

$$w_i = \frac{\frac{1}{a_i}}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \dots + \frac{1}{a_n}} \quad (\text{Gl. 5-4})$$

Berechnung der Kriteriengewichte

Mit Hilfe des Eigenwertverfahrens lässt sich nunmehr eine Rangfolge der Kriterien (bzw. später der Alternativen) berechnen. Dabei werden die Vergleichswerte der vorangegangenen Matrizen in Eigenwerte umgewandelt. Diese Eigenwerte werden anschließend in

einen normierten Eigenvektor überführt, der die relative Wichtigkeit der verschiedenen Attribute abbildet und somit eine Gewichtung der Kriterien darstellt.

Die vereinfachte Berechnung des Eigenvektors läuft nach diesem Standardverfahren ab [143]. Alle Vergleichswerte werden dabei spaltenweise addiert und normiert. Die aufbereiteten Vergleichswerte werden zeilenweise addiert und erneut normiert. Die ausgewiesenen Spaltenwerte geben dann den Eigenvektor an. Die Vorgehensweise ist in der folgenden Tabelle 7 angegeben.

Attribute	A_1	A_2	A_n	Normierte Evaluationsmatrix			Zeilen-summe $\sum r_i$	Normierter Eigenvektor w_i
				A_1	A_2	A_n		
A_1	$A_{11} = 1$	A_{12}	A_{1n}	$\frac{A_{11}}{C_1}$	$\frac{A_{12}}{C_2}$	$\frac{A_{1n}}{C_n}$	r_1	$w_1 = \frac{r_1}{n}$
A_2	$A_{21} = \frac{1}{A_{12}}$	$A_{22} = 1$	A_{2n}	$\frac{A_{21}}{C_1}$	$\frac{A_{22}}{C_2}$	$\frac{A_{2n}}{C_n}$	r_2	$w_2 = \frac{r_2}{n}$
A_n	$A_{n1} = \frac{1}{A_{1n}}$	$A_{n2} = \frac{1}{A_{2n}}$	$A_{nn} = 1$	$\frac{A_{n1}}{C_1}$	$\frac{A_{n2}}{C_2}$	$\frac{A_{nn}}{C_n}$	r_n	$w_n = \frac{r_n}{n}$
Spalten-summe $\sum C_i$:	$C_1 = \sum_{i=1}^n A_{i1}$	$C_2 = \sum_{i=1}^n A_{i2}$	$C_n = \sum_{i=1}^n A_{in}$	1	1	1	n	1

Tabelle 7: Schema zur Berechnung der AHP-Gewichtung, nach [125, S.133]

Die Handhabung dieser Methode ist einfach. Der Ablauf der Prioritätenberechnung läuft dabei stets gleichbleibend ab. Das exakte Verfahren hingegen, welches deutlich aufwändiger ist, lehnt sich mehr an das menschliche Urteilsvermögen an [112]. Die Berechnung der genauen Werte ist eine iterative Prozedur, die sogenannte präzisere Prioritätenwichtung. Die Berechnungsregeln sehen wie folgt aus:

- Die Matrix ist sukzessive zu quadrieren.
- Die Reihensumme wird berechnet und normalisiert.
- Das Ergebnis ist die erste Näherung des Prioritätenvektors.
- Die Berechnung endet nur, wenn der Unterschied zwischen zwei Rechenschritten minimal ausfällt bzw. bis ein gewisser Grenzwert erreicht wird.

Konsistenzprüfung

In den folgenden Abschnitten wird nach den Arbeiten von Saaty die Vorgehensweise der Konsistenzprüfung beschrieben [141] [142] [143]. Eine Evaluationsmatrix ist konsistent, wenn $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ für beliebige i, j und k gilt. Paarvergleiche erfolgen zumeist rein subjektiv. Bei komplexen Entscheidungsaufgaben mit einer Vielzahl untereinander abhängiger Kriterien kann es durchaus vorkommen, dass solche Paarvergleiche inkonsistent sind. Bis zu einem geringen Grad sind Inkonsistenzen jedoch erlaubt und gefährden die gesamte Entscheidung nicht. Bei hoher Inkonsistenz muss der Entscheidungsprozess und somit die Bewertung erneut durchgeführt werden. Zur Überprüfung der Konsistenz wird der von Saaty eingeführte Konsistenzindex CI (consistency index) und die Konsistenzratio CR (consistency ratio) berechnet. Dafür muss zunächst der Eigenwert der Bewertungsmatrix ermittelt werden, denn die Berechnung der Gewichte beim AHP beruht auf der Theorie des größten Eigenwertes einer Matrix. Wird die lineare Abbildung f durch eine Matrix A dargestellt, so hat die Eigenwertgleichung die Form

$$A \cdot x = \lambda \cdot x \text{ oder } (A - \lambda \cdot I)x = 0, \quad (\text{Gl. 5-5})$$

wobei I die Einheitsmatrix ist. Zur Ermittlung des CI wird ein Vergleich des maximalen Eigenwertes λ_{\max} und des Eigenwertes λ der Paarvergleichsmatrix durchgeführt. Je größer die Differenz zwischen λ_{\max} und λ ist, desto inkonsistenter ist die Matrix. Die Differenz ist allerdings von der Größe der Matrix abhängig, so dass für eine Normierung die Ermittlung des CR durchzuführen ist. Hierbei wird die ermittelte Differenz, also der Konsistenzindex CI, ins Verhältnis zum Zufallskonsistenzindex RI (random index) gesetzt und somit die CR ermittelt (siehe Tabelle 8). Der RI wurde durch Zufallspaarvergleiche für verschiedene $n \times n$ Matrizen bestimmt. Für eine hohe Anzahl an Zufallspaarvergleichsmatrizen ermittelte Saaty die Eigenwerte. Dadurch stellte Saaty fest, dass die Konsistenz eben von der Größe einer Matrix abhängig ist. Zur Beurteilung einer Konsistenz muss also der CI-Wert mit dem Durchschnittswert RI verglichen werden. Der RI-Wert ist also der Mittelwert der zufällig ermittelten CI-Werte der jeweiligen $n \times n$ -Matrizen [76] [141] [142] [143].

Für die Größe von CR gilt nach Saaty 0,1 als Richtwert. Wird dieser Wert überschritten, gilt der Entscheidungsprozess als inkonsistent und wird Auswirkungen auf die Interpretierbarkeit und Logik der Ergebnisse haben. Der Entscheider sollte demnach den Bewertungsprozess überdenken und erneut durchführen. Die Berechnung des CI und der CR wird mit den Formeln 4 und 5 berechnet.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (\text{Gl. 5-6})$$

$$CR = CI / RI \quad (\text{Gl. 5-7})$$

Anzahl der Kriterien	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI-Wert	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tabelle 8: RI-Werte, nach [141] [142] [143]

Bewertung der Alternativen

Die Gewichtung der Kriterien erfolgt grundsätzlich auf allen Hierarchiestufen. Aus diesem Grund steigt die Anzahl der durchzuführenden Vergleiche stark an, wenn der Entscheider zu Beginn mehrere Ebenen und eine große Anzahl an Kriterien festgelegt hat. Anschließend wird durch die multiplikative Attributsgewichtung eine Verbindung der Gewichtungen über die Hierarchiestufen hinweg erzeugt. Aus diesen Berechnungen werden die globalen Gewichte bestimmt. Dazu wird jede untergeordnete Kriterienebene mit dem Gewicht der übergeordneten Kriterienebene multipliziert [204, S.97]. Die Formel zur Berechnung des globalen Gewichtes eines Elements i ($w_{\text{rel}(i)}$) für die n -te Hierarchiestufe lautet:

$$w_{\text{rel}(i)} = w_n \cdot w_{n-1} \quad (\text{Gl. 5-8})$$

Anschließend werden die lokalen Alternativengewichte je Merkmal mit den globalen Gewichten der darüber liegenden Kriterien multipliziert, so dass man globale Alternativengewichte erhält. Mit einer anschließenden Summenbildung der globalen Alternativengewichte je Alternative ergibt sich der Präferenzindex (w), der die Wichtigkeit jeder Alternative darstellt [204, S.97ff]. Man erhält dann die Gewichtungen der Alternativen im Hinblick auf das Ziel in der obersten Ebene [218, S.80].

5.3.3 Ergebnisphase

Im Zuge der Ergebnisphase werden im Wesentlichen die Ergebnisse der Gesamtbewertung präsentiert. Dies hat den Vorteil, dass Ergebnisse mit Projektbeteiligten diskutiert werden können. Darüber hinaus können in Form von Sensitivitäts- und Performanceanalysen weitere Analysen hinsichtlich einzelner Kriterien und Alternativen erfolgen [204, S.208]. Sinnvoll ist dies vor allem bei Entscheidungen, wenn zwei Alternativen fast identische Gewichtungen vorweisen.

Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse geht man der Frage nach, wie stark sich die Rangfolge der Alternativen durch Veränderung einzelner Kriterien verändern kann. Ziel einer

Sensitivitätsanalyse ist es demnach, Auswirkungen einer Gewichtsänderung auf die Alternativenbewertung zu zeigen. Dieses Instrument stellt ein effektives Hilfsmittel dar, um die Stabilität eines Ergebnisses zu analysieren, vor allem dann, wenn zwei Alternativen sehr knapp beieinander liegen. Innerhalb der Analyse werden die Auswirkungen von Veränderungen von Gewichtungen einzelner Kriterien bei identischer Modellstruktur untersucht. Der Entscheider untersucht einzelne Kriterien, indem die Gewichtung sukzessive verändert wird. Es lassen sich dann Graphen in Abhängigkeit der Veränderung des Gesamtgewichtes darstellen. So wird schnell deutlich, ab welcher Gewichtung es unter Umständen zu einem Rangwechsel der Alternativen kommt. Sind für einen Rangwechsel der Alternativen sehr geringe Verschiebungen der Gewichte notwendig, so ist das Ergebnis instabil. In einem solchen Fall ist die Entscheidung erneut zu bewerten. Im Rahmen einer solchen Sensitivitätsanalyse lassen sich weitere Untersuchungen anstellen. Insbesondere kann die gezielte Untersuchung einzelner Kriterien hinsichtlich der Auswirkung auf Alternativen vorgenommen werden. Dabei werden bspw. Kriterien einer Ebene herausgelöst und der direkte Einfluss eines jeden Kriteriums auf die Alternativen dargestellt.

In einer Sensitivitätsanalyse will der Anwender bspw. ermitteln, wie sich die Alternativen verhalten, wenn ein Kriterium stärker oder auch schwächer bewertet wird. Dadurch kann der Anwender direkt erkennen, wie sich das Gesamtergebnis verändert. So wird grafisch gezeigt, wie groß der Einfluss eines jeden Kriteriums auf Alternativen sein kann. Abbildung 16 stellt ein Ergebnis einer solchen Sensitivitätsanalyse dar. Beispielhaft werden hier drei Funktionsverläufe von Alternativen gezeigt. Der Graph zeigt wie sich die Alternativen verhalten würden, wenn das hier zu untersuchende Kriterium stärker (Abszisse nach rechts) oder schwächer (Abszisse nach links) bewertet werden würde.

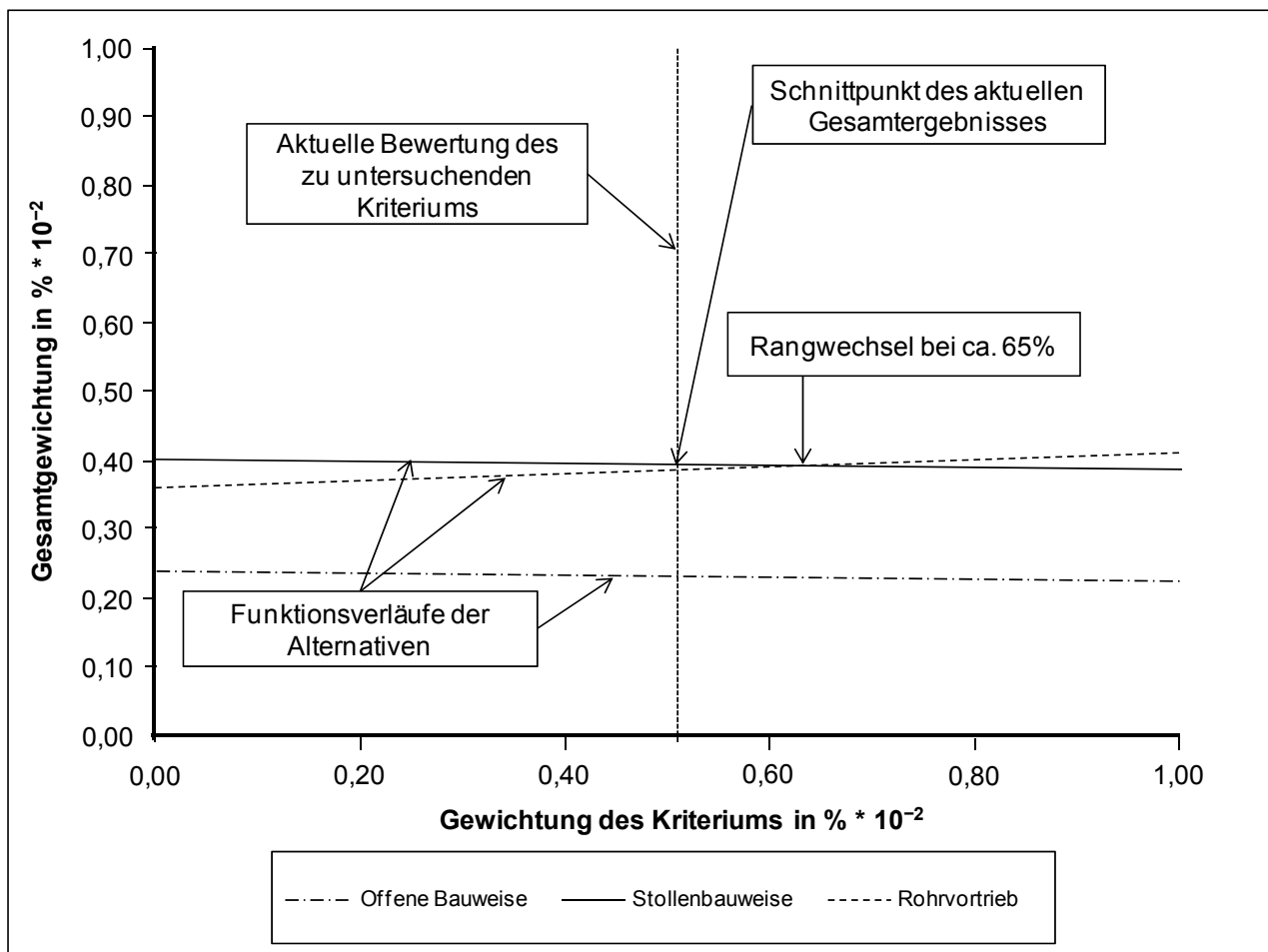


Abbildung 16: Beispielhafte Sensitivitätsanalyse

Zu erkennen ist, dass ein Rangwechsel der Alternativen zu erwarten ist, wenn die Gewichtung des Kriteriums bei Erhaltung der vorherigen Modellstruktur auf ca. 65% gesetzt wird. Die senkrechte Linie zeigt derweil, dass die vom Entscheider festgelegte Gewichtung für das zu untersuchende Kriterium bei 50% liegt. Ab einer Gewichtung von ca. 65% wäre also die zuvor auf dem 2.Rang liegende Alternative auf den 3.Rang gefallen. Unabhängig davon kann der Anwender hier erkennen, dass eine beliebige Veränderung des Kriteriums (von 0% bis 100%) keine Auswirkungen auf die dritte Alternative hat (punktgestrichelter Verlauf). Auf diese Weise können im Vorfeld einflussreiche Kriterien präzise aufgezeigt und die direkte Auswirkung dieser Kriterien auf die Alternativen veranschaulicht werden.

5.4 Einsatz des AHP im Bausektor

In der Vergangenheit wurden im Bausektor vereinzelt erste Untersuchungen mit Hilfe des AHP gemacht. Lai et al. haben bspw. eine AHP-simulierte Budgetplanung für Bauprojekte des Hochbaus in Taiwan entwickelt, wobei zunächst Kostenkriterien entwickelt wurden, die anschließend hinsichtlich der Hochbauproblematik in eine Hierarchie überführt wurden. Nach Priorisierung der Kriterien wurden Kostenfunktionen aufgestellt, die anschließend mit den Gewichtungen aus der AHP-Analyse kombiniert wurden. Auf diese

Art und Weise wurde eine Möglichkeit generiert, im Vorfeld Budgets für die Planung von öffentlichen Gebäuden festzulegen [102].

Im Forschungsprojekt ‚Ingenieurbauten – Wege zu einer ganzheitlichen Betrachtung‘ wurde der AHP zur Bestimmung von Planungsentwürfen für Brückenbauten genutzt. Dabei wurden nicht nur ganzheitliche Kriterien entwickelt, sondern auch verschiedene Planungsentwürfe ganzheitlich unter Berücksichtigung der klassischen AHP-Methode bewertet [65].

Dey hat in seinen Untersuchungen den AHP im Zuge des Managements von Projektrisiken eingesetzt. Dabei hat der Autor die wichtigsten Projektrisiken als Kriterien definiert und nach dem klassischen AHP gewichtet, wobei die Wichtungen im weiteren Verlaufe seiner Untersuchungen den Eintrittswahrscheinlichkeiten entsprechen. Im weiteren Verlauf kombiniert er die AHP-Gewichtungen mit Ergebnissen aus einer Entscheidungsbaumanalyse. Auf diesem Wege ist es ihm möglich, Risiken genau zu quantifizieren und hinsichtlich unterschiedlicher Alternativen anzuwenden [50].

Im Tunnelbau wurde durch Yazdani-Chamzini sowie Yakhchali der Frage nachgegangen, wie das Design einer Tunnelvortriebsmaschine gewählt werden muss, indem eine fuzzyfizierte Form des AHP mit der TOPSIS-Methode kombiniert wurde. Der AHP eignete sich hier zunächst für die Strukturierung des Entscheidungsproblems, wohingegen die TOPSIS-Methode für die Evaluierung des Alternativenrankings bestimmt war. Auf diesem Wege war es möglich, das beste Design für die Vortriebsmaschine zu wählen [208].

Bottero und Peila haben für einen innerstädtischen Kanalbau zwei Alternativen dahingehend untersucht, welche der beiden Alternativen unter Berücksichtigung von verschiedenen Kostenfaktoren am besten geeignet ist. Dabei lag der Fokus eindeutig auf die Ermittlung der Kostenkriterien, die nicht nur klassische Kosten wie Initialkosten berücksichtigten, sondern auch Kosten, die aus sozialen und umweltrelevanten Aspekten induziert waren [18].

Die Autoren Sanjiv und Makarand zeigen in ihrem Beitrag die Notwendigkeit eines Decision Support Systems für die Wahl eines Bauverfahrens im Leitungstunnelbau. Dabei wird der AHP für die Entwicklung von projektspezifischen Kriterien herangezogen, wobei im Gegensatz zu Bottero et al nicht nur kostenspezifische Kriterien berücksichtigt werden, sondern eine ganzheitliche Betrachtung in Erwägung gezogen wird. Das Ergebnis ist die Ermittlung eines adäquaten Bauverfahrens für die Rehabilitation von Kanalleitungen [148].

Die Autoren Chen und Liu nutzen den AHP für die Gewichtung der Gebirgsqualität, indem hinsichtlich Gebirgsmaterial, Grundwasser und gestörte Gebirgseigenschaften unterschieden wurde. Dabei wurde ein Fragebogen entwickelt, der im Rahmen von Gruppenentscheidungen eingesetzt wurde. Auf diese Art und Weise erhielten die Autoren eine Reihe an Bewertungen für die bereits festgelegte Hierarchie. Für diese Werte wurden

Mittelwerte gebildet, die die Wichtigkeit der einzelnen Kriterien festlegten. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wurde der AHP mit einer Fuzzy-Delphi-Methode kombiniert, um anschließend die Gebirgsqualität zu bestimmen [40].

Thewes et al. sowie Kamarianakis et al. haben in ihren Untersuchungen Entscheidungen bei der Wahl von Vortriebsverfahren von Leitungsbauprojekten nachträglich mit den AHP untersucht. Dabei wurde in erster Linie die Planungsphase herangezogen, die teilweise eine fehlende Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse offenbarte. In weiteren Untersuchungen wurde ein Entscheidungs-Tool auf Basis des AHP programmiert, welches Entscheidern helfen soll, den Planungsprozess hinsichtlich der Wahl eines Bauverfahrens effektiver zu gestalten [87] [174] [175] [176] [177] [180] [181] [182] [183] [184] [185] [186] [187].

Aber auch im Rahmen des Projektmanagements für Bauprojekte konnte der AHP bereits erfolgreich eingesetzt werden. Al-Harbi hat in seiner Untersuchung potentielle Auftragnehmer hinsichtlich ihrer Qualifikation untersucht. Er stellte sich die Frage, welcher der Auftragnehmer die besten Voraussetzungen für die Abwicklung eines Bauprojektes liefert. Dabei entwickelte der Autor hier verschiedene Kriterien wie Erfahrung, Finanzlage, verfügbare Arbeiterkolonnen etc. und hat diese hinsichtlich der einzelnen Auftragnehmer ausschließlich unter Nutzung der AHP-Skala bewertet [2].

Insgesamt zeigt die Recherche, dass der AHP vereinzelt im Bausektor erfolgreich eingesetzt wurde, wobei oftmals spezielle Fragestellungen wie z.B. die Bestimmung des Designs einer Tunnelvortriebsmaschine behandelt wurden. Insgesamt fällt auf, dass bis auf wenige Ausnahmen ausschließlich der klassische AHP-Ansatz gewählt bzw. in Verbindung mit weiteren Bewertungsmethoden kombiniert wird. Bezugnehmend auf die Analysen im Abschnitt ‚Entscheidungstheorie‘ kann der Einsatz des AHP durchaus erweitert werden, indem Aspekte wie Unsicherheit und Unschärfe mit in die Methodik integriert werden. Zumindest der Aspekt der Unschärfe wurde teilweise in einigen Untersuchungen berücksichtigt, wobei eindeutig der Fokus auf die qualitative Unschärfetrachtung gelegt wurde. Darüber hinaus hat die Recherche ergeben, dass eine Betrachtung des Planungsprozesses kaum gemacht wurde. Diese Arbeit soll genau diese Planungsphase behandeln, da in genau dieser Phase mehrere Projektgruppen über verschiedene Alternativen beraten. Dazu kommt, dass Aspekte wie quantitative Unschärfen sowie Unsicherheiten in Form von Risiken ebenfalls nicht in ihrer Gesamtheit berücksichtigt wurden. Gerade dieser Aspekt stellt somit einen neuen Ansatzpunkt für eine ganzheitliche Bewertung im Zuge des Planungsprozesses unterirdischer Infrastrukturen.

5.5 Kritische Würdigung des AHP

Der Analytic Hierarchy Process eignet sich bei schwierigen und komplexen Zielstrukturen, so dass diese Methode auch für eine Kommunikation von Zielen innerhalb einer Gruppe von Entscheidungsträgern geeignet ist [72] [143] [212]. Der AHP ist jedoch nicht

für eine Identifikation von Handlungsalternativen sowie Schätzungen von Eintrittswahrscheinlichkeiten, sondern nur für die Ermittlung einer Rangfolge geeignet. Vor allem aber auch ist die Interpretation der Ergebnisse schwierig, wenn Alternativen sehr eng beinander liegen. Folglich können die stärksten Alternativen herausgelöst werden, die einer erneuten Untersuchung unterzogen werden, mit dem Unterschied, dass die Datengrundlagen genauer betrachtet werden. Gerade im Bereich der Daten kann es dazu kommen, dass diese nur unvollständig vorliegen und der Entscheider subjektiv, unscharf und unsicher entscheiden muss.

Eine weitere Kritik ist das Problem der Rangumkehr (engl.: rank reversal). Damit ist gemeint, dass sich eine Rangfolge der Alternativen ($A > B$) bei Hinzufügen einer weiteren Alternative (C) trotz augenscheinlich gleicher Bewertungen ändern kann ($A < B < C$), ohne dass sich das Entscheidungsverhalten des Entscheiders geändert hat [199, S.113] [200]. Als Ursache kann die Berechnung der Summennormierung beim AHP angesehen werden. Diese führt zu einer Verschiebung zwischen der Differenz der Ausprägungen und den Alternativen, so dass die Anforderungen an ein rationales Entscheidungsverfahren nicht erfüllt werden können. Einige Autoren führten Veränderungen in die Methodik ein, indem sie z.B. bei Bewertungen eine Intervallskala einführten [61] [88] oder auch das Normierungsprinzip veränderten [158]. Saaty hingegen äußerte in seinen Ausführungen, dass mit neuen Alternativen auch neue Informationen in ein Entscheidungsproblem hineingebracht werden, so dass der gesamte Entscheidungsprozess neu überdacht und bewertet werden muss, so dass das Phänomen 'rank reversal' für die Methodik des AHP kein Problem mehr darstellt [144]. Aus diesem Grunde werden in dieser Arbeit hierbei Saatys Erklärungen verfolgt und angewendet.

Als schwierig erweisen sich desweiteren die vielen Berechnungen, die abschließend zu einem Endergebnis aggregiert werden. Diese Berechnungen können zwar mit viel Zeitaufwand von Hand erfolgen, jedoch ist eine Evaluierung mit Hilfe eines Software-Tools deutlich schneller und exakter durchzuführen, zumal mit einer Software Bewertungen und Analysen mehrmals bewerkstelligt werden können. Aus diesem Grund wurde für diese Arbeit ein Software-Tool entwickelt, welches noch weitere Berechnungsmöglichkeiten aufweist, das aber erst in den nächsten Kapiteln vorgestellt wird. Der Vorteil gegenüber einer kommerziellen Software (z.B. ExpertChoice) liegt in der den Bedürfnissen angepassten eigenen Entwicklung. Kommerzielle Tools verfügen derzeit beispielsweise nicht über Schnittstellen zu Risikoanalysetools wie @Risk (Palisade), welches in dieser Arbeit ebenfalls genutzt wird. Darüber hinaus sind fuzzyfizierte Untersuchungen ebenfalls nicht möglich, so dass für die weiteren Schritte eine neue Software programmiert werden muss, um sowohl die noch darzustellenden Ergebnisse als auch das Entscheidungsmodell vollständig zu integrieren.

Abschließend kann gesagt werden, dass der AHP dazu beitragen kann, schwierige und komplizierte Entscheidungen in Anlehnung an die Präferenzen der Entscheider durchzu-

führen. Da der gesamte Entscheidungsprozess für einen Entscheider stets sichtbar und nachvollziehbar ist, spricht auch die Transparenz für den AHP. Diese Transparenz macht den AHP gerade auf behördlicher Ebene attraktiv, da er eine Diskussionsgrundlage für alle Beteiligten sein kann. Nach Schneeweiß eignet sich der AHP genau dann, wenn dem Entscheider endlich viele Alternativen vorliegen, mindestens ein Rating abgegeben werden kann und eine Berücksichtigung weiterer Alternativen nicht möglich bzw. gewünscht ist [154, S. 175].

6 Berücksichtigung der Unschärfe bei Bewertungen

Thema dieses Kapitels ist die Darstellung der Unschärfeproblematik. In den vorangegangenen Kapiteln wurde festgestellt, dass Entscheidungen durchaus mit einer gewissen Unschärfe behaftet sind. Folglich werden im Rahmen dieses Abschnittes ausgewählte Grundlagen zur Unschärfe behandelt. Abschließend wird gezeigt, wie die Unschärfe in die AHP-Methodik integriert werden kann.

6.1 Grundlagen zur Unschärfebetrachtung

Der Entscheider ist bei einer Bewertung oft mit dem Problem konfrontiert, dass seine Ziele oder der Raum der Handlungsalternativen nicht in solcher Weise darstellbar sind, als dass sie sich mit mathematischen Modellen beschreiben ließen, welche auf klassische boolesche Logik beruhen. Dies hat zur Folge, dass die Entscheidungssituation subjektiv und vage bewertet wird. Ziele werden mit linguale Beschreibungen wie niedrige Kosten, bessere Technik, hohe Energieeinsparung dargestellt. Solche Attribute sind nicht eindeutig messbar, sondern stellen eine Unschärfe dar. Wie in Kapitel 3 erwähnt, handelt es sich hierbei nicht um ein stochastisches Phänomen, sondern vielmehr um die personenabhängige, linguale und nicht-datenbasierte Bewertung zu einer gewissen Beeinflussung des Ergebnisses.

Unschärfebetrachtungen sollen zunächst das Wissen über einen Sachverhalt bzw. über ein Entscheidungsproblem aufzeigen. In solchen Situationen stellt sich die Frage, ob der Kenntnisstand über einen bestimmten Umweltzustand oder vorliegende Alternativen vollständig ist.

Einzelne Umweltzustände können bei einer Analyse mit Worten (lautes oder leises Baugerät) oder mit Wahrscheinlichkeiten (90%ige Wahrscheinlichkeit, dass der Lärmpegel eingehalten wird) beschrieben werden. Es ist also vorweg zu klären, ob es sich hierbei um ein Wahrscheinlichkeitsmaß oder nur vages Wissen handelt. Denn genau diese Fragestellung führt zu dem Ergebnis, ob Unschärfen oder Unsicherheiten vorliegen.

Eine weitere Ebene stellt die Bewertung der Ergebnisse dar. Diese können bestimmte Unschärfen beinhalten, so dass ein Ergebnis nicht ohne weiteres für eine weitere Diskussion herangezogen werden kann. Sind die Ergebnisse eindeutig, spricht nichts dagegen, das Ergebnis auch zu akzeptieren. Sind dennoch Unschärfen vorhanden, sollte das Ergebnis überdacht und im Zuge von Fuzzy-Berechnungen in der Entscheidungstheorie erneut evaluiert werden [127, S.100-104].

Im Folgenden sollen Ansätze gezeigt werden, mit der solche Unschärfen innerhalb des Entscheidungsprozesses berücksichtigt und abgebildet werden können. Ziel ist, ein stabileres Ergebnis zu erhalten oder zumindest das Risiko einer falschen Entscheidung zu verringern.

6.2 Einführung in die Fuzzy-Theorie

Erstmalig wurde die Unschärfebetrachtung 1965 von Prof. Lotfi A. Zadeh als Erweiterung der klassischen Mengenlehre unter dem Begriff Fuzzy-Set-Theorie vorgestellt [210] [211]. Während die klassische Mengenlehre davon ausgeht, dass ein Objekt oder ein Element entweder vollständig oder überhaupt nicht zu einer Menge gehört, zieht die Fuzzy-Set-Theorie die Möglichkeit in Betracht, dass ein Objekt auch nur teilweise zu einer Menge gehören kann. Die klassische Mengenlehre ist eine bivalente Methodik, in der nur richtig oder falsch, ja oder nein, 0 oder 1 existiert.

Grundlage der Fuzzy-Set-Theorie sind unscharfe Mengen sowie Zugehörigkeitsfunktionen, mit denen sich regeln lässt, wie groß die Zugehörigkeit eines Objektes zu einer bestimmten Menge ist [137]. Die Notwendigkeit dieser Theorie sah Zadeh darin begründet, dass sich weder die Realität noch das menschliche Denken durch die klassische Mathematik in Gänze abbilden lassen. Dabei war sein Ziel, das menschliche Denken, welches von unscharfen Begriffen geprägt ist, in mathematische Beschreibungen zu überführen. Objekte, auf die man in der Realität stößt, weisen keine präzisen Zugehörigkeitskriterien zu bestimmten Mengen auf, da diese unscharf, vage oder ungenau sein können. Zadeh erklärte, dass gleitende Übergänge von Aussagen geschaffen werden müssen, um einen Sachverhalt exakter zu gestalten (siehe Abbildung 17).

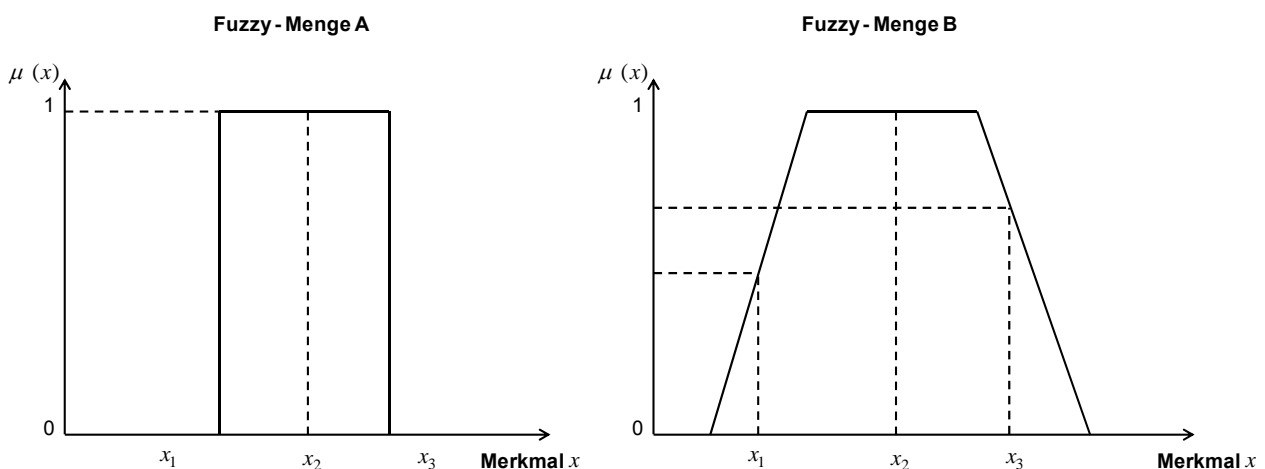


Abbildung 17: Beispielhafte Fuzzy-Mengen, nach [57]

Wie eingangs beschrieben, basiert der AHP auf einer Präferenzordnung und Gewichtung von Kriterien, um schließlich eine Rangfolge der Alternativen zu erhalten. Kritisch dabei ist, qualitative oder auch unscharfe Kriterien zu bewerten bzw. gegeneinander zu gewichten. Es wird eine Möglichkeit benötigt, die entweder die Bewertung innerhalb des AHP, also die scharfen Werte, die den Paarvergleichen direkt zugeordnet werden, mit einer bestimmten Toleranz zu versehen, oder aus vagen und genauen Informationen eine zuverlässige und nachvollziehbare Gewichtung zu ermitteln, so dass zur Implementierung eines Fuzzy Ansatzes zunächst die Grundlagen vorgestellt werden.

6.3 Unscharfe Mengen

In der klassischen Mathematik enthält eine Menge ein Element eindeutig und vollständig oder überhaupt nicht, wohingegen bei einer unscharfen Menge durchaus Zwischenstufen möglich sind. In der Fuzzy Theorie wird eine solche Variable als linguistische Variable bezeichnet, die einen umgangssprachlichen Begriff darstellt (z.B. alt, groß, laut, teuer).

Wie schon eingangs erwähnt, kann ein betrachtetes Element ganz oder nur zu einem gewissen Teil einer unscharfen Menge angehören, wobei der Zugehörigkeitsgrad als Maß dafür angesehen werden kann, inwieweit das Element die Eigenschaften der unscharfen Menge erfüllt [190, S.6].

In der Algebra wird eine (scharfe) Menge A auf einer Grundgesamtheit U so bestimmt, dass man festlegt, welche Elemente x der Grundgesamtheit zur Menge A gehören und welche nicht. Die Zugehörigkeit bzw. Nichtzugehörigkeit eines Elements $x \in U$ zur Menge A kann mit Hilfe einer charakteristischen Funktion (Zugehörigkeitsfunktion) μ_A beschrieben werden [190, S.10].

$$\mu_A(x) \in [0; 1] \quad (\text{Gl. 6-1})$$

Ein Element x , welches einen Zugehörigkeitsgrad von $\mu_A = 0,65$ aufweist, gehört demnach zu 65% zur unscharfen Menge A . Es ist dabei zu beachten, dass Zugehörigkeitsgrade keine Wahrscheinlichkeiten darstellen. Wahrscheinlichkeiten haben keinerlei Aussagekraft über den tatsächlichen Zustand, sondern zeigen, wie wahrscheinlich oder unwahrscheinlich das Eintreten eines Ereignisses ist [190, S.24]. Der Zugehörigkeitsgrad hingegen ist eine reale Eigenschaft eines Elementes, welche in jedem Fall vorhanden ist.

Zimmermann spricht im Kontext der Zugehörigkeitsfunktion (engl.: membership function; grade of membership) von einem degree of truth [219, S.12]. Der zu Grunde liegende Zusammenhang erschließt sich u.a. bei Bronstein und Semendjajew [20, S.414]: Der „Zugehörigkeitsgrad eines Elements wird als der graduelle Wahrheitswert einer Aussage“ betrachtet. Daraus folgt: Wenn ein Element x der Universalmenge X der unscharfen Menge U ganz oder graduell angehört, gilt dies ebenso für die Trefflichkeit (den „Wahrheitsgehalt“) einer entsprechenden Aussage. Gehört x_1 nur mit $\mu_A(x_1) = 0,65$ zu einer Menge A , so ist die Aussage ‚ x_1 gehört zu A ‘ nur ‚zu 65% wahr‘.

Der größte Unterschied zwischen einer scharfen und unscharfen Menge besteht darin, dass die scharfe Menge genau eine einzige Zugehörigkeitsfunktion $\mu_A(x)$ besitzt. Die unscharfe Menge hingegen kann durch eine unendliche Anzahl von Zugehörigkeitsfunktionen repräsentiert werden. Scharfe Mengen sind also durch charakteristische Funktionen gekennzeichnet, die nur zwei verschiedene Werte annehmen können, 1 oder 0, wahr oder falsch [219, S.11].

Eine Besonderheit in der Fuzzy-Mathematik stellen dabei die Mengen der Singletons dar [190, S.96]. Ein Singleton ist eine Fuzzy Menge A bezogen auf eine scharfe Zahl x_0 . Genauer bedeutet das, dass eine konkrete scharfe Zahl den Zugehörigkeitswert zwischen 0 und 1 annehmen kann. Die Singletons werden im weiteren Verlauf von Bedeutung sein, so dass diese hier zunächst vorgestellt werden. Die Zugehörigkeitsfunktion eines Singletons ist (Abbildung 18):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } x = x_0 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (\text{Gl. 6-2})$$

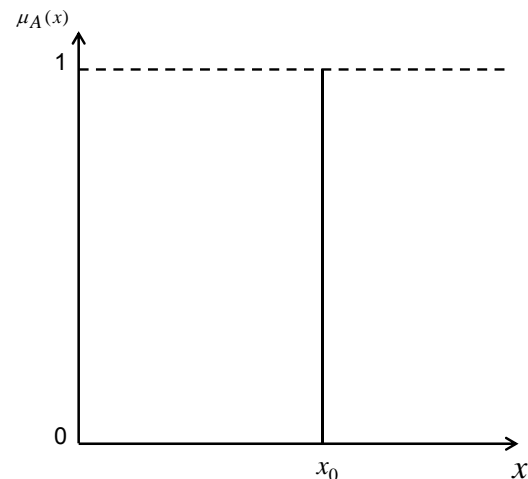


Abbildung 18: Darstellung einer Singleton-Funktion

In der menschlichen Sprache existieren Situationen, in denen viele Beschreibungen von Eigenschaften keinen konkreten Sinn ergeben. Als Beispiel seien hier die Menge der lauten Baugeräte oder umweltschonende Baustoffe aufgeführt. Diese Mengen sind insofern unscharf, da es für die einzelnen Elemente keine abgestuften Zugehörigkeitsgrade zwischen außerhalb und innerhalb der Menge gibt [190, S.4].

Für viele Anwendungen sind jedoch gleitende Übergänge zwischen außerhalb und innerhalb einer Menge oder zwischen Zutreffen und Nichtzutreffen eines Begriffs wünschenswert. Dies lässt sich über die Darstellung von Fuzzy Mengen und den Zugehörigkeitsfunktionen darstellen, welche durch die Zuordnung $x \in \mu_A(x)$ mit dem Wertebereich $\mu_A(x) \in [0;1]$ für jedes Objekt x eine ihm eigene Bewertung angibt, die Ähnlichkeiten von Objekten bzgl. nicht präzise definierten Eigenschaften repräsentiert [84]. Dabei ist $\mu_A(x)$ umso größer, je besser das Bewertungskriterium erfüllt ist. Der Wert von $\mu_A(x)$ ist also eine beliebige reelle Zahl zwischen 0 und 1 und gibt damit für jedes $x \in A$ den Grad der Richtigkeit, des Zutreffens usw. einer Aussage an. Je nach Präzision des Bewertungskriteriums ergibt sich so die Schärfe der Menge [84].

Für eine Fuzzy-Menge $\mu_A(x)$ und eine reelle Zahl $\alpha \in [0; 1]$ bezeichnet man die Menge $A = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$ als α -Niveau-Menge (α -level-set) oder α -Schnitt (α -cut oder auch Alpha-Cut) von A . Die Menge $A_\alpha = \{x \in X \mid \mu_A(x) > \alpha\}$ heißt strenge α -Niveau-Menge. Ein α -Schnitt enthält demnach alle Elemente der Grundmenge X , die einen Zugehörigkeitswert von mindestens α aufweisen [13, S.54ff] [16, S.16].

Fuzzy-Mengen können dabei verschiedene Verläufe annehmen, die ein Entscheider zu Beginn seiner Untersuchung festlegen muss. Dabei müssen die Verläufe bzw. die Zugehörigkeitsfunktionen der Realität entsprechen, so dass im Vorfeld in Projektgruppen die richtigen Verläufe ermittelt werden können. Die Form einer solchen Funktion, die über einer Basisvariablen definiert wird, kann unterschiedlich sein und muss stets an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Die gewählte Form einer Zugehörigkeitsfunktion spielt bei der Wahl der Fuzzy-Mengen und für die Bildung des Endergebnisses eine wesentliche Rolle. Häufig wird dabei eine Trapez- oder Dreiecksform gewählt. Diese Formen lassen sich über Standardfunktionen beschreiben, so dass diese in weiteren Rechnungen problemlos verwendet werden können [13, S. 58 und S. 61].

Abbildung 19 beschreibt ein fiktives Beispiel einer verallgemeinerten charakteristischen Funktion, die das vage Prädikat laut aus der Sicht eines Entscheiders im Kontext einzusetzender Baugeräte für alle Größenangaben aus \mathbb{R} darstellt. Die waagerechte Linie beschreibt dabei den α -cut der Menge (hier z.B.: $\mu_A(60 \text{ dB(A)}) = 0,72$).

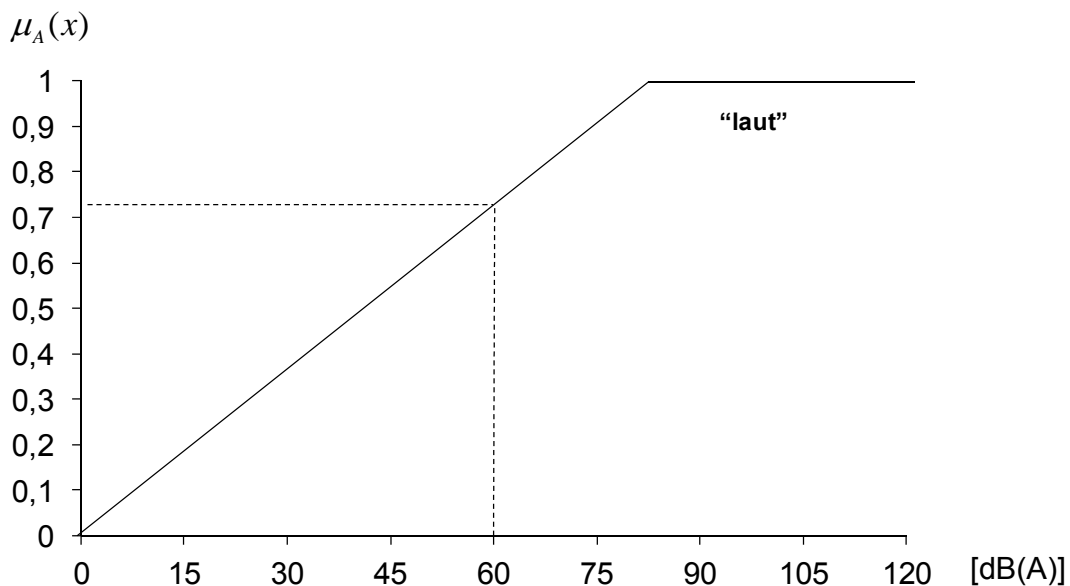


Abbildung 19: Charakteristische Fuzzy-Funktion für die Lautstärke in dB(A)

Die Wahl der Funktionsform basiert zunächst auf Plausibilitätsüberlegungen. Es ist davon auszugehen, dass in ein Fuzzy-System eine gewisse Subjektivität mit einfließt, welche das eigentliche abstrahierte Expertenwissen repräsentiert [73, S.11]. Grafische Darstellungen des funktionalen Verlaufes der Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_A(x)$ können wie folgt aussehen, wobei die Abszisse als Basisskala bezeichnet wird (Abbildung 20). Hierbei hat sich in der Literatur zumeist die Dreiecksfunktion durchgesetzt, da diese am einfachsten und schnellsten zur Lösung unscharfer Probleme geeignet ist [190, S.49].

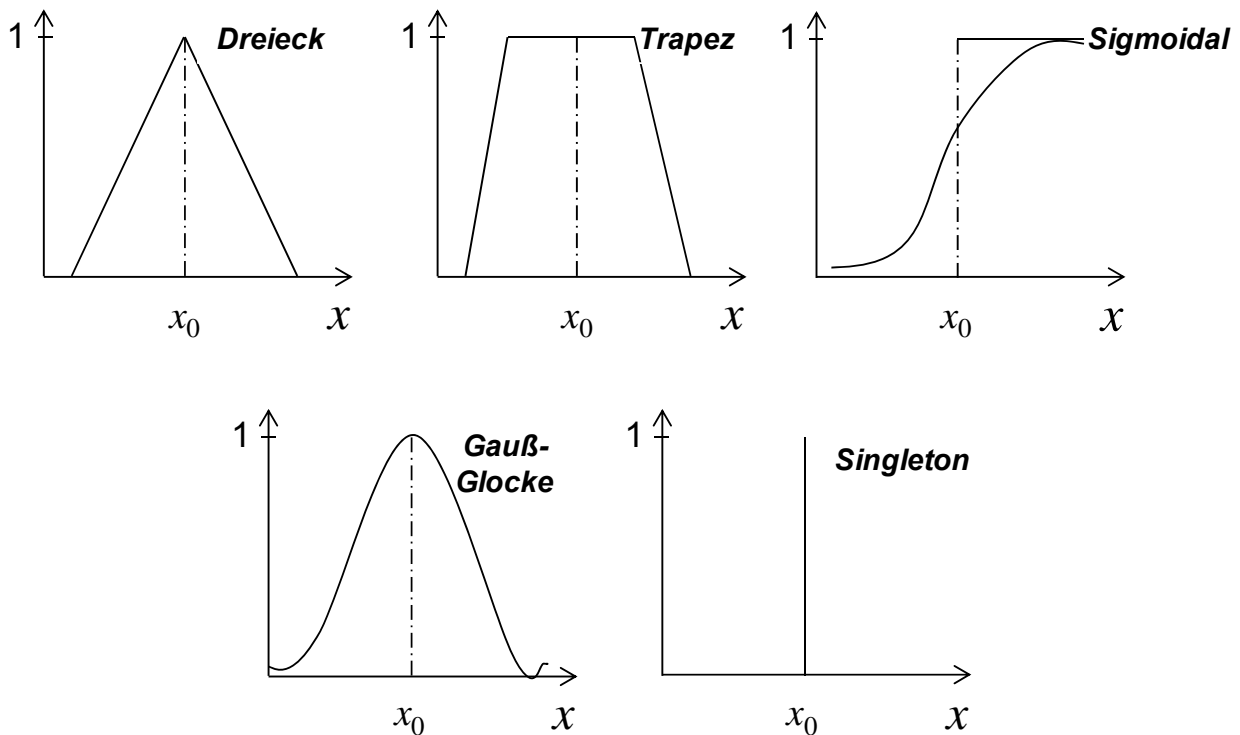


Abbildung 20: Mögliche Fuzzy-Funktionsverläufe, nach [188, S.53f]

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, gibt es große Unterschiede zwischen unsicheren und unscharfen Informationen. Bei Betrachtung der obigen Funktionsverläufe kann durchaus davon ausgegangen werden, dass es sich um ein Gebiet der Statistik handelt. Der Unterschied zur Dichte- und Verteilungsfunktionen der Wahrscheinlichkeitstheorie liegt genau in der Bildung der Zugehörigkeitsfunktionen. Eine Zugehörigkeitsfunktion $\mu_A(x)$ gibt die Zugehörigkeit des Elementes x zur unscharfen Menge A an. Wäre es eine Dichtefunktion, stände $\mu_A(x)dx$ für die Wahrscheinlichkeit. Die Wahrscheinlichkeitstheorie macht Aussagen darüber, ob ein Ereignis stattfinden wird, jedoch keinerlei Aussagen darüber, inwieweit das Element x mit der Menge A zu tun hat [84].

6.4 Unscharfe Zahlen

Der Unterschied zwischen unscharfen Zahlen und unscharfen Mengen liegt in erster Linie in der Betrachtungsweise der einzelnen Elemente. Bei unscharfen Mengen sind die einzelnen Elemente grundsätzlich scharf und werden erst im Nachgang zu einer unscharfen Menge modelliert (z.B. laute Baugeräte). Werden hingegen die einzelnen Elemente unscharf betrachtet, spricht man von unscharfen Zahlen [190, S.49]. Eine unscharfe Zahl ist also ein spezieller Fall einer unscharfen Menge. Bspw. treten unscharfe Zahlen dann auf, wenn es um Toleranzen bei Messwerten geht. Messwerte sind zumeist mit Toleranzen behaftet, so dass diese keine absolute Größen darstellen. Im Prinzip stellt eine unscharfe

Zahl eine kleine unscharfe Menge dar, in dessen Mitte die Zahl selbst liegt und dessen Breite durch die Toleranzen bestimmt wird.

Die LR-Darstellung ist eine klassische Darstellungsform für unscharfe Mengen, wobei das L für die linke und das R für die rechte lineare Referenzfunktion steht. Diese populäre Form der allgemeinen Darstellung ist auch bei unscharfen Zahlen zu finden. Die trianguläre Fuzzy Menge M_A wird durch die Abszissenwerte l , m und r bestimmt. Unscharfe Zahlen mit linearer LR-Darstellung werden also auch dreieckförmige unscharfe Zahlen genannt [4, S.67]. Der zugehörige Graph findet sich in Abbildung 21 wieder:

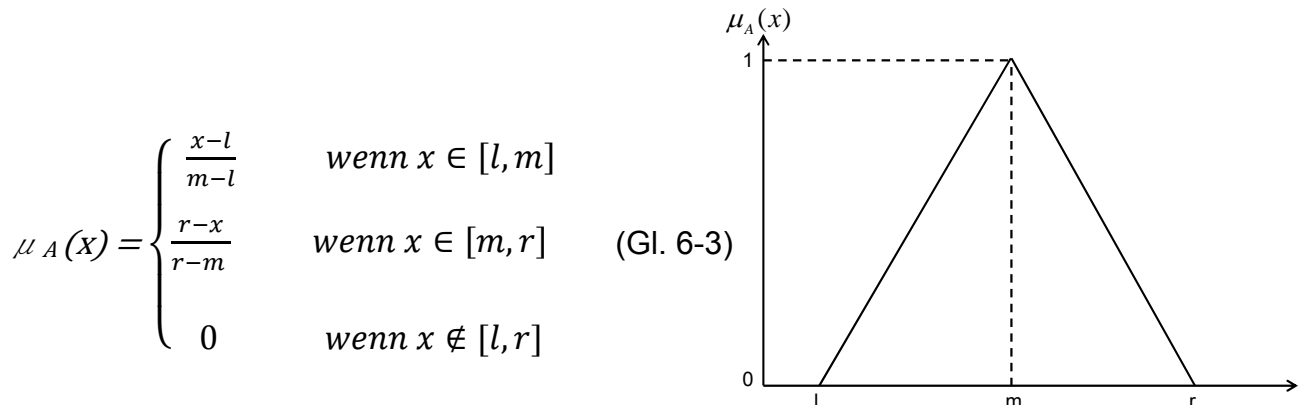
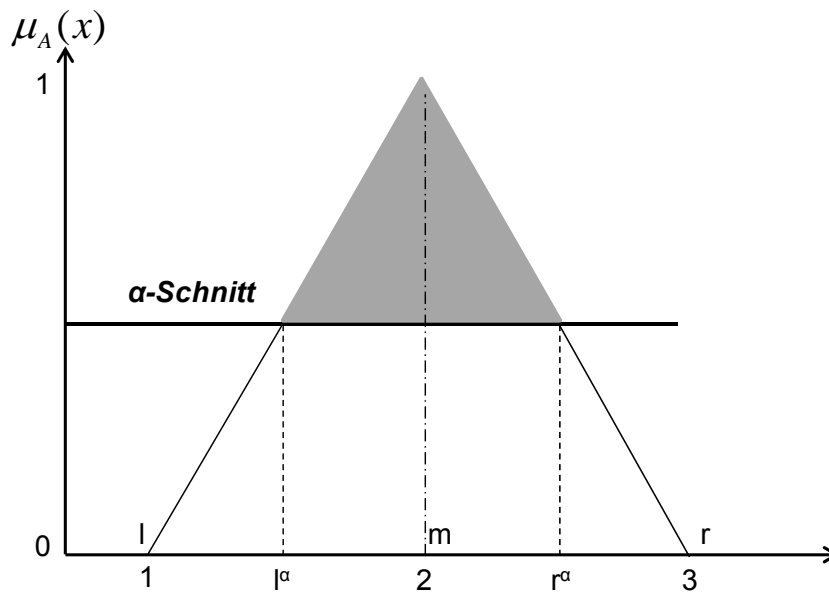


Abbildung 21: Beispiel einer triangulären Fuzzy Menge

Analog zu den unscharfen Mengen sind auch bei unscharfen Zahlen die α -Schnitte von großer Bedeutung. Durch den α -Schnitt (Abbildung 22) einer unscharfen Zahl M_A lässt sich eine Teilmenge M_A^α erstellen, für deren Elemente x , $\mu_{M^\alpha}(x) \geq \alpha$ gilt. Die dadurch entstandene α -Schnitt-Teilmenge lässt sich desweiteren durch das Intervall $[l_\alpha; m_\alpha]$ mathematisch darstellen. Lootsma definiert eine unscharfe Zahl M_A^α als unscharfe Menge im Gegenstandsbereich X , deren α -Schnitt-Teilmenge monoton schrumpfend ist, wenn α gegen eins geht und bei der es zumindest ein $x \in X$ gibt, für das $\mu_{M^\alpha}(x) = 1$ gilt [106, S.26]. Somit entspricht diese Zahl einem scharfen Wert. Durch Variation des Wertes α kann somit eine untere Grenze der erwünschten Zugehörigkeitsgrade der Elemente des Intervalls $[l^\alpha; m^\alpha]$ bestimmt werden. In Abbildung 22 ist der α -Schnitt einer unscharfen Zahl dargestellt.

Abbildung 22: α -Schnitt einer unsharpen Zahl

6.5 Verknüpfung von Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Zahlen

Die unsharpen Mengenlehre enthält die klassische Mengenlehre, so dass Mengenoperationen und -verknüpfungen möglich sind. Im Folgenden sollen die wichtigsten Operationen samt Notation vorgestellt werden. Nach Kaufmann und Gupta werden folgende spezielle mathematische Operatoren definiert [90]:

Fuzzy-Addition:

$$A_1 + A_2 = (l_1 + l_2; m_1 + m_2; r_1 + r_2) \quad (\text{Gl. 6-4})$$

Fuzzy-Multiplikation:

$$A \cdot u = (l \cdot u; m \cdot u; r \cdot u) \quad (\text{Gl. 6-5})$$

$$A_1 \cdot A_2 = (l_1 \cdot l_2; m_1 \cdot m_2; r_1 \cdot r_2); \quad \forall l_i > 0; m_i > 0; r_i > 0; i = 1, 2 \quad (\text{Gl. 6-6})$$

mit \forall = der Allquantor steht verkürzend für Aussagen wie „zu jedem“, „für jedes“, „für alle“ etc.

Fuzzy-Reziprok:

$$A^{-1} = (l; m; r)^{-1} = \left(\frac{1}{r}; \frac{1}{m}; \frac{1}{l} \right) \quad (\text{Gl. 6-7})$$

6.6 Verknüpfung der Fuzzy-Methodik mit dem AHP

Die qualitative Bewertung beim AHP wird mit diskreten scharfen Werten und unter Berücksichtigung der 9-Punkte-Skala von Saaty durchgeführt. Es stellt sich die Frage, ob ein Entscheider auch tatsächlich in der Lage ist, jeweils nur einen scharfen Wert für einen Paarvergleich zu vergeben, gerade im Hinblick auf die Subjektivität des Entscheiders. Schwierig erweist sich die Entscheidung, wenn mehrere am Projekt beteiligte Gruppen ihre Bewertung abgeben und somit mehrere AHP-Werte vergeben werden.

Erweitert wird dieser Punkt durch die Berücksichtigung von Gruppenentscheidungen. Gruppen unterliegen oftmals unterschiedlichen Machtstrukturen, so dass spezielle Entscheidungen eine solche Gruppe beeinflussen können. Im Zuge von Bauprojekten sind einzelne Projektgruppen stärker oder auch schwächer vertreten, die jedoch alle einen gewissen Einfluss auf die Entscheidung haben könnten. Der Vollständigkeit halber wird kurz ein Verfahren erwähnt, welches genau diese Machtstrukturen mithilfe des AHP berücksichtigen kann. Barzilai und Lootsma entwickelten den auf einer multiplikativen Variante des AHP basierten Ansatz [7]. Der multiplikative AHP ist in drei Stufen gegliedert. Aufgrund der höheren Anzahl an Handlungsalternativen und Entscheidern müssen die Zielgewichte auf eine andere Art und Weise verarbeitet werden. Zunächst ist ein Teilnutzen zu bestimmen, so dass darauf aufbauend die Bestimmung der Zielgewichte erfolgen kann. Schließlich werden die einzelnen ermittelten Teilnutzen gegeneinander gewichtet. Der ermittelte Gesamtnutzen jedes einzelnen Gruppenmitgliedes wird mit den objektiv bestimm- baren Machtpositionen gewichtet. Folglich ergibt stellt die Handlungsalternative mit dem höchsten Nutzenwert die Alternative dar, die schließlich für die gesamte Gruppe gewählt wird.

Man erkennt also, dass es durchaus Methoden bzw. Ansätze gibt, die unterschiedlichen Meinungen bzw. Bewertungen zeitgleich zu berücksichtigen. Jedoch ist in dem obigen Verfahren die Unschärfe mit keinem Wort erwähnt, so dass die klassische Fuzzy-Logik nicht zum Einsatz kommt.

Eine Berücksichtigung der Fuzzy-Logik für Gruppenentscheidungen für den Bereich Tunnelbau wurde erstmalig bei Yazdani-Chamzini und Yakhchali durchgeführt [208]. Hier sollten die verschiedenen Bewertungen der unterschiedlichen Projektpartner mit Hilfe des Fuzzy-Ansatzes durchgeführt werden. Wieso jedoch der Fuzzy-Ansatz gewählt wurde, wird in den Ausführungen nicht ausführlich dargelegt. Ein möglicher Grund könnte sein, dass viele Entscheider an der Bewertung teilnehmen, so dass die vielen Antwortmöglichkeiten eine gewisse Unschärfe darstellen. Die klassische Entscheidungstheorie wird in den Ausführungen jedoch nicht berücksichtigt. Gerade diese Theorie geht auf die Probleme der Umweltzustände ein (‚Mangel an Informationen‘ bzw. ‚Begriffliche Unschärfe‘ und ‚Unbestimmtheit‘).

Dieser Exkurs in die Gruppenentscheidungen zeigt, dass im Zuge von Planungsmaßnahmen nicht nur die eigene Bewertung oder Entscheidung unscharfe Größen beinhalten

kann, sondern auch gesamte Gruppenmeinungen einer Unschärfe unterworfen sind. Für den weiteren Verlauf sollen jedoch die Gruppenentscheidungen nicht mehr verfolgt werden, so dass der Fokus in der Berücksichtigung von Unschärfen in der eigenen Entscheidungsfindung liegen soll.

Im Grunde genommen kann die Bewertung eines Vergleichs bei Vorliegen einer gewissen Unschärfe durch die Nutzung linguistischer Terme wie ‚besser‘ oder ‚viel besser‘ erleichtert werden. Mit diesem Bewertungszusatz kann die Komplexität in der Nutzung von Fuzzy-Zahlen reduziert werden. Zur Vervollständigung wird ein Verfahren gezeigt, wie die Bewertung der paarweisen Vergleiche mit Hilfe dieser linguistischen Begriffe erfolgt, welche die Fuzzy-Zahlen beschreiben sollen, so dass schließlich die Fuzzy-Zahlen in numerische Werte transformiert werden können. Auf diese Art und Weise können die Werte nicht nur besser bearbeitet werden, sondern die Unschärfe resultierend aus Informationsmangel mit Hilfe des Alpha-Cuts (α) ausgedrückt werden, welcher den Grad der Unschärfe bestimmt.

Die Definition solcher Variablen wird mit Hilfe von Dreiecksfunktionen erfolgen, welche in der gängigen Praxis weit verbreitet sind. Seit der Entwicklung des AHP durch Saaty wurden viele Fuzzy-AHP Methoden entwickelt, welche die AHP Methodik mit der Fuzzy-Theorie vereinen, um die Wahl einer Alternative mehr dem menschlichen Urteilsvermögen anzupassen, zumal es für einen Entscheider einfacher ist, eine Bewertung in Intervallen anzugeben als eine direkte scharfe Zahl zu vergeben.

Eine der ersten Arbeiten in diesem Bereich ist von Laarhoven und Pedrycz, welche sich mit dem Vergleich von Fuzzy-Dreiecksfunktionen beschäftigten [101]. Analog dazu erweiterte Buckley die Theorie um die Nutzung von trapezförmigen Funktionen [22] [23]. Stam et al. führten als erste die Nutzung weiterer Methoden wie die künstlich neuronalen Netze ein, um eine noch exaktere Annäherung der Ergebnisse an das menschliche Urteilsvermögen zu gewährleisten [166]. Chang hingegen führte die Berücksichtigung von dreiecksförmigen Funktionen für die Darstellung der AHP-Zahlen ein, so dass erstmals Paarvergleiche mit Hilfe einer Bandbreite durchgeführt worden sind [37].

Weck et al., Deng, Leung et al. und et al. führten die Ansätze teilweise weiter [48] [100] [105] [205]. Insgesamt kann jedoch gesagt werden, dass alle Autoren durch die Nutzung der Fuzzy-Theorie in Bezug auf qualitative Vergleiche im Zuge des AHP dahingehend eine Erkenntnis erlangten, dass eine Nutzung von Bandbreiten für eine Bewertung besser geeignet ist, als die Nutzung einzelner scharfer Werte, so dass die Bewertungen zu exakteren und eindeutigeren Ergebnissen geführt haben.

Bezogen auf diese Arbeit fällt die Wahl auf die Theorie von Cheng et al. [41] [42] und Cheng [43], welche sich auf die Nutzung von Dreiecksfunktionen von Fuzzy-Zahlen, die Berücksichtigung eines Alpha-Cuts α sowie einem Optimismus-Index λ stützt, welcher die Einstellung eines Entscheiders hinsichtlich der zu führenden Bewertung berücksichtigt.

Folgende Gründe sprechen für die Nutzung jener Theorie:

- Die Theorie ist mathematisch auf relativ einfachem Niveau gegründet.
- Die Berechnungen sind mit einfachen Mitteln durchführbar.
- Ergebnisse können in Abhängigkeit des Optimismus-Index und Alpha-Cuts dargestellt werden.
- Die Theorie stellt für einen Entscheider leicht zu verstehende Bandbreiten zur Verfügung.
- Die mathematischen Gleichungen können relativ einfach in ein Software-Tool überführt werden.

Basierend auf diesen Ansatz ist es nunmehr möglich, die AHP-Methode zumindest im qualitativen Bereich um den Fuzzy-Ansatz zu erweitern, indem die AHP-Werte als Dreiecksfunktionen $\mu_{\tilde{A}}(x)$ beschrieben werden. Die Funktion eines AHP-Wertes wird dargestellt durch den Alpha-Cut sowie den x-Koordinaten a_1 , a_2 und a_3 (Abbildung 23).

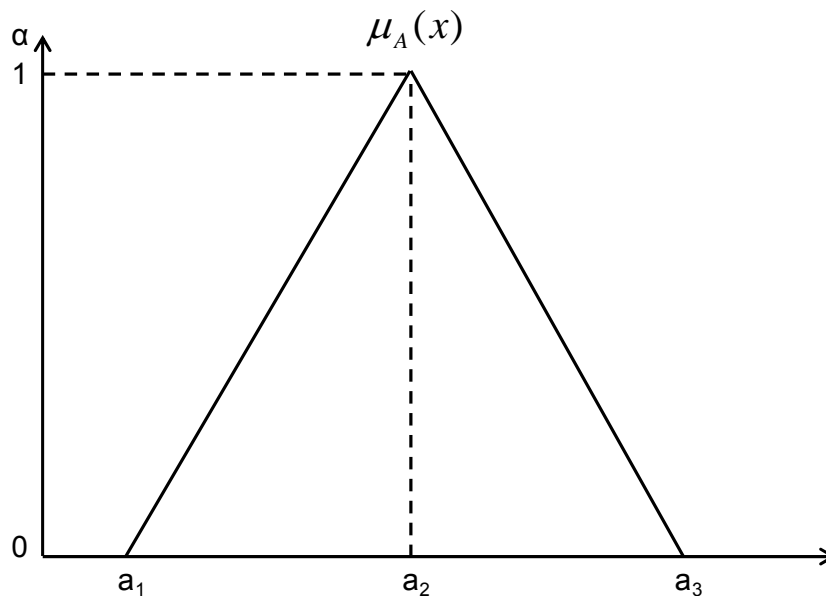


Abbildung 23: Dreiecksfunktion $\mu_{\tilde{A}}(x)$

Die korrespondierende Funktion der Fuzzy-Zahlen wird wie folgt definiert [41]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (\text{Gl. 6-8})$$

Alternativ dazu können die Intervalle unter Berücksichtigung des Alpha-Cuts wie folgt beschrieben werden:

$$\forall \alpha \in [0, 1], \tilde{A}_\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha] = [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, -(a_3 - a_2)\alpha + a_3] \quad (\text{Gl. 6-9})$$

In Anlehnung an die Axiome von Saaty [143] ist folgende reziproke Darstellung möglich.

$$\tilde{A}^{-1} = \left(\frac{1}{a_1 + (a_2 - a_1)\alpha}, \frac{1}{a_3 - (a_3 - a_2)\alpha} \right) \quad (\text{Gl. 6-10})$$

Mit Hilfe dieser Methodik lassen sich somit alle AHP-Werte definieren. Bezugnehmend auf alle Funktionen lässt sich sagen, dass jede der in Abbildung 24 gezeigten Funktionen durch drei x-Koordinaten sowie dem Alpha-Cut beschrieben werden, so dass stets ein bestimmtes Intervall für jeden Wert definiert ist (hier ± 2). Dazu wird hier zunächst auf die Zwischenwerte 2,4,6 und 8 verzichtet, um eine Vereinfachung für den Entscheider zu gewährleisten.

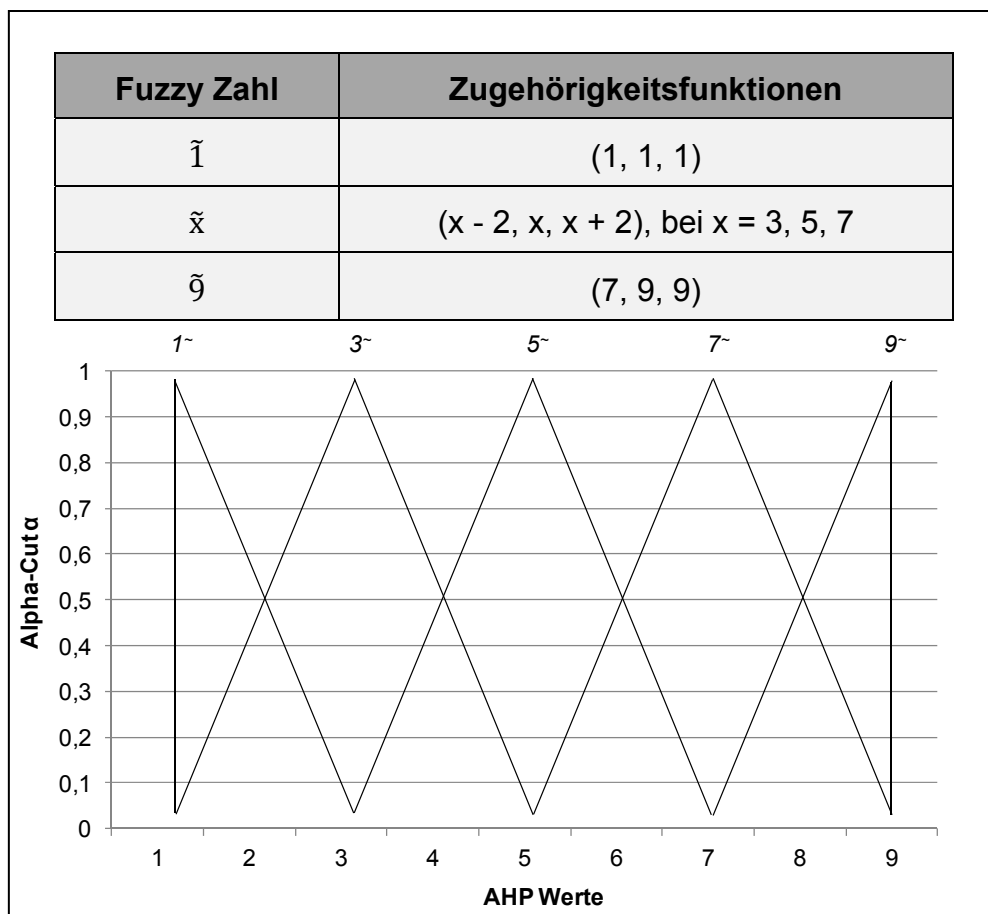


Abbildung 24: Fuzzy-Funktionen einzelner AHP-Bewertungspunkte

Wie bereits beschrieben bezieht sich ein bestimmter Wert stets auf den Alpha-Cut, wobei dieser Grad der Zugehörigkeit definiert, wie stark ein Wert zu der Fuzzy Menge gehört. Andersherum bedeutet dies aber auch, dass eine Bewertung stets zu verschiedenen Fuzzy-Mengen gehören kann. Beispielsweise gehört der Wert ‚4‘ zu der Menge ‚weniger als 5‘ sowie zu der Menge ‚mehr als 3‘. Das Intervall jeder Fuzzy-Zahl kann durch den Entscheider beschrieben werden, so dass mit Hilfe eines Software-Tools jeder beliebige Wert bestimmt werden kann.

Ebenso lässt sich sagen, dass der Alpha-Cut α als Unsicherheitsniveau bzw. Stabilitäts- oder Schwankungszustand verstanden werden kann. Mathematisch betrachtet führt der Alpha-Cut zu einer näheren Beschreibung der Ober- und Untergrenzen des Fuzzy-Intervalls, so dass die Präzision einer Aussage charakterisiert werden kann. Mit steigendem $\alpha \rightarrow 1$ stabilisiert sich das Ergebnis, das heißt, dass die Unschärfe der Entscheidung bzgl. einer Aussage sinkt. Analog dazu führt ein geringes $\alpha \rightarrow 0$ zu einer größeren Unschärfe im Modellierungsprozess, so dass die Qualität der Informationen unzureichend sind, um ein konkretes Ergebnis zu bestimmen [119].

In Tabelle 9 ist beispielhaft beschrieben, wie der Alpha-Cut das Intervall der Fuzzy-Werte beeinflusst (siehe Intervall $f(\alpha)$). Für ein $\alpha = 0$ erhält man das in diesem Beispiel größtmögliche Intervall von ± 2 . Nähert sich α immer weiter dem Wert ‚1‘, so verkürzt sich das Intervall immer mehr, bis die Fuzzy-Zahlen schließlich für ein $\alpha = 1$ in ihre scharfen Werte übergehen und kein Intervall mehr aufweisen. Mit dieser Eigenschaft lässt sich die Qualität der Information, die als Grundlage für die Bewertung eines Paarvergleiches herangezogen wird, sehr gut abbilden. Sind die Informationen mit Unschärfen behaftet oder die Bedeutung eines Kriteriums bzgl. seines übergeordneten Ziels unscharf, empfiehlt sich ein größeres Intervall ($\alpha \rightarrow 0$), um sich bzgl. der Bewertung einen Spielraum zu gewähren. Liegen der Bewertung hingegen eindeutige Fakten zugrunde, die kaum Schwankungen zulassen, kann man ein größeres α wählen, das Intervall also verkürzen, da kein Bedarf besteht, die vorgenommene Bewertung nachträglich zu ändern.

Eine weitere wichtige Variable stellt der bereits vorgestellte Optimismus-Index λ dar [41]. Mit ihm wird geregelt, wo man sich innerhalb des Intervalls befindet. Er fixiert einen Punkt innerhalb des Intervalls an. So kann bspw. bei Wahl des Alpha-Cuts $\alpha = 0$ die Fuzzy-Zahl 3 jeden AHP-Wert zwischen $f(\alpha;\lambda) = 1$ und $f(\alpha;\lambda) = 5$ annehmen.

Aufgrund der Tatsache dass durch die Nutzung der Fuzzy-Theorie nunmehr auch Zwischenwerte (in Form des Intervalls) berücksichtigt werden können, bietet der Einsatz von linguistischen Variablen einige Vorteile. Diskrete Werteskalen können um deren Zwischenräume erweitert sowie die unbewusste Unsicherheit eines Entscheiders ausgedrückt werden. Darüber hinaus erhöhen verbale Ausdrücke die Verständlichkeit einer Werteskala [189]. In der Literatur kommen mehrere Möglichkeiten der Nutzung von linguistischen Variablen vor [36] [38]. In Tabelle 9 sind beispielhaft Fuzzy-Werte, deren Bedeutungen, das Intervall $f(\alpha)$ sowie die AHP-Werte $f(\alpha;\lambda)$ dargestellt.

Fuzzy Wert	$\tilde{1}$	$\tilde{3}$	$\tilde{5}$	$\tilde{7}$	$\tilde{9}$
Bedeutung	Gleich (G1)	Schwach (Sc)	Stark (St)	Sehr stark (Ss)	Dominierend (Do)
Intervall $f(\alpha)$	$[1; 3-2\alpha]$	$[1+2\alpha; 5-2\alpha]$	$[3+2\alpha; 7-2\alpha]$	$[5+2\alpha; 9-2\alpha]$	$[7+2\alpha; 9]$
AHP Wert $f(\alpha; \lambda)$	$(1-\lambda)*(1)$ $+ \lambda*(3-2\alpha)$	$(1-\lambda)*(1+2\alpha)$ $+ \lambda*(5-2\alpha)$	$(1-\lambda)*(3+2\alpha)$ $+ \lambda*(7-2\alpha)$	$(1-\lambda)*(5+2\alpha)$ $+ \lambda*(9-2\alpha)$	$(1-\lambda)*(7+2\alpha)$ $+ \lambda*(9)$

Tabelle 9: Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Werte inklusive Alpha-Cut und Optimismus Index

Der Optimismus-Index λ regelt also, welcher Wert in der Fuzzy-Menge angenommen wird. Dieser Index sorgt im Prinzip dafür, dass die Fuzzy-Menge defuzzifiziert wird, demnach also ein scharfer Wert ermittelt wird. Für ein $\lambda = 0$ befindet man sich immer am unteren, für $\lambda = 1$ am oberen Ende des Intervalls. Man spricht deshalb von einem Optimismus-Index, weil ein kleiner Wert die Streuung zwischen den einzelnen Bewertungen gering hält und die größtmögliche Präferenz eines Attributes gegenüber einem anderen vermindert. Auf diese Art und Weise bleibt die Bewertung der Alternativen recht ausgewogen. Eine allzu starke Gewichtung eines Kriteriums wird verhindert. Dieses Vorgehen entspricht einem vorsichtigen (pessimistischen) Entscheidungsträger. Ein größerer Index λ dagegen zeugt von der Gewissheit einer hohen Informationsqualität, so dass man bedenkenlos einem Attribut eine deutlich höhere Präferenz zuordnen kann. Dieses Vorgehen entspricht also eher einem optimistischen Entscheider (Abbildung 25).

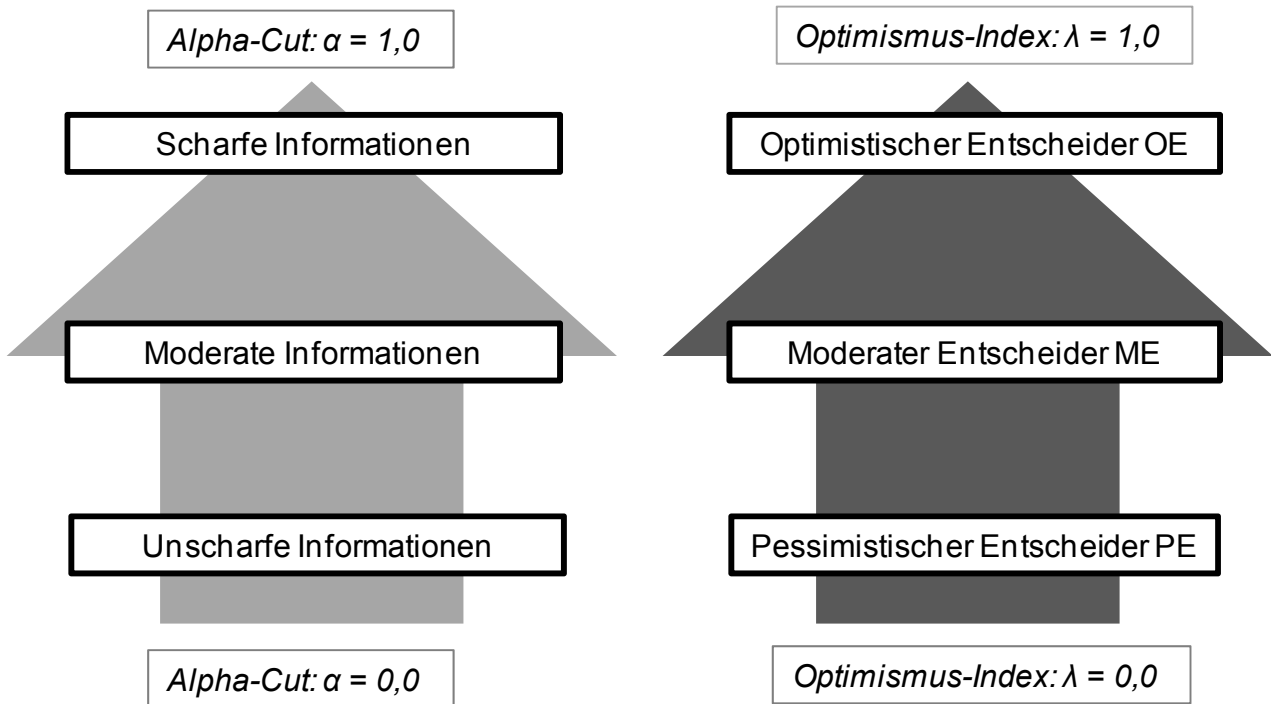
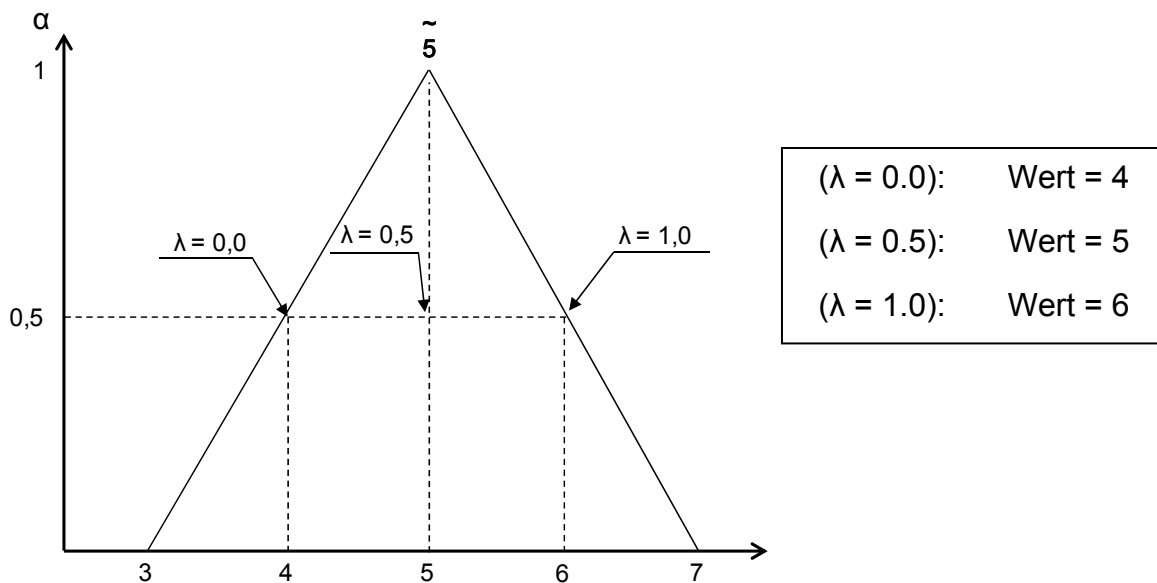


Abbildung 25: Charakteristische Eigenschaften der Informationen und des Entscheiderverhaltens bei Wahl eines Alpha-Cuts und Optimismus Index

Innerhalb der Entscheidungshierarchie des AHP bleibt es dem Entscheider demnach überlassen, welche Paarvergleichsmatrizen mit Fuzzy-Zahlen und welche mit scharfen Werten bewertet werden. Bei der Verwendung von Fuzzy-Zahlen werden für die reziproken Paarvergleiche die reziproken Werte der mit Hilfe von α und λ definierten Zahlen herangezogen.

Beispielhaft soll in folgender Abbildung 26 das Vorgehen bei der Bestimmung von Fuzzy-Zahlen dargestellt werden. Es sei der Fuzzy-AHP-Wert 5 gewählt worden. Der Entscheider setzt den Alpha-Cut α auf 0,5. Der Wert 5 soll demnach nur 50% der Menge zugerechnet werden. Desweiteren legt der Entscheider fest, ob es sich um einen pessimistischen ($\lambda = 0$), einen moderaten ($\lambda = 0,5$) oder einen optimistischen Entscheider ($\lambda = 1$) handelt. Das Ergebnis zeigt, dass in Abhängigkeit der Variablen α und λ die Werte zwischen 4 und 6 liegen, wobei der Wert 6 einer optimistischen, der Wert 4 einer pessimistischen Entscheidungspräferenz entspricht. Dies wird dadurch begründet, dass je höher ein Wert ist, desto sicherer ist sich ein Entscheider im Hinblick auf einen Vergleich zwischen zwei Attributen. Demzufolge vergibt ein optimistischer Entscheider einem Attribut eine höhere Gewichtung gegenüber dem zu vergleichenden Attribut. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass ein pessimistischer Entscheider die Ausprägung gegenüber dem zu vergleichenden Attribut geringer gewichtet.

Abbildung 26: Dreiecksfunktion der Fuzzy-Zahl "5" (F_5)

In [87] [174] [176] wurde diese Methodik für unterirdische Infrastruktur vorgestellt und im Zuge einer Planungsphase eines Leitungstunnelbauprojektes eingesetzt, wobei hier klar zu erwähnen ist, dass der Einsatz der Fuzzy-Methodik nur für qualitative Bewertungen eingesetzt wurde.

Die Projektbewertung zeigte, dass der Einsatz einer solchen Methodik durchaus sinnvoll ist. Die Stärken einer solchen Methodik liegen eindeutig in der weiteren Transparenz einer gemachten Entscheidung, da nunmehr auch unscharfe Gegebenheiten berücksichtigt werden konnten. Somit war es möglich, Unter- und Obergrenzen der einzelnen Ergebnisse je nach Alternative zu ermitteln, so dass in Abhängigkeit der Qualität der Projektinformationen und der Entscheidereinstellung die Ergebnisse noch exakter interpretierbar sind.

6.7 Einsatzbereiche der Fuzzy-Theorie in Technik und Wirtschaft

Nellessen hat in seiner Dissertation die verschiedenen Einsatzbereiche der Fuzzy-Methoden aufgezeigt [120]. Vorgestellt wurden unter anderem die Arbeiten zu [216], [129] und [130], in welchen es um die Gebirgsklassifizierung beim konventionellen und maschinellen Tunnelvortrieb ging. In [124] wurde die Fuzzy-Theorie in der Richtungssteuerung beim Rohrvortrieb eingesetzt. Die Steuerung von Injektionsvorgängen wurde in [215] mit der Fuzzy-Theorie vorgestellt. Nellessen hat die Fuzzy-Theorie für die vortriebssynchrone Prognose der Setzungen bei Flüssigkeitsschildvortrieben erfolgreich eingesetzt [120]. Mit Hilfe von Basisdaten konnte ein Modell entwickelt werden, welches sich nicht nur der Fuzzy-Theorie bedient hat, sondern eine Erweiterung, nämlich die Fuzzy-Control Methode, angewendet hat, mit welcher die verschiedenen Eingangsparameter zunächst fuzzifiziert wurden. Im Nachgang wurden spezielle, auf den Vortrieb abgestimmte Regelbasen erstellt, die eine Überlagerung der verschiedenen Fuzzy-Mengen erlaubten. Schließlich wur-

den die Ergebnisse defuzzifiziert und in einen scharfen Wert transformiert, welcher die Setzungen während des Tunnelvortriebs auf diese Weise darstellte.

Betrachtet man die vier erwähnten Arbeiten, so wird deutlich, dass bis auf den Einsatz für eine Gebirgsklassifizierung, die Fuzzy-Methodik nur in der Steuerungstechnik für unterirdische Infrastruktur eingesetzt wurde. Die Gebirgsklassifizierung hingegen beschreibt in erster Linie eine Form eines Prognosewerkzeuges, so dass der Einsatz fernab des klassischen Entscheidungsverhaltens der Projektbeteiligten erfolgt ist.

Der Einsatz der Fuzzy-Methodik zur Auswahl einer besten Alternative im Zuge der Planungsphase scheint bis heute kaum berücksichtigt worden sein. Klassische Einsatzbereiche der Fuzzy-Methoden in Technik und Wirtschaft können darüber hinaus in fünf Gruppen eingeteilt werden [134, S. 110 f.].

Unschärfe Regeltechnik: Der Bereich der unscharfen Regeltechnik wird zumeist mit den Methoden des Fuzzy-Control genutzt. Hierbei geht es insgesamt darum, die Mess- und Regeltechnik (z.B. Steuerung von U-Bahnen, Enteisungstechnik) mit Hilfe unscharfer Eingangsgrößen zu steuern bzw. zu optimieren.

Unschärfe Datenanalyse: Bei der unscharfen Datenanalyse wird mit Hilfe der sogenannten Fuzzy-Pattern-Classification die Informationsgewinnung aus Daten (z.B. Qualitätssicherung, Fehlerdiagnose) gewährleistet.

Planungs- und Entscheidungsunterstützung: Dieses Gebiet kennzeichnet die Leitung oder auch Koordination und Planung von Entscheidungsmaßnahmen, welche bspw. im Rahmen von Planungsentscheidung in Forschung und Entwicklung, Infrastrukturprojekte oder auch Finanz- und Rechnungswesen vorkommen.

Fuzzy-Expertensysteme: Mit Hilfe von Fuzzy-Experten-Shells lassen sich auf Basis von Expertenwissen automatische oder automationsgestützte Problemlösungen darstellen.

Wissensbasiertes Konfigurieren mit Fuzzy-Methoden: Die Zusammensetzung von Gesamtsystemen aus Einzelkomponenten (Investitionsentscheidungen, Standortwahl) werden sinnvoll sichergestellt.

6.8 Kritische Würdigung der Fuzzy-Methodik

In diesem Kapitel wurde gezeigt, auf welche Art und Weise die Unschärfe in Entscheidungssituationen berücksichtigt werden kann. Mit Hilfe der entwickelten Fuzzy-Logik lassen sich Situationen schaffen, die nicht mehr nur wahr oder falsch sind, sondern auch fließende Übergänge zwischen diesen beiden Zuständen betrachten. Ein erkennbarer Nachteil der Fuzzy-Logik bleibt, dass sie dennoch nicht immer genau ist. Die Ergebnisse werden als Annäherung betrachtet, so dass sie lediglich als ein Ersatz für die klassische Logik angesehen werden könnte. Die Nutzung von Fuzzy-Zahlen ist durchaus sinnvoll. Insbesondere wenn es um die Berücksichtigung von Toleranzen, Messfehlern usw. geht, scheint die Nutzung solcher Zugehörigkeitsfunktionen ideal zu sein. Somit lassen sich bei

genauerer Betrachtung Intervalle bilden, die in einem Entscheidungsprozess in Abhängigkeit der Unschärfe mit integriert werden können und demnach nicht nur ein scharfer Wert, sondern die gesamte Bandbreite für die Bewertungsuntersuchung herangezogen werden kann. Ist es den Entscheidern möglich, die Zustände Unsicherheit und Unschärfe klar voneinander zu trennen, so ist die Nutzung von Fuzzy-Zahlen bzw. das Berücksichtigen von Unschärfe ein großer Vorteil, um eine Entscheidung noch näher an die Realität zu bringen.

7 Berücksichtigung der Unsicherheit bei Bewertungen

7.1 Grundlagen zur Unsicherheitsbetrachtung

In den vorherigen Kapiteln wurde gezeigt, dass Entscheidungen unter anderem auch unter Unsicherheit getroffen werden, vor allem weil nicht uneingeschränkt bekannt ist, welche Umweltzustände tatsächlich eintreten. Unterschieden werden muss demnach in einer Entscheidung unter Risiko sowie unter Ungewissheit [152, S.187] [92, S.158f.]. Der Unterschied in den Betrachtungsweisen besteht darin, dass bei einer Entscheidung unter Risiko die Wahrscheinlichkeitsverteilungen über alle möglichen Umweltzustände bekannt sind, wohingegen bei Entscheidungen unter Ungewissheit deren Wahrscheinlichkeiten nicht bekannt sind [172]. Folglich lässt, trotz der bekannten Umweltzustände bei beiden Entscheidungsarten, die erste Variante (Risiko) eine Berechnung, die zweite Variante zumindest eine Schätzung zu. Eine Unterteilung der Unsicherheit ist in Abbildung 27 zu sehen.

Nach Neumer liegt die Ursache von Unsicherheit in der Veränderung der theoretischen Beschreibung der Umwelt begründet, nämlich der Intransparenz und Komplexität, so dass diese Faktoren einen nutzenmaximierenden Menschen dazu veranlassen, Entscheidungen unter Unsicherheit zu treffen [122, S.10]. Das kann darin begründet sein, dass dazugehörige Informationen zu komplex aufgebaut sind, so dass riskante Entscheidungen nur mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen getroffen werden können.

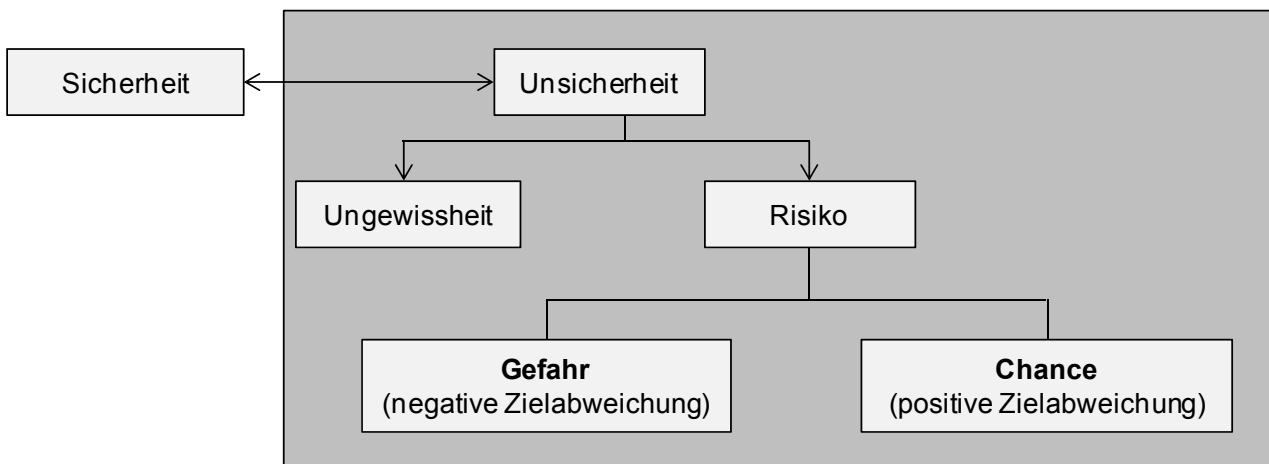


Abbildung 27: Struktur von Unsicherheit, nach [108, S.6]

Vor allem wenn es um finanzielle Aspekte geht, sind Prognosen äußerst schwierig, da viele Faktoren eine genaue Planung beeinflussen. Solche eintretenden quantitativen Faktoren können scharf, nämlich durch eindeutige Zahlen, ausgedrückt werden. Dennoch: Eine Planung eines finanziellen Budgets stellt nicht die endgültige Lösung dar. Zwar ist eine scharfe Beschreibung durchaus möglich, z.B. bei Kosten für das Erstellen eines Schlitzwandabschnittes. Eine stochastische Unsicherheit liegt dennoch vor, da diese scharfe Größe nicht die einzige Möglichkeit darstellt, denn der Bau eines Schlitzwandabschnittes ist von vielen unsicheren Faktoren abhängig (z.B. Wetterlage, Einbaugeschwindigkeit,

Baugrund usw.). Hiernach werden stochastischen Unsicherheiten Eintrittswahrscheinlichkeiten zugerechnet. Stochastische Unsicherheiten zielen demzufolge auf quantifizierbare Chancen und Risiken, so dass mit solchen Größen durchaus bereits in der Planungsphase gerechnet werden kann. Die stochastische Unsicherheit stellt demzufolge eine Größe dar, die für eine Entscheidung von Bedeutung ist. Nach Klein stellt also die stochastische Unsicherheit einer quantitativ zu beschreibenden Größe nicht nur eine Chance dar, sondern auch ein Risiko, welches zu bewerten ist [94, S.59]. Folglich unterscheiden sich Risiken von Ungewissheiten durch ihre Quantifizierbarkeit, weil sie messbar, quantifizierbar und definierbar sind [96, S.11].

7.2 Definition Risiko

Risiko wird in der Literatur sehr unterschiedlich definiert, da ein Risiko stets zweckbezogen ist und dieser Zweck verschiedene Ausprägungen aufweisen kann. Obwohl Risiko fast einheitlich als Möglichkeit der Abweichung einer Zielgröße definiert wird, existieren Unterschiede hinsichtlich der betrachteten Folgen der Abweichungen.

Risiko wird im klassischen Ingenieurwesen durch die Berücksichtigung eines Schadensausmaßes sowie der Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt. Diese Risiken werden als das Produkt aus Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit dargestellt [99]:

$$R = A \cdot w \quad (\text{Gl. 7-1})$$

R: Risiko

A: Schadensausmaß (hier z.B. in Euro €)

w: Eintrittswahrscheinlichkeit

Darüber hinaus existieren weitere Definitionen, die im Rahmen dieser Arbeit zur Vervollständigung kurz vorgestellt werden. Der PMBOK Guide erwähnt, dass Risiko stets die Gefahr eines negativen Ergebnisses ist, wobei eine Belohnung bei positiver Entwicklung mit einbezogen wird [131, S.127].

Keitsch betrachtet Risiko aus psychologischer Perspektive. Risiko hängt dabei von der ureigenen individuellen und subjektiven Wahrnehmung ab, die von Erziehung, Wertvorstellungen, Meinungen und Erfahrungen beeinflusst wurde [93, S.3].

Knight hat bereits 1921 eine Aussage hinsichtlich des Begriffes Risiko gemacht [96]:

"The distinction between risk and uncertainty: If you don't know for sure what will happen, but know the odds, that's risk. If you don't even know the odds, that's uncertainty."

Knight hat vor mehr als 90 Jahren unterschieden, dass wenn ein Mensch nicht weiß, was eintreten wird, jedoch die Eintrittswahrscheinlichkeit bekannt ist, von Risiko die Rede ist. Ist die Wahrscheinlichkeit nicht bekannt, so ist es nach Knight die Ungewissheit, wobei hier ‚uncertainty‘ nicht mit Unsicherheit zu verwechseln ist, da Risiko eine Form der Unsicherheit darstellt.

Ähnlich wie Knight beschreibt es auch Schubert, der Risiko als eine ungewisse, nicht exakt bestimmbare Größe ansieht, so dass Risikoeintritt und Risikohöhe für die Bestimmung von Risiko von Bedeutung sind [159, S.10].

Die DIN 69901:2009-01 beschreibt das Risiko lediglich als eine Gefährdung infolge negativer Auswirkungen (Verlust und Schaden) [55].

Vose definiert Risiko als ein Ereignis, welches möglicherweise eintreten kann und einen negativen Einfluss auf die Ziele einer Organisation hat. Ein Risiko besteht weiterhin aus drei Elementen: Das Szenario, die Eintrittswahrscheinlichkeit sowie das Schadensausmaß. Hat ein Ereignis einen positiven Einfluss auf die Ziele der Organisation, so spricht Vose von einer Chance, welche aus den gleichen Elementen besteht wie das eingangs beschriebene Risiko [201, S.3].

Sander geht noch einen Schritt weiter und beschreibt das Risiko mit Hilfe einer probabilistischen (stochastischen) Herangehensweise. Die Tragweite eines Risikos, also das Schadensausmaß, wird durch eine Verteilung von Werten beschrieben. Er erweitert die Unsicherheit neben der Eintrittswahrscheinlichkeit auf die Auswirkungen im Falle eines Risikoeintritts [146, S.17f.].

Chapman und Cooper definieren Risiko als eine Möglichkeit, wirtschaftliche oder finanzielle Verluste oder Gewinne zu generieren, oder auch physische Schäden oder Verletzungen als Folge einer vorherrschenden Unsicherheit zu erleiden [39].

Sandoval beschreibt in seiner Dissertation, dass Risiken Chancen für ein Projekt hervorrufen können, jedoch auch Gefahren induzieren, die auf das Projekt negative Auswirkungen haben können. In Abhängigkeit der Unsicherheit erklärt er, dass die Performance im Laufe des Lebenszyklus eines Projektes stark variieren kann, so dass ein Risiko im Verlauf des Lebenszyklus immer weniger beeinflussbar ist und die Chancen bzw. Gefahren kaum noch zu beherrschen sind. In Abbildung 28 beschreibt Sandoval in Abhängigkeit der Lebenszyklusphasen (Planung, Bau und Betrieb) die Performance sowie das dazugehörige Risiko [147, S.35].

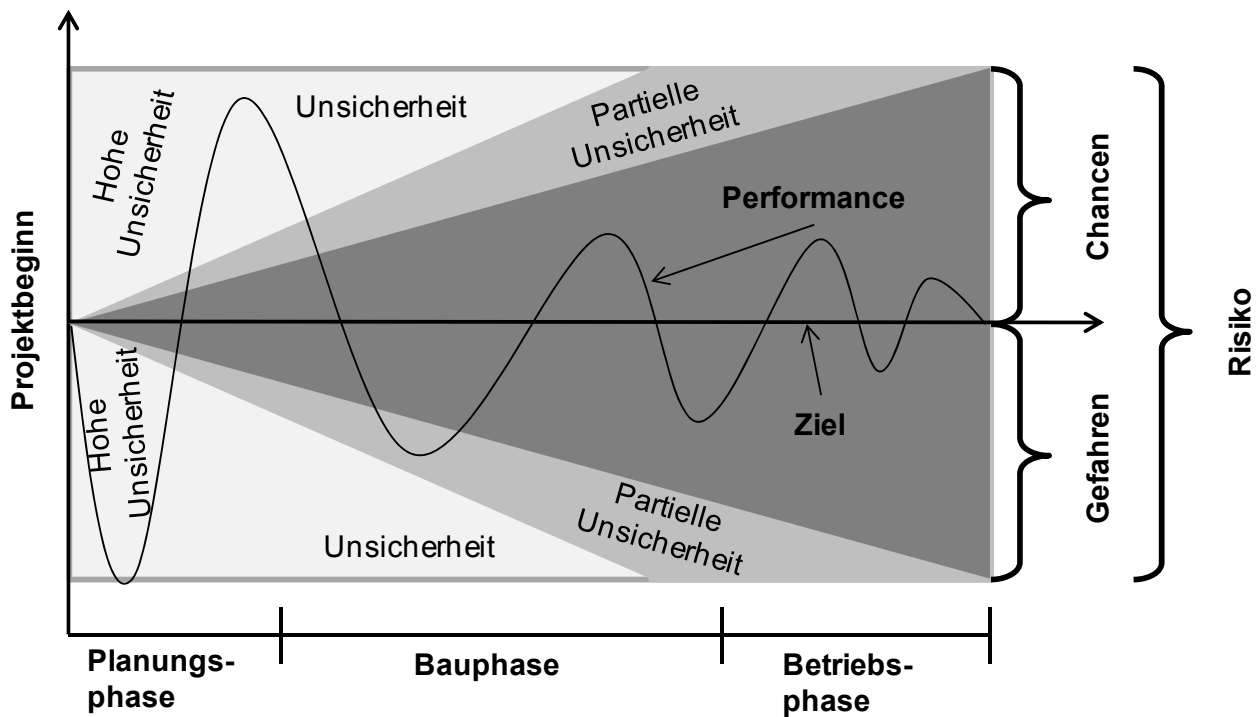


Abbildung 28: Einfluss der Unsicherheit auf die Performance eines Projekts,
nach [147, S.36]

Bezugnehmend auf die aufgeführten Definitionen sollen für die weitere Betrachtung in dieser Arbeit die folgenden Definitionen gelten: Ein Risiko ist ein Zustand, der die Wahrscheinlichkeit möglicher Ereignisse beschreibt, welche unvorhergesehen auftreten oder erwartet werden und in Bezug auf Zeit, Kosten und Qualität negativ beeinflussen. Eine Chance ist die Möglichkeit eines vorteilhaften Ereignisses vor allem dann, wenn das Eintreten des Risikos erfolgreich verhindert bzw. die Auswirkung des Risikos erfolgreich gemindert werden konnte und möglicherweise ein Gewinn für das Projekt entstehen kann (Gewinn im Sinne von finanziellem Gewinn, Image, Termineinhaltung usw.).

7.3 Risiko für unterirdische Infrastruktur am Beispiel Tunnelbau

7.3.1 Risikogruppen im Zuge des Lebenszyklus eines Verkehrstunnels

Tunnelbauprojekte werden deswegen in der Öffentlichkeit kontrovers diskutiert, da grundsätzlich von hohen Investitionen seitens der öffentlichen Hand auszugehen ist. Projekte dieser Art werden darüber hinaus mit Auflagen wie z.B. die Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung belegt. Dennoch beinhaltet eine Planung einer solchen Infrastruktur stets Unsicherheiten bzw. Risiken, sei es das Baugrundrisiko oder aber auch Sicherheitsaspekte, die eingehalten werden müssen.

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, sind im Planungsprozess verschiedene Gruppierungen vertreten wie bspw. Auftraggeber, Politiker, Teile der Öffentlichkeit und Umweltorganisationen. Jede teilnehmende Projektgruppe beurteilt eine Gefahr bzw. das

resultierende Risiko auf ihre subjektive Art, was die Risikobeurteilung erheblich erschweren kann, so dass bspw. Kosten nicht ausführlich kalkuliert bzw. Zeitpläne nicht eingehalten werden können und demnach der Bau eines solchen Projektes negative Auswirkungen haben kann. Folglich ist zu klären, welche Risiken überhaupt bei einem Tunnelprojekt auftreten und wie diese in ein Entscheidungsmodell integriert werden. Hierzu ist es zunächst notwendig, den Lebenszyklus einer unterirdischen Infrastruktur zu betrachten.

Nach Bruhnke und Kübler beschreibt der Lebenszyklus eines Bauwerkes einen Wandel im Verlauf der Lebensdauer von Objekten. Unter einem Zyklus ist ein periodisch ablaufendes Geschehen zu verstehen. Der klassische Bauwerkslebenszyklus im ‚weiteren Sinne‘ beinhaltet den Lebenszyklus des gesamten Objektes. Eine Idee wird geplant und entwickelt, anschließend realisiert, danach genutzt und abschließend verwertet. Sobald aber die Verwertung abgeschlossen ist, steht der Grund und Boden wieder zur neuen Nutzung frei und der Lebenszyklus wird zwar mit neuer Bebauung, aber dennoch innerhalb des Lebenszyklus fortgesetzt. Der Abbruch des Gebäudes bedeutet also nicht gleichzeitig auch die Beendigung des Zyklus. Anders verhält es sich bei einem Lebenszyklus im ‚engeren Sinn‘. Die Lebensdauer beinhaltet einen klaren definierten Anfang und ein definiertes Ende. Anders als beim Lebenszyklus im ‚weiteren Sinne‘ wird der Lebenszyklus also nicht theoretisch unendlich fortgeführt, sondern es kommt nach Ablauf eines Zyklus zu einem Abschluss. Auch ein Lebenszyklus im ‚engeren Sinn‘ kann durch eine Umnutzung verlängert werden, allerdings ist die Nutzungsdauer immer endlich, so dass der Lebenszyklus nicht ewig weitergeführt werden kann. Mit dem Abbruch eines Bauwerkes endet der Gebäudelebenszyklus im engeren Sinn [21]. Eine Möglichkeit der graphischen Darstellung kann in Form eines Zeitstrahles erfolgen (Abbildung 29).

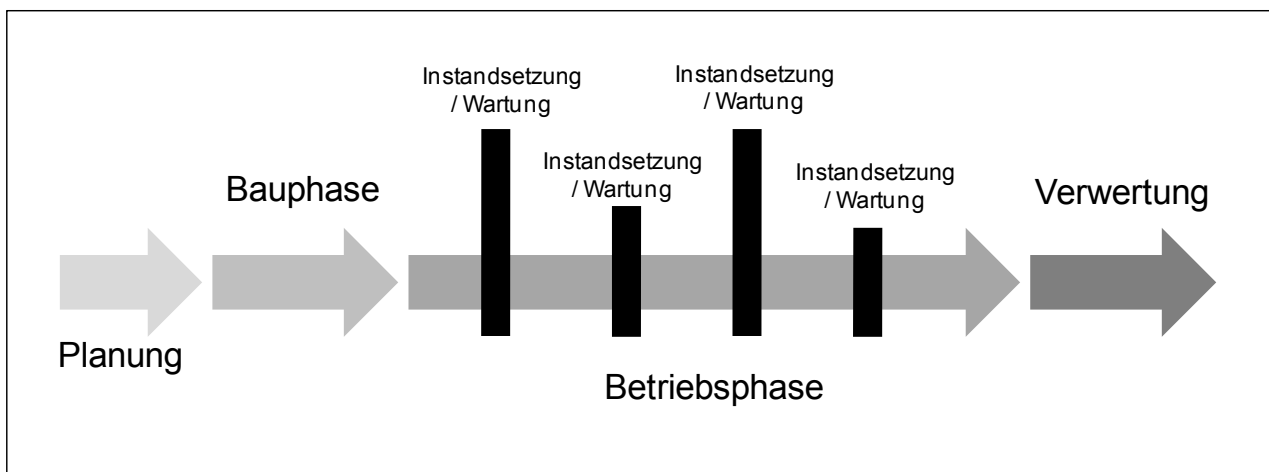


Abbildung 29: Lebenszyklus eines Bauwerks, nach [21]

Die eben vorgestellten Lebenszyklen können bedingt auch für Tunnelbauwerke herangezogen werden. Für den Tunnelbau ist lediglich die letzte Phase (Verwertung bzw. Abbruch) etwas differenzierter zu betrachten, da ein Abbruch bzw. eine Verwertung für ein Tunnelbauwerk nicht gelten kann. Tunnel sind für eine sehr lange Nutzungsdauer konzi-

piert, die lediglich durch Instandhaltungsmaßnahmen verlängert werden kann. Unabhängig davon soll die letzte Phase für diese Arbeit nicht von Bedeutung sein, da es schließlich zunächst um den Neubau einer Tunnelbaumaßnahme geht und sich die Fragestellung mit der Wahl eines adäquaten Bauverfahrens beschäftigt.

Vogt beschreibt in seiner Arbeit, dass für Bauwerke sich vier Phasen identifizieren lassen. Die Identifikation der Phasen ist dabei eng an die Ausführungen von Bruhnke et al. gekoppelt, wobei Vogt deutlich macht, dass in der ersten Phase, welche für die vorliegende Arbeit von Bedeutung ist, die Planungsphase erst dann beendet ist, wenn die Bauleistungen vergeben werden. Vogt stellt dar, dass sich ein Bauherr mit der Anwendung der lebenszyklusorientierten Planung Effizienzgewinne für die Betriebs- und Unterhaltungsphase verspricht. Folglich sind für die Vergabe eines Auftrags Aspekte aus der Betriebsphase mit einzubeziehen, so dass im Zuge der Planung alternative Ausführungsvarianten bewertet werden, die Kriterien wie Wirtschaftlichkeit, Dauerhaftigkeit und ökologischen Nachhaltigkeitsaspekten berücksichtigen sollten [197, S.45ff.].

Aufgrund dieser ganzheitlichen Betrachtung wird deutlich, dass bereits in dieser ersten Phase die Risiken bekannt sein sollten, die ebenso in späteren Phasen auftreten könnten, damit die beste Ausführungsvariante gewählt werden kann. Die Wahl der Ausführungsvariante schließt dabei die Wahl des Bauverfahrens mit ein, so dass bauverfahrensabhängige Risiken ebenfalls früh in die Planung integriert werden können.

Nach Nemuth existieren bei allgemeinen Bauprojekten insgesamt vier Risikogruppen, welche wie folgt klassifiziert werden und während unterschiedlicher Lebenszyklusphasen eintreten [121, S.82-105].

Strategische Risiken befassen sich mit Unsicherheiten, die das unternehmerische Handeln betreffen. Es geht hierbei um die Frage, wie geschäftspolitische Entscheidungen das eigene Handeln bzw. das Geschäftsfeld beeinflussen. Quantitativ lassen sich solche Risiken nur schwer beziffern, da solche Risiken nur ideell begründet werden. Bspw. existiert ein solches Risiko gegeben, wenn ein Unternehmen sich dafür entscheidet, eine neue Baumethode anzubieten, mit welcher man bis jetzt kaum Erfahrungswerte aufweist. Ein solches Risiko tritt erstmalig in der Planungsphase auf, so dass dieses Risiko ohne weiteres einen starken Einfluss auf weitere Phasen hat.

Operative Risiken stellen alle projektbezogenen Risiken dar, die mit einem Bauprojekt auftreten können. Diese Risiken können z.B. aus der Bauvertragsart ruhen, ungeplanten Bauabläufen, unzureichendem Personaleinsatz, falschen Baumethoden und Mengenrisiken. Nemuth unterteilt desweiteren in Kosten- und Terminrisiken, wobei letztere Mehrkosten durch Sekundäreinflüsse entstehen und nach sich ziehende Vertragsstrafen hervorrufen, was schließlich ebenfalls ein Kostenrisiko darstellt.

Finanzielle Risiken können ebenfalls monetär ausgedrückt werden können. Dabei spielen Risiken wie Zahlungsunfähigkeit, Kursschwankungen und ein unzureichendes Cash-Flow eine bedeutsame Rolle.

Die sonstigen Risiken stellen Risiken aus höherer Gewalt dar, vor allem von außen kommende Einflüsse, auf die ein Entscheider bzw. sämtliche am Projekt beteiligte Personen keinen Einfluss haben. Solche Risiken sind bspw. Terrorakte, Umweltkatastrophen, aber auch Brandkatastrophen, die durch Autounfälle induziert werden.

Bei näherer Betrachtung der vier Risikogruppen lässt sich folgern, dass diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten eintreten können. Auch ist ersichtlich, dass man solche Risiken zu einem konkreten Zeitpunkt beeinflussen bzw. steuern kann. Die sonstigen Risiken stellen jedoch Szenarien dar, auf die ein Entscheider zu Beginn der Planung grundsätzlich keinen Einfluss hat. Er kann zwar solche Risiken abschätzen, unterschiedliche Szenarien durchspielen und eventuelle Vorsichtsmaßnahmen ergreifen, jedoch ist eine direkte Beeinflussung durch den Planer ohne weiteres nicht möglich.

Zu diesem Aspekt gehören auch Risiken wie das Nutzerrisiko, Bauwerksrisiko oder auch das Unfallrisiko im Zuge der Bauphase eines Tunnelbauwerks. Das Nutzerrisiko beschreibt im Prinzip die mögliche Gefahr von Personen bei einem Unfall in einem Tunnel während der Betriebsphase bspw. in Form von Autounfällen. Es stellen sich Fragen hinsichtlich der Rettung solcher Personen. Im Vorfeld muss demnach die Ausstattung eines Tunnels festgelegt sein, damit das Nutzerrisiko im Zuge der Betriebsphase minimiert wird. Analog dazu verhält sich auch das Bauwerksrisiko, welches ebenfalls nur in der Betriebsphase eines Tunnels auftreten kann. Hierbei geht es um die Schädigung des Bauwerks beim Eintritt eines Schadens bspw. durch einen Brand oder durch terroristische Angriffe. Das Bauwerksrisiko befasst sich demnach mit der Frage, welchen Schaden ein Tunnelbauwerk annehmen kann.

Vogt erklärt in seiner Arbeit, dass während der Betriebsphase eines Tunnelbauwerks weitere Unsicherheiten auftreten können. Dies ist dann der Fall, wenn bspw. Bauteile ausgetauscht oder Änderungen dem aktuellen Stand der Technik entsprechend durchgeführt werden müssen. Die wirtschaftlichen Risiken können der Gruppe der operativen Risiken zugerechnet werden [197, S.95ff.].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass verschiedene Arten von Risiken existieren, jedoch nicht alle im Zuge einer Entscheidung betrachtet werden können und müssen. Das Bauwerks- und Nutzerrisiko hat auf die Verfahrensauswahl einer Vortriebmethode zunächst keinen Einfluss. Durch die Wahl des Bauverfahrens wird zeitgleich auch der Querschnitt eines Tunnels festgelegt. Erst unter Berücksichtigung dieses Querschnittes setzt die Untersuchung des Bauwerks- und Nutzerrisikos ein, so dass diese Risiken in das Entscheidungsmodell nicht integriert werden. Darüber hinaus lassen sich solche Risiken auch als Katastrophenrisiken bezeichnen, auf die ein Projektbeteiligter zu Beginn ohnehin kei-

nen Einfluss hat und die ohne weiteres auch nicht eintreten können bzw. kalkulierbar sind. Im Prinzip fallen diese Risiken in die Kategorie der sonstigen Risiken.

Demgegenüber stehen Risiken, auf die Projektbeteiligte Einfluss haben bzw. diese steuern und lenken können. Diese Risiken sind zumeist monetärer, durchaus auch qualitativer Natur, wenn es z.B. um das Unfallrisiko des Baustellenpersonals geht. Denn je nachdem welches Bauverfahren gewählt wird, so müssen verschiedene Sicherheitsmaßnahmen während der Bauphase getroffen werden.

Wird hingegen die direkte Bauphase eines Tunnelprojektes betrachtet, so werden hier Risiken auftreten, die in der Planungsphase des Projektes ebenfalls nicht exakt vorherbestimmt werden können. In diese Kategorie fällt zum Beispiel das Baugrundrisiko. Bei Risikoeintritt kann es durchaus passieren, dass erneut Kosten entstehen, die im Rahmen einer Planung nicht berücksichtigt wurden. Dennoch handelt es sich um technische Risiken, die zwar monetäre Auswirkungen haben, jedoch nicht als klare wirtschaftliche Risiken, die von Beginn an quantifizierbar sind, deklariert werden.

Eine erneute Betrachtung des Lebenszyklus zeigt auf, dass auch unter Berücksichtigung der Abbildung 29 gerade zu Beginn eines Projektes, also vor der Verfahrensauswahl, aufgrund unterschiedlicher unbekannter Größen, die operativen Risiken am größten sind, die mit verschiedenen Methoden, welche im weiteren Verlauf dargestellt werden, behandelt werden können. Folglich ist diese Art der Risiken genauer zu untersuchen [147].

Bevor im nächsten Abschnitt die Einordnung der auftretenden Risiken in die Projektphasen erfolgt, sei hier erwähnt, dass eine Risikobetrachtung im Normalfall viele Aspekte umfasst, die in einer klassischen Entscheidungssituation betrachtet werden. Unter Berücksichtigung der Arbeiten von Faber sind im Zuge einer Entscheidung nicht nur finanzielle Kriterien maßgebend, sondern vielmehr Risiken heranzuziehen, die ein Bauwerk insgesamt betreffen [63]. Dazu zählen grundsätzlich alle Risiken, die im Laufe der Lebensphase eines Bauwerks auftreten können (Katastrophenrisiken, strukturtechnische Risiken, Sicherheitsrisiken usw.). Hierzu zeigt Faber Ansätze, wie Risiken zu identifizieren und zu bewerten sind. Dazu zählen die Analyse der verwendeten Baustoffe, der Struktur der Konstruktion sowie der Lage des Bauwerks. Insgesamt geht es Faber darum, unter Berücksichtigung aller möglichen auftretenden Risiken, ein Bauwerk zu konstruieren, welches von der Gesellschaft hinsichtlich aller Risiken akzeptiert wird. Es sei hier nochmals erwähnt, dass in dieser Arbeit der Fokus auf die Nutzung des operativen Risikos gelegt wird, was im weiteren Verlauf noch genauer erläutert wird.

7.3.2 Einordnung der auftretenden Risiken in die Projektphasen

Um die eben aufgezeigten Risiken aufzudecken, soll die HOAI herangezogen werden. Nach der HOAI [34] sind für Bauprojekte grundsätzlich Kostenermittlungen durchzuführen, die nach der DIN 276-1 [51] chronologisch durchlaufen werden müssen. Vogt hat in seiner Arbeit Ergebnisse verschiedener Autoren miteinander verglichen und zusammengefasst

[197, S.93]. Dabei stellt er fest, dass vor allem in den Leistungsphasen 2 und 3 teilweise ein Schwankungsbereich von bis zu 40% bzgl. einer Kostenfeststellung vorliegen kann (siehe Tabelle 10).

Projektphase		Stufen der Kostenermittlung nach DIN 276-1	Schwankungsbereich bzgl. Kostenfeststellung
Bedarfsplanung nach DIN 18205		Kostenrahmen	
Leistungsphase nach HOAI	1. Grundlagenermittlung	---	---
	2. Vorplanung	Kostenschätzung	± 30 % (teilw. ± 40 %)
	3. Entwurfsplanung	Kostenberechnung	± 20 % (teilw. ± 25 %)
	4. Genehmigungsplanung	---	---
	5. Ausführungsplanung	---	---
	6. Vorbereitung 7. Mitwirkung Vergabe	Kostenanschlag	± 10 % (teilw. ± 15 %)
	8. Objektüberwachung (Bauüberwachung)	Kostenfeststellung	0
	9. Objektbetreuung/ Dokumentation	---	---

Tabelle 10: Schwankungsbereich bzgl. Kostenfeststellung in Abhängigkeit der Projektphase, nach [197, S.93]

Durch diese Ergebnisse wird ersichtlich, dass eine Kostenermittlung immer in Verbindung mit dem Zeitpunkt ihrer Erstellung steht. Vogt stellt desweiteren fest, dass sämtliche zuvor dargelegten Stufen der Kostenermittlung nur die Initialkosten umfassen, so dass ein lebenszyklusorientierter Planungsablauf nicht gewährleistet ist. Darüber hinaus erwähnt er, dass bei der Ermittlung der langfristig zu prognostizierenden Folgekosten ebenfalls Schwankungen zu berücksichtigen sind. Zusammengefasst bedeutet dies, dass Risiken somit nicht nur bei klassischen Initialkosten zu finden sind, sondern auch bei der Kalkulation von Folgekosten, d.h. Kosten während einer möglichen Betriebsphase, entstehen können. Unter Berücksichtigung der HOAI §15 fällt desweiteren auf, dass ein Bauherr, welcher durch Planer und weitere Projektbeteiligte unterstützt wird, bereits in einem frühen Stadium klare Vorstellungen über Design, Umfeld und Budget hat [151] [206, S.11ff.]. Zu diesem Zeitpunkt hat der Planer bereits Kenntnis über einen Zielkatalog, genauen Standort, behördlich genehmigte Planungsunterlagen, Leistungsbeschreibungen, Organisation sowie Kosten-/Nutzenanalyse eines Bauherrn. Ein Planer kann demzufolge einen Risikokatalog erstellen, den er mit weiterem Wissensstand erweitern und bis zur Phase der Ausschreibung fortführen kann. Im Prinzip wird die Wahl eines Bauverfahrens in den Phasen der Vor- und Entwurfsplanung sowie Genehmigungsplanung festgelegt. Erste Überlegungen über das Bauverfahren finden demnach in der Vor- und Entwurfsplanung statt, die in der Genehmigungsplanung nochmals genauer untersucht werden müssten. Spätestens zu

diesem Zeitpunkt müssen die Risiken bzw. die unsicheren Faktoren klar herausgearbeitet worden sein, damit die Wahl des Bauverfahrens transparent erfolgen kann. Risiken, die erst zu einem späteren Zeitpunkt eintreten, können zu diesem Zeitpunkt nicht exakt bzw. in vollem Umfang prognostiziert werden. Aus diesem Grund werden diese in der Entscheidungsfindung nicht berücksichtigt. Die einzelnen Planungsphasen sowie die Einordnung der Bauverfahrensauswahl in den Planungsprozess sind in folgender Abbildung 30 dargestellt.

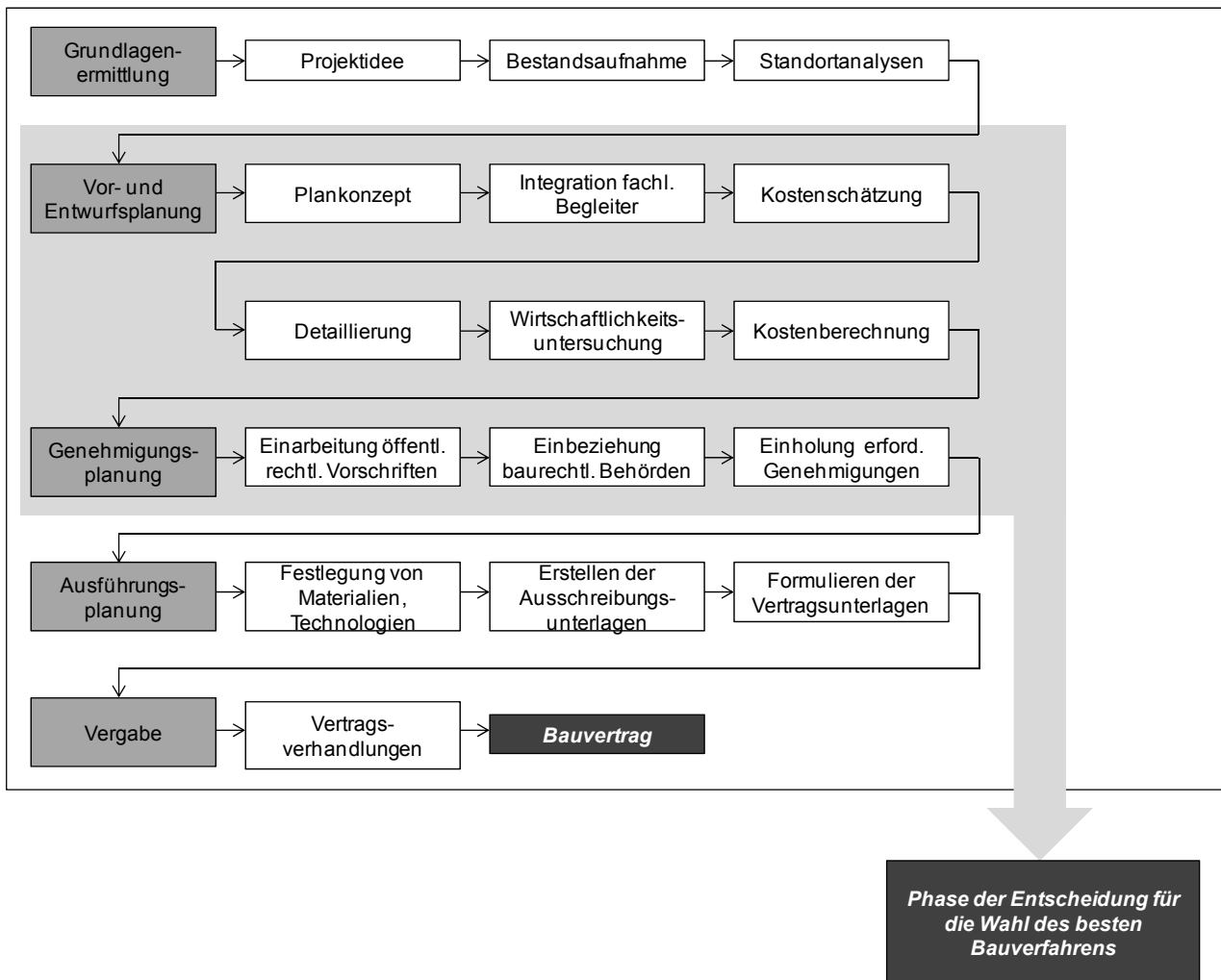


Abbildung 30: Einordnung der Entscheidungsfindung in den Phasen der einzelnen HOAI-Schritte

Nach Abbildung 30 ist eine Entscheidung somit von mehreren Zwischenschritten abhängig. In jedem dieser Schritte können Risiken identifiziert und beschrieben werden. Diese Risiken sind folglich einer Risikoanalyse zu unterziehen. Zu Beginn einer Risikoanalyse ist es jedoch sinnvoll, zunächst die unterschiedlichen Arten von Risiken zusammenzustellen. Keitsch [93, S.23ff.], Mustafa und Al-Bahar [115], Schwarz und Sandoval [162] sowie Maria-Sanchez [110, S.9 und S.24ff.] haben in ihren Arbeiten eine sehr ähnliche Darstellung über die Art der Risiken zusammengestellt, die in der Entscheidungsphase identifiziert werden können, welche jedoch ausschließlich monetärer Natur sind. Während Sandoval und Schwarz die Risiken teilweise in globale und projektorientierte Risiken unterteilen, ist die Klassifizierung von Maria-Sanchez sowie Mustafa exakter bzw. ausführlicher beschrieben.

Es bleibt jedoch undeutlich, wann genau diese Risiken zu berücksichtigen sind. Demmler führte in seinen Untersuchungen, speziell für den Tunnelbau, Risikofelder auf, die für die Angebotssichtungsphase wichtig sind. Dabei stellt er fest, dass um das wirtschaftliche Risiko insgesamt zu minimieren, zunächst Risiken identifiziert und schließlich qualitativ bewertet werden müssen [47]. Durch die Darstellung der analysierten Risikofelder in Akzeptanzbereiche wird ein weiterer Handlungsbedarf festgelegt, so dass in einem nächsten Schritt eine Kalkulation inklusive der risikobehafteten Größen erfolgen kann. Betrachtet man dabei erneut die Abbildung der HOAI §15, so lässt sich dieser Schritt ebenfalls in die Phase der Vor- und Entwurfsplanung einordnen. In folgender Abbildung 31 sind die Hauptgruppen der einzelnen Risiken kurz dargestellt. Auf eine vertiefende Analyse der Einzelrisiken wird in dieser Arbeit jedoch verzichtet.



Abbildung 31: Einfluss der Unsicherheit auf die Performance eines Projekts, nach [47]

Wichtig für die weitere Bearbeitung dieser Arbeit sind schließlich die monetären Auswirkungen von Projekten unterirdischer Infrastruktur. In erster Linie sollen solche Kostenfaktoren unter Berücksichtigung der Risikogruppen prognostiziert und in das Entscheidungsmodell integriert werden. Interessant sind diesbezüglich auch die Untersuchungen von

Sander: Er unterscheidet in seiner Dissertation nochmals in Kosten aus Risiken sowie Kostenunsicherheiten (Abbildung 32). Der Unterschied besteht in erster Linie darin, dass Kostenunsicherheiten Unschärfen in Bezug auf Basiskosten eines Projektes sind, welche grundsätzlich immer eintreten (Eintrittswahrscheinlichkeit 100%) [146, S.18]. Die Höhe dieser Kosten wird in solchen Fällen mit Bandbreiten dargestellt, anstatt stochastische Größen zu nutzen. Risiken hingegen sind in den Basiskosten nicht enthalten, da die Szenarien nicht exakt vorhersehbar bzw. unsicher sind, so dass für Risiken Eintrittswahrscheinlichkeiten vergeben werden müssen. Tritt ein Szenario ein, werden zu den Basiskosten zusätzlich Kosten (Kosten aus Risiko) hinzugefügt. Kostenunsicherheiten werden demnach nicht mehr in diesem Kapitel betrachtet, sondern fallen in den Bereich der Unschärfe. Solche Größen werden mit Hilfe von Fuzzy-Funktionen dargestellt.

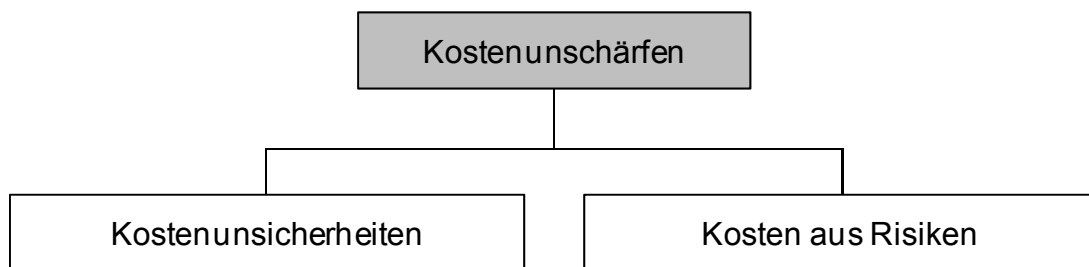


Abbildung 32: Übersicht der Unschärfen bzgl. Kosten, nach [146, S.18]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für diese Arbeit Unsicherheiten berücksichtigt werden, die während der Planungsphase identifiziert werden und monetärer Natur sind. Dazu sollen in erster Linie sämtliche Kosten zählen, die für die Kalkulation eines Projektes von Bedeutung sind, wobei stets die Prämisse gelten muss, dass das Ziel der Entscheidung, die Wahl des besten Bauverfahrens sein muss. Um diese Unsicherheiten bzw. Risiken zu identifizieren und zu bewerten, sind spezielle Risikomanagementmethoden notwendig, die in den weiteren Kapiteln vorgestellt werden.

7.4 Risikomanagementprozess

Der Bau unterirdischer Infrastruktur beinhaltet, wie bereits beschrieben, eine Vielzahl an Risiken, die während der Herstellung zwangsläufig auftreten können. Von Beginn an wird der Bauprozess von vielen Unsicherheiten begleitet, wie z.B. Wetterverhältnisse, Nachunternehmerpleiten sowie Zeitüberschreitungen. Folglich können solche Projekte die hohen Anforderungen an Zeiteinhaltung, Qualität und Kosten nicht einhalten, so dass im Laufe der letzten Jahre vermehrt ein Risikomanagement eingeführt wurde, mit dem Ziel, Risiken zu identifizieren und nachhaltig zu vermeiden. Dabei wurden verschiedene Modelle entwickelt, die bspw. Kangari und Riggs in zwei Überkategorien unterteilen: Probabilistische Modelle sowie konzeptionelle Modelle [89].

Der Risikomanagementprozess ist im Prinzip der planvolle Umgang mit Risiken, denen sich Projektgruppen bzw. Entscheider stellen müssen, wobei es sich um das Management von allgemeinen und speziellen Risiken handeln kann. Das Risikomanagement im Zuge

einer Planung eines Projektes unterirdischer Infrastruktur umfasst demnach alle Maßnahmen, die dazu dienen, Risiken zu erkennen, zu bewerten, zu steuern und zu kontrollieren. Aufgabe eines funktionierenden Risikomanagements ist die Darstellung des Gesamtrisikos, welches die wechselwirkenden Einzelrisiken als Ganzes bündelt [207, S.31].

Fikar stellt das Risikomanagement als eine systematisierte Vorgehensweise dar, bei der identifizierte Risiken analysiert und mit Hilfe von Maßnahmen bewältigt werden. Ursachen und Folgen können auf diesem Wege durch ein Risikomanagement für Entscheidungen berücksichtigt werden [64, S.30].

Risikomanagement ist insgesamt als ein fortlaufender Prozess zu betrachten. Dieser Prozess muss als immer wiederkehrender Aspekt gesehen werden muss. Potentielle Risiken sind zunächst zu identifizieren, anschließend zu bewerten und letztlich zu klassifizieren. Im Zuge der anschließenden Risikobehandlung wird die Wirksamkeit und Nachhaltigkeit der möglichen Steuerungsmaßnahmen überprüft [133, S.26]. Insgesamt ist ein funktionierendes Risikomanagement nicht nur auf einen Zeitpunkt zu belassen. Idealerweise sollten Risiken in der Planung direkt am Ort ihres Entstehens erfasst und beeinflusst werden, so dass bei Risikoänderung die Gestaltung des Risikomanagements flexibel gestalten lassen kann [104, S.2]. Langfristig verhindert ein funktionierendes Risikomanagement den Eintritt von Gefahren [64, S.31].

In folgender Abbildung 33 sind die wichtigsten Bausteine eines funktionierenden Risikomanagementprozesses dargestellt, wobei einige Autoren noch weitere Aspekte an dieses Modell ankoppeln, die jedoch hier nicht weiter vertieft werden sollen. Die einzelnen Elemente werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

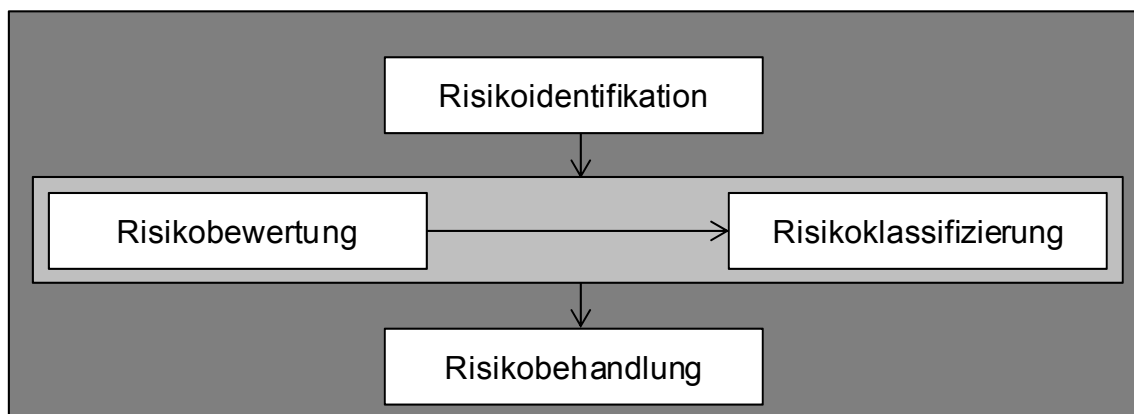


Abbildung 33: Elemente des Risikomanagements, nach [157, S.20]

7.4.1 Risikoidentifikation

Die Risikoidentifikation hat die Aufgabe, nicht nur aktuelle sondern auch zukünftige Störfaktoren und deren Auswirkungen im Zuge der Planungsphase zu identifizieren und zu analysieren [74, S.28ff.].

Dabei gilt es, Risiken möglichst vollständig zu erfassen, um so eine Informationsbasis für die nachgelagerten Phasen zu schaffen, so dass nur die Risiken bewertet und gesteuert werden, die auch durch die Projektgruppe ermittelt wurden. Wichtig hierbei sind Risiken, die wahrnehmbar und steuerbar sind. Unter wahrnehmbare Risiken sind diejenigen zu verstehen, die im Zuge der Risikoidentifikation ermittelt werden können. Steuerbare sind derartige, die bei Aufdeckung vermindert werden können. Demnach bleibt der Projektgruppe immer ein Bestand von Restrisiken, die nicht wahrgenommen werden und folglich nicht gesteuert werden können. Dieses Restrisiko ist darauf zurückzuführen, dass Risiken durch einen Planer unterschiedlich bewertet werden. Die Risikoidentifikation ist eine kontinuierliche Aufgabe, die in die entscheidungstheoretische Analyse eines Projektes integriert werden muss. Deswegen bedarf es einer ständigen Aktualität der zugrunde liegenden Informationen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die möglichst genaue Aufdeckung aller aktuellen und potentiellen Einzelrisiken, wobei das Risikomanagement effektiv gestaltet sein sollte, um Risiken schnell zu erkennen. Die frühzeitige Erkennung der Risiken ist oftmals jedoch nur mit einem geringeren Aufwand verbunden [207, S.41].

Die Risikoidentifikation sollte nicht ausschließlich intuitiv, sondern hauptsächlich unter Verwendung geeigneter Methoden erfolgen. Um eine möglichst ganzheitliche Risikoidentifikation durchzuführen, müssen die einzelnen Identifikationsmethoden kombiniert angewendet werden. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten, für ein Bauprojekt geeigneten Identifikationsmethoden dargelegt. Die Identifikationsmethoden können grundsätzlich in Kollektions- und Suchmethoden unterteilt werden. Bei den Kollektionsmethoden handelt es sich größtenteils um bereits in der Praxis häufig angewandte Techniken. Dazu zählen Methoden wie die Verwendung von Checklisten, das Führen von Interviews sowie die Durchführung von SWOT-Analysen (strengths-weaknesses-opportunities-threats). In der Regel dienen diese Methoden der Identifikation von Risikoquellen. Nach Romeike et al. ergeben sich Schwierigkeiten gegenüber der Ermittlung der Einzelrisiken und derer Wechselwirkungen und dem starren Raster. Als positiv sind jedoch die Erfahrungswerte sowie Kompetenzen einzelner Interviewpartner, die einen Einfluss auf die Identifikation der Risiken haben können.

Der Fokus der analytischen Suchverfahren liegt auf der Identifikation bisher unbekannter und zukünftiger Risiken. Diverse Verfahren haben ihren Ursprung im Qualitätsmanagement. Da sich die Prozesse des Qualitätsmanagement und des Risikomanagements gleichen, ist es sinnvoll Methoden, die sich im Qualitätsmanagement bewährt haben, in den Risikoidentifikationsprozess zu übertragen. Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA) haben ihre Stärken in der Beschreibung des Gesamtsystems und die darauffolgende Zerlegung in einzelne Funktionsbereiche. Dadurch ist es möglich, eindeutige Fehler und Einflüsse zu identifizieren, so dass Ursache-Wirkungs-Ketten dargestellt werden können. Bei der Fehlerbaumanalyse hingegen werden nicht einzelne Systemkomponenten sondern das gestörte Gesamtsystem betrachtet, so dass gezielt Störungen für das Ge-

samtsystem beschrieben werden. Mit Hilfe der Vergabe von Eintrittswahrscheinlichkeiten für alle einzelnen Komponenten lässt sich das Top-Ereignis beschreiben (z.B. Überschreitung des Budgets um 50%). Diese Art der Analyse wird in der Praxis zur Suche von Fehlerursachen angewendet [136, S.176].

Kreativitätsmethoden basieren auf kreativen Prozessen. Dazu werden klassische Methoden wie das Brainstorming und die Delphi-Methode genutzt. Brainstorming hat dabei den Vorteil, dass das Kommunikationsverhalten der Beteiligten gestrafft und demokratisiert wird. Dadurch ist es möglich, unnötige Diskussionen zu vermeiden, indem das Wissen mehrerer Personen genutzt wird [136, S.177].

Bei der Delphi-Methode wird ein Fragebogen genutzt, welcher alle zu beantwortenden Fragen enthält. Jeder Beteiligte beantwortet den Fragebogen für sich. Auf diese Weise lassen sich die Beteiligten durch andere Meinungen und Aussagen nicht beeinflussen. Im Anschluss an die einzelnen Expertenbefragungen werden die Ergebnisse ausgewertet und in der Gruppe diskutiert [136, S.177].

Die einzelnen Methoden (Kollektions- und Suchmethoden) sind nochmals in folgender Abbildung 34 dargestellt.

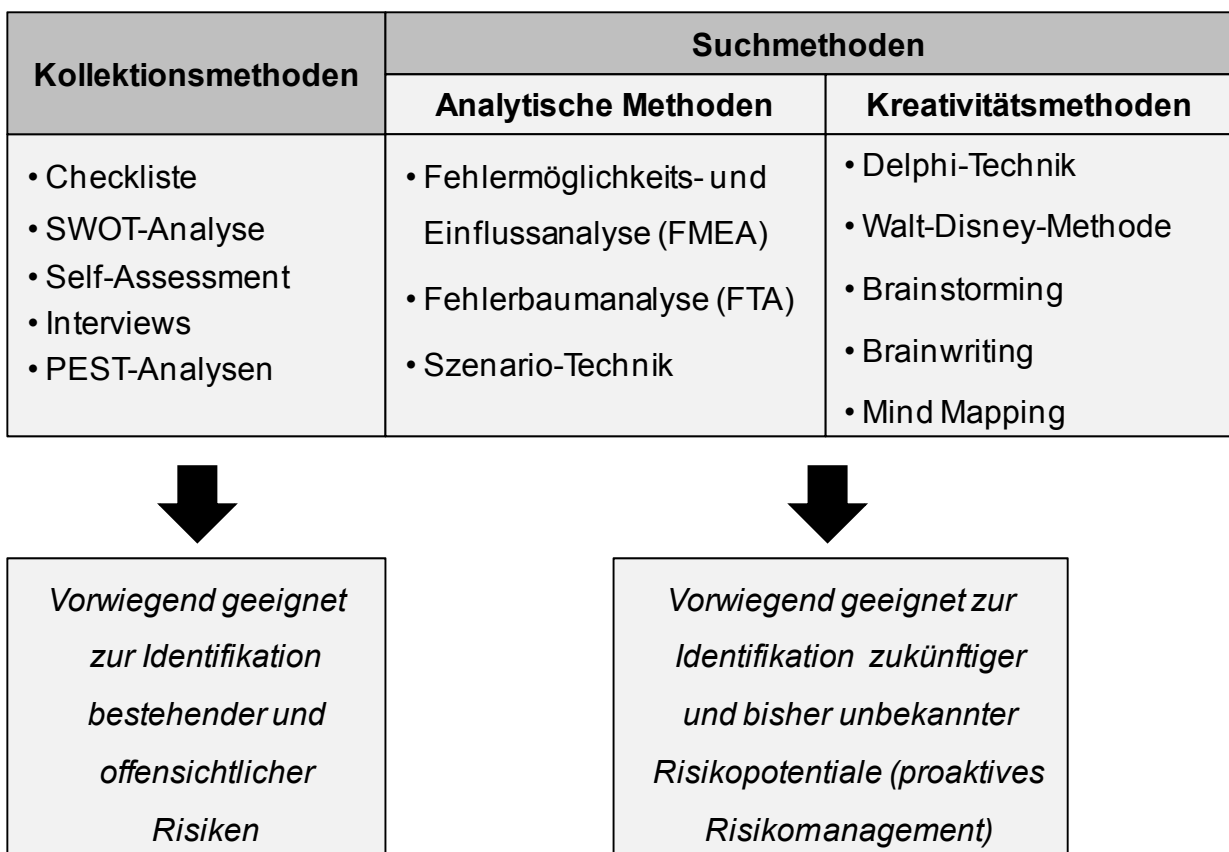


Abbildung 34: Methoden zur Risikoidentifikation, nach [136, S.174].

7.4.2 Risikobewertung und Risikoklassifizierung

Im Rahmen der Risikoanalyse werden nun die identifizierten Risiken hinsichtlich ihres Schadensausmaßes sowie ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit untersucht, bewertet und klassifiziert. Die gesamte Prozessphase der Risikobewertung basiert auf den Daten der zuvor erfolgten Risikoidentifikation und beinhaltet eine möglichst vollständige qualitative Beurteilung und quantitative Bewertung aller identifizierten Risiken [136, S.183]. Die Risikobewertungsphase hat das Ziel, ein Risikoportfolio zu erstellen, das wiederum die Grundlage für die darauf folgende Phase bildet. Insgesamt werden die Risikobewertungsmethoden in einer qualitativen und quantitativen Gruppe unterteilt. Sandoval hat in seiner Dissertation die wichtigsten Verfahren aufgelistet und hinsichtlich ihres Einsatzes für ein Risikomanagement für Bauprojekte analysiert. Dabei unterteilt er die Methoden nach ihrer Art der Komplexität, dem Bewertungsprinzip und ob es sich um qualitative oder quantitative Methoden handelt [147, S.63]. Die einzelnen Methoden sind in der Tabelle 11 dargestellt.

Typ	Komplexität	Bewertungsprinzip	Bewertungsmethode
Qualitative Methoden	Einfach	Graphisch/ Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pondering</i> • <i>Checklisten</i> • <i>Brainstorming</i> • <i>Historische Analyse</i> • <i>Interviews</i>
	Mittel	Graphisch/ Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> • <i>AIDA (Analysis of Interconnected Decision Areas)</i> • <i>SODA (Strategic Options Development and Analysis)</i> • <i>Strategic Choice Method</i> • <i>SSM (Soft Systems Methodology)</i>
Quantitative Methoden	Mittel	Indexorientiert	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Delphi-Methode</i> • <i>Key Indicator Methode</i> • <i>Risikopotentialmethode</i>
	Mittel	Nicht probabilistisch	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Sensibilitätsanalyse</i>
	Mittel-Hoch	Statistisch	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Volatility Method</i> • <i>Value at Risk</i> • <i>Quantitative Risiko Analyse</i>
	Mittel-Hoch	Stochastisch	<ul style="list-style-type: none"> • <i>PERT (Program Evaluation and Review Technique)</i> • <i>Monte-Carlo-Simulation</i> • <i>Latin Hyper-Cube Sampling</i> • <i>Probability Sensitivity Analysis</i>
	Hoch	Künstliche Intelligenz	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Neuronales Risiko Assessment System (NRAS)</i> • <i>Support Vector Machine</i>

Tabelle 11: Qual. und quantitative Risikomethoden, nach [147, S.63]

Die Wahl einer Risikobewertungsmethodik ist stark von der Projektphase abhängig. Eindeutig geht aus der Untersuchung von Rungger hervor, dass qualitative Verfahren für sehr frühe Projektphasen geeignet sind, da ein geringer Informationsbedarf notwendig ist. Problematisch dabei ist die anschließende Quantifizierung sowohl der Eintrittswahrscheinlichkeit als auch des Schadensausmaßes, da in der Planungsphase eines unterirdischen Inf-

rastrukturprojektes der Informationsstand aller beteiligten Projektgruppen relativ unsicher ist [139, S.39]. Im Vergleich zu Sandoval unterscheidet Sander die Methoden in qualitative, semiquantitative, semiquantitative, quantitativ-deterministische sowie quantitativ-probabilistische Methoden [146, S.26ff.]. Sander stellte fest, dass gerade bei qualitativ zu bewertenden Risiken große Abweichungen in den Bewertungen identischer Risiken eintreten, welches mit der subjektiven Wahrnehmung der Experten zusammenhängt. Ebenso besteht bei qualitativen Methoden keine einheitliche Basis, so dass Ergebnisse unterschiedlich interpretiert werden können. Quantitative Methoden hingegen bilden ihr Ergebnis in monetären Größen ab, womit Ergebnisse vergleichbar sind. Dieser Charakter ist für das Entscheidungsmodell immanent wichtig, da eine Prämisse die Transparenz des Entscheidungsprozesses darstellt.

Nach Sander stellen demnach quantitative Methoden ein ideales Hilfsmittel für das Controlling von Risiken dar, wobei deterministische Verfahren nur ein Szenario betrachten und Abweichungen schwieriger zu implementieren sind. Probabilistische Verfahren eignen sich deswegen, da mehrere Bandbreiten berücksichtigt werden können und geeignete Software frühzeitig einsetzbar ist sowie fortlaufend korrigiert werden können, so dass historische Daten oder aktuelle Ereignisse mit Hilfe zu wählender Wahrscheinlichkeitsverteilungen berücksichtigt werden [146, S.42].

In dieser Arbeit geht es um die Implementierung risikobehafteter monetärer Größen in das Entscheidungsmodell. Folglich werden für eine weitere Betrachtung sämtliche qualitativen Methoden nicht mehr betrachtet, die allenfalls zur anfänglichen Beschreibung und Gruppierung von Risiken herangezogen werden können. Eine quantitative Beschreibung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Risiken sowie deren monetären Schadensausmaße können mit Hilfe von probabilistischen Wahrscheinlichkeitsfunktionen erfolgen. Das Gesamtrisiko setzt sich aus vielen Risiken zusammen, welches im Falle eines unterirdischen Bauprojektes zumeist monetär ausgedrückt wird. Folglich sind auch alle Risiken vorher zu quantifizieren.

In Tabelle 12 sind die Verfahren nach Sander ausführlich dargestellt, aus welcher auch hervorgeht, dass quantitativ-probabilistische Verfahren universell einsetzbar sind, jedoch stochastisches und fundiertes Wissen notwendig ist. Da ein Entscheidungsprozess unter anderem Expertenwissen voraussetzt, sollte dies auch in einer Methode berücksichtigt werden. Schließlich muss eine Entscheidung klar verständlich und transparent sein, damit diese allen Ansprüchen genügen kann. Aus diesem Grund soll für das Entscheidungsmodell eine quantitativ-probabilistische Bewertungsmethode in Form der Monte-Carlo-Simulation (MCS) gewählt werden.

	Qualitativ	Semi-Qualitativ	Semi-Quantitativ	Quantitativ-deterministisch	Quantitativ-probabilistisch
Ergebnis	Kein Risikowert grobes Ranking	Grobes Ranking	Risikowert Ranking	Risikokosten Ranking	Kosten in Bandbreiten Ranking
Projektphase	Sehr früh	Früh	Früh	Fortgeschritten	Universell
Aufwand	Gering, schnell	Umständlich	Mittel, schnell	Mittel, schnell	Mittel, schnell
Anwendbarkeit	Sehr einfach	Relativ schwierig	Einfach	Einfach	Erfordert stochastische Grundkenntnisse
Software	Keine oder Tabellen- kalkulation	Tabellen- kalkulation	Tabellen- kalkulation	Tabellen- kalkulation	Spezifische Software z.B. @Risk
PRO	Schnell, einfach	Keine Werte möglich	Einfach, schnell	Gut verständlich	Große Aussagekraft Wahrscheinlich- keitsinformation bleibt erhalten
CONTRA	Ergebnisse nicht gut nutzbar	Ergebnisse schwierig zu verstehen	Sehr auf Experten- wissen ausgelegt	Keine Aussagen über Wahrschein- lichkeit	Stochastische und Software- Kenntnisse notwendig

Tabelle 12: Zusammenstellung verschiedener Risikobewertungsmethoden,
nach [146, S.42]

7.4.3 Risikobehandlung

Im Falle eines Risikoeintritts befasst sich der Schritt der Risikobehandlung mit der Prävention solcher Risiken. Darüber hinaus sollen Risiken mit Hilfe von Expertenwissen weiter verfolgt werden. Risiken müssen in einem solchen Fall erneut analysiert werden, da der Projekterfolg davon abhängig ist. Auf Grundlage von Methoden wie z.B. den Entscheidungsbäumen lassen sich Risiken nach Kosten, Nutzen und Erfolgswahrscheinlichkeiten bewerten, so dass eine Integration in den Entscheidungsprozess möglich ist. In dieser Phase schließt sich der Risikomanagementprozesszyklus, so dass eine erneute Untersuchung der Risiken erfolgen kann. Ein Entscheidungsbaum kann in dieser späten Phase ein Handlungs- bzw. Erfolgsszenario sein. Hierzu kann sich ein Entscheider für Risikobehandlungsmöglichkeiten wie eine Risikoversicherung, Risikoverminderung und Risikoakzeptanz entscheiden. Ein solcher Entscheidungsbaum kann durchaus bereits für klassische, immer wiederkehrende Situationen im Vorfeld angefertigt werden, so dass solche Situationen bereits in der Planungsphase erkannt und Risiken schnell analysiert und bewertet werden können. Im Zuge einer Risikobehandlung ist es folglich üblich, dass es zu Veränderungen der Rahmenbedingungen kommt und eine Planung erneut durchgeführt wird.

Durch die Nutzung eines transparenten Entscheidungsmodells hätte ein Planer die Möglichkeit, schnell auf solche Veränderungen zu reagieren, so dass nach einer erneuten Ri-

sikobetrachtung die Ergebnisse erneut in das Entscheidungsmodell integriert werden können.

7.5 Quantitative Risikoanalyse mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation

In den vorherigen Abschnitten wurde gezeigt, dass im Falle einer Entscheidung risikobehaftete monetäre Größen von wichtiger Bedeutung sind, welche jedoch mittels einer Methodik zunächst bewertet werden müssen. In solchen Fällen werden zumeist heuristische Verfahren wie Simulationen benötigt. Bei einer klassischen Simulation werden komplexe, technische oder wirtschaftliche Abläufe mit Hilfe eines Modells nachgebildet und anschließend analysiert und ausgewertet [220, S.336]. Gerade wenn keine analytischen Methoden vorhanden sind oder der Aufwand bei der Anwendung solcher Methoden zu hoch ist, können solche Simulationen eine Problemlösung darstellen [45, S.224f.]. Die Simulation gehört heute vor allem bei der Analyse stochastischer Problemstellungen zu den wichtigsten Teilgebieten eines funktionierenden Risikomanagements [58, S.223]. In der Literatur unterscheidet man zwischen deterministischer und stochastischer Simulation. Während die deterministische Simulation sich mit der Analyse und Lösung von Problemen beschäftigt und Inputdaten weitgehend bekannt sind, befasst sich eine stochastischen Simulation mit der Analyse von Ereignissen, die von zufälligen, unsicheren Einflüssen abhängen. Die stochastische Simulation stellt schließlich die Grundlagen für eine funktionierende MCS, welche in den nächsten Abschnitten ausführlich behandelt wird.

7.5.1 Ursprung der Monte-Carlo-Simulation

Erste Forschungen zum Thema Monte-Carlo-Simulation entstanden seit Mitte des 19. bei der Untersuchung von Problemen wie z.B. der näherungsweise Berechnung der Zahl π [86, S.1 und S.4] [97, S.2]. Die erste große wissenschaftliche Arbeit entstand durch die Autoren Metropolis und Ulam im Jahr 1949 [79, S.17]. Da die Methodik die Nutzung von Zufallszahlen benötigt, war eine computergestützte Rechentechnik unausweichlich, so dass die Simulation erst mit dem Entwickeln leistungsstarker Rechner einen regelrechten Boom erfuhr, da diese zur Durchführung komplexerer Simulationen notwendig waren [75, S.6-9]. Zahlreiche Autoren wie u.a. Isaksson [83], Meinen [111] und Cadez [35] haben die Monte-Carlo-Simulation für Problemstellungen im Zuge des Bauwesens eingesetzt, speziell hinsichtlich Kosten- und Terminuntersuchungen sowie der Erweiterung des Risikomanagementansatzes.

7.5.2 Funktionsweise der Monte-Carlo-Simulation

Die MCS ist dadurch gekennzeichnet, dass mit Hilfe von Zufallszahlen künstliche, zufällige Stichproben erzeugt und bestimmte Zusammenhänge simuliert werden [220, S.339]. Bevor jedoch eine Simulation durchgeführt werden kann, muss als erstes ein Modell für das zu lösende Problem aufgestellt werden. Anschließend wird eine statistische Auswertung

vollzogen [163, S.11]. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Einfachheit und Schnelligkeit im Vergleich zu anderen klassischen Methoden.

Ein Problem liegt jedoch in der Modellierung des zufälligen Modells, und zwar dann, wenn es auf empirischen Beobachtungen beruht. Ein weiteres Problem ist die Rechengenauigkeit. Sie wächst mit der Wurzel der Anzahl der Simulationen, d.h. wenn die Genauigkeit verzehnfacht werden soll, muss die Anzahl der Durchläufe ver Hundertfacht werden. So lassen sich mit der MCS u.a. Probleme deterministischer Natur (Berechnung von bestimmten Integralen, Lösung von Differential- und Integralgleichungen, usw.) lösen, wobei diese in stochastische Modelle überführt werden müssen. Probleme stochastischer Natur können bspw. Investitionsentscheidungen und Risikobewertung sein. Sie ist universell einsetzbar, da zu fast jedem Problem ein entsprechendes Modell aufgestellt werden kann. Um überhaupt Simulationen durchführen zu können, werden Zufallszahlen benötigt, die meist bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilungen entsprechen. An dieser Stelle soll zunächst beschrieben werden, was unter einer Zufallszahl zu verstehen ist.

Eine Zufallszahl ist das Ergebnis eines Zufallsexperiments und wird auch als Zufallsvariable meist X bezeichnet [78, S.224f.]. Die Werte, die eine Zufallsvariable annehmen können, heißen Realisationen bzw. Ausprägungen. Es wird unterschieden zwischen diskreten Zufallszahlen, d.h. Zahlen, die endlich oder abzählbar unendlich viele Ausprägungen, und stetigen Zufallszahlen, welche unendlich viele Ausprägungen innerhalb eines bestimmten Bereichs der reellen Zahlen aufweisen. Die unterschiedlichen Realisationen einer Zufallsvariablen werden mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsfunktion (Wahrscheinlichkeitsverteilung) der Zufallsvariablen X erfasst [45, S.229].

Mußhoff nennt zur Bestimmung eines Risikoprofils folgende Ablaufschritte der stochastischen MCS. Zu Beginn müssen die von Risiko behafteten Komponenten bzw. Zufallsvariablen eines Modells identifiziert werden. Darauf aufbauend sind die zu den Daten der Zufallsvariablen passenden parametrischen Verteilungen zu schätzen, so dass im Anschluss Zufallszahlen für jede Zufallsvariable im Modell gezogen werden muss (basierend auf die zuvor gefundenen Verteilungen). Die Berechnung der Zielgrößen des Modells kann daraufhin aus den Werten der Zufallsvariablen berechnet werden, wobei diese Schritte ca. 10.000 mal wiederholt werden müssen. Je höher die Simulationsdurchläufe sind, desto exakter wird die Zielgröße berechnet [118, S.365].

Die MCS ermöglicht die Integration von Verteilungen, die annähernd zu den beobachteten Werten passen. Der Unterschied zur historischen Simulation besteht darin, dass bei der MCS auch Verteilungsinformation von Expertenbefragungen implementiert werden können. Das Modell zur Abbildung einer Zielgröße (Kosten im Rahmen einer Kalkulation) kann durch die individuelle Wahl von Verteilungen an die Realität angepasst werden.

Die MCS bietet insgesamt einige Vorteile, welche kurz zusammengefasst werden. Die Wahrscheinlichkeitsergebnisse zeigen einem Anwender nicht nur Ausprägungen. Interes-

sant dabei sind die berechneten Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Ereignisse, welche für weitere Analysen genutzt werden. Hilfreich erweisen sich in diesem Zusammenhang die einfachen grafischen Ergebnisdarstellungen. Durch eine MCS lässt sich ermitteln, welche Variablen bzw. Attribute die größte Auswirkung auf die Ergebnisse haben, so dass eine MCS bei der Entscheidungsfindung helfen kann, da die Ergebnisse bestimmter Handlungsweisen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten berechnet werden können

In folgender Abbildung 35 ist die Vorgehensweise der MCS kurz dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass Daten, die einem Entscheider vorliegen, zunächst als Wahrscheinlichkeitsverteilungen dargestellt werden müssen. Dies geschieht mit Hilfe von z.B. Dreiecks-, Normal- oder auch Betafunktionen, die dann in die Simulation eingebunden werden. Mit Hilfe der bereits beschriebenen Zufallszahlen, ob ein Risiko eintritt oder nicht, werden die Endergebnisse in Form von Dichtefunktionen und kumulativen Kurven ermittelt. Wichtig erscheint jedoch die Tatsache, dass für eine Monte-Carlo-Analyse die Daten zum einen vorliegen müssen und zum anderen Expertenwissen vorhanden sein muss, um die Wahrscheinlichkeitsfunktionen zu Beginn der Simulation zu generieren.

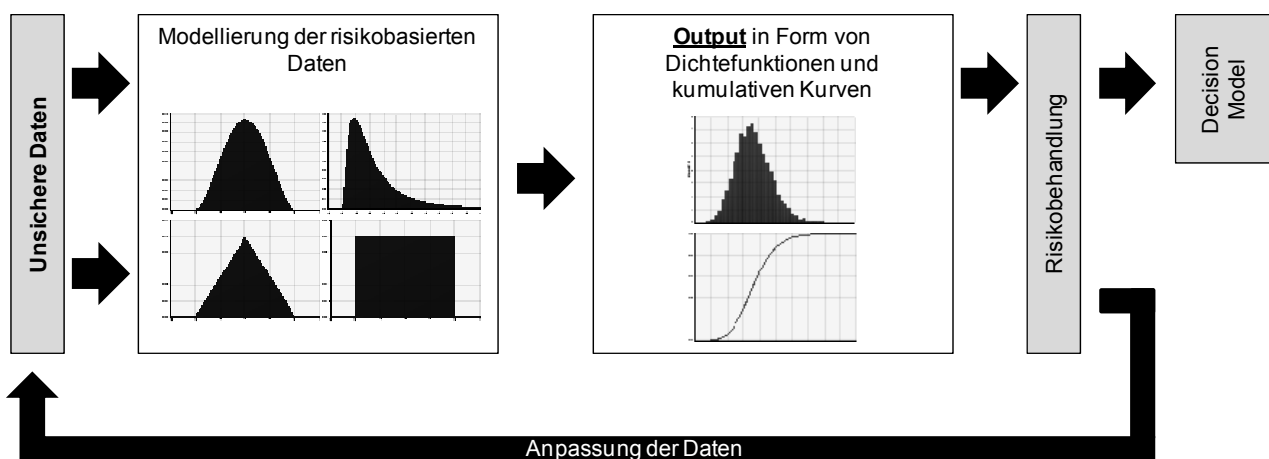


Abbildung 35: Vorgehen bei der Monte-Carlo-Analyse

7.5.3 Risikomodellierung

Sobald das Risiko quantitativ bestimmt wurde, d. h. die Resultate und Wahrscheinlichkeiten des Auftretens bestimmt wurden, kann das Risiko durch das Erstellen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zusammengefasst werden. Durch die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird das quantitative Risiko für eine Variable dargestellt. Dazu gibt es eine Reihe von Formen und Typen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die alle einen Bereich von möglichen Werten und die Wahrscheinlichkeit deren Auftretens beschreiben. Verteilungstypen verwenden Argumente, um einen Bereich von tatsächlichen Werten und die Verteilung von Wahrscheinlichkeiten anzugeben. Bei der Normalverteilung werden z. B. ein Mittelwert und eine Standardabweichung als Argumente verwendet. Der Mittelwert definiert den Wert, der als Mittelpunkt für die Glockenkurve dient, und die Standardabweichung

definiert den Wertebereich um den Mittelwert. Im Allgemeinen wird zwischen diskreten und stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen unterschieden. Bei diskreten Wahrscheinlichkeitsfunktionen spricht man dann von einer Wahrscheinlichkeitsfunktion, wenn man das Ergebnis eines Zufallsexperiments durch eine Zahl darstellen kann. Diese Zahl bezeichnet man als Zufallsvariable X . Eine diskrete Zufallsvariable kann nur bestimmte Werte x_1, x_2, \dots, x_n annehmen. Eine Wahrscheinlichkeitsfunktion ordnet jedem Wert x_i die Wahrscheinlichkeit zu, mit der dieser Wert angenommen wird. Bspw. ist dies der Fall bei dem Einsatz eines Würfels. Der Würfel kann dabei nur Zahlen zwischen 1 und 6 annehmen.

Eine stetige Zufallsvariable (Abbildung 36) nimmt in einem konkreten Bereich jeden beliebigen Wert an. Durch die Dichtefunktion $f(x)$ kann diese Zufallsvariable beschrieben werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass x zwischen a und b liegt, entspricht der Fläche unterhalb der Kurve, was mathematisch dem Integral $\int_a^b f(x)dx$ entspricht.

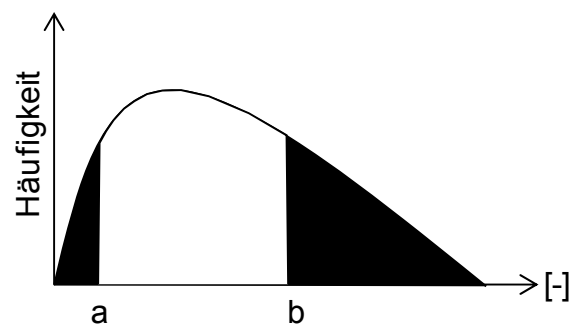


Abbildung 36: Stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung

Bei stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen spricht man grundsätzlich immer von einer Dichtefunktion (oder Wahrscheinlichkeitsdichte). Im Folgenden sollen die zwei wichtigsten Verteilungen kurz vorgestellt werden, die für das spätere Entscheidungsmodell benötigt werden.

7.5.3.1 Dreiecksverteilung

Eine Dreiecksverteilung (Abbildung 37) eignet sich besonders dann, wenn ein Entscheider Risiken schnell quantitativ abschätzen will. Sie wird angewendet, wenn ein Maximal- und Minimalschaden bekannt ist. Konkrete Angaben zum häufigsten Fall müssen dabei auch gemacht werden können, z.B. bei einem Maschinenschaden. Zur Bestimmung der Verteilung müssen zuvor der Minimalwert a , der wahrscheinlichste Wert b und der Maximalwert c bekannt sein. Dabei ist es nicht wichtig, ob die Dreiecksfunktion symmetrisch oder asymmetrisch dargestellt wird. Wichtig ist, ob der Verlauf auch das Risiko so darstellen kann, wie es der Entscheider aus seinen Daten ermitteln wollte. Ideal eignet sich eine solche Verteilung zur Grobmodellierung des Risikos, falls keine Ist-Daten zur Verfügung stehen, oder aber auch zur Modellierung von Expertenmeinungen.

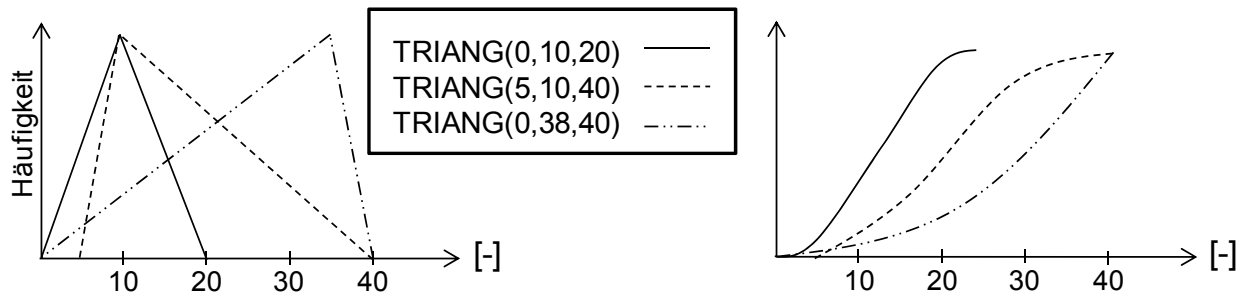


Abbildung 37: Dichtefunktion und kumulative Dreiecksverteilung

7.5.3.2 Beta-PERT-Verteilung

Die Beta-PERT-Verteilung hat ihren Namen von den in der Vergangenheit für die Projektplanung verwendeten PERT-Netzwerken. Die Beta-PERT-Verteilung ist ein Sonderfall der Beta-Verteilung und erfordert die gleichen drei Parameter wie bei einer Dreiecksverteilung (Minimalwert (a), wahrscheinlicher Wert (b) und Maximalwert (c)). Der Vorteil einer Beta-PERT-Verteilung liegt darin, dass diese bei der Risikoidentifikation im Rahmen von Expertengesprächen eingesetzt werden kann. Ein Experte kann auf diese Weise den maximal möglichen, den minimal möglichen und den wahrscheinlichsten Wert einer Zufallsgröße benennen. Gegenüber der Dreiecksverteilung ist die Beta-PERT-Verteilung deswegen von Vorteil, da eine Ähnlichkeit zu der Normalverteilung vorhanden ist. Die Normalverteilung ist im Allgemeinen dafür bekannt, dass viele kalkulatorische Prozesse gut abgebildet werden können [71, S.482]. Somit ist die Expertenschätzung besser zu modellieren als bei der klassischen Dreiecksverteilung. Als vorteilhaft sei auch die geringere Standardabweichung als bei der Dreiecksverteilung zu nennen, was ebenso zu einer präziseren Berücksichtigung der Expertenmeinung führt. Ein weiterer Vorteil ist in der Anpassung der Beta-PERT-Verteilung zu sehen. Sollte ein Experte mit der Verteilung nicht zufrieden sein, so kann die Verteilung im Nachgang verändert und angepasst werden. In folgender Abbildung 38 sind beispielhaft drei unterschiedliche Beta-PERT-Verteilungen dargestellt.

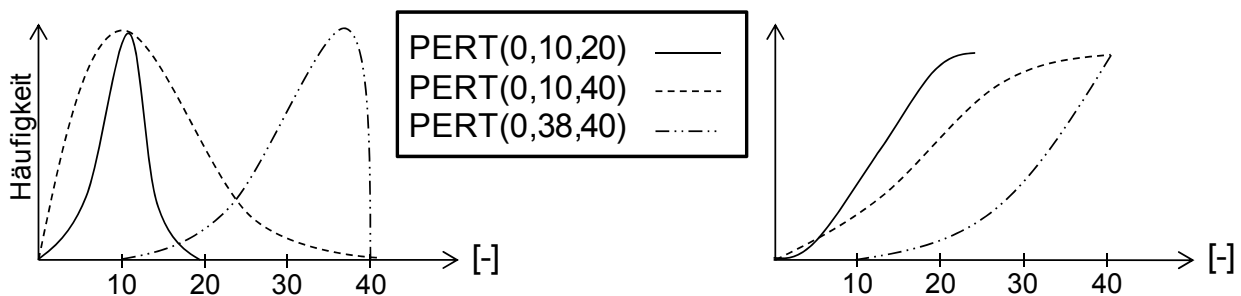


Abbildung 38: Dichtefunktionen und kumulative Beta-PERT-Verteilungen

7.5.4 Analysemöglichkeiten einer Monte-Carlo-Simulation

Mittels einer quantitativen Risikoanalyse ist es möglich, risikobehaftete Größen einer genaueren Untersuchung zu unterziehen. Eine sehr gängige Methode, um risikobehaftete Größen nach einer MCS zu untersuchen, stellt die Sensitivitätsanalyse dar. Eine Sensitivi-

tätsanalyse misst, wie groß ein Einfluss einer Inputvariablen auf das Output-Ergebnis haben wird. Bspw. kann eine unzureichend geplante Transportlogistik zu einer Überschreitung des Fertigstellungstermins führen, wobei der eigentliche Vortrieb termingerecht beendet werden könnte. Diese beiden risikobehafteten Größen haben unterschiedliche Einflüsse auf den Output. Spezielle Sensitivitätsanalysen innerhalb einer MCS können stark beeinflussende Risikofaktoren herausstellen, indem einzelne Parameter innerhalb des Risikomodells untersucht und verändert werden. Eine solche Analyse stellt schließlich den Einfluss einzelner Input-Größen auf das Endergebnis dar. Bspw. wird eine Input-Größe dahingehend variiert, indem ein pessimistischer, erwarteter und optimistischer Wert für das Risikomodell verwendet wird. Es lassen sich drei Ergebnisse ermitteln, so dass ein Entscheider insgesamt erkennen kann, ob und inwiefern sich die drei Ergebnisse unterscheiden.

Das Tornado-Diagramm (Abbildung 39) ist dabei sehr hilfreich, um solche risikobehafteten Größen hinsichtlich ihres Einflusses auf das Ergebnis mit Hilfe eines Software-Tools aufzuzeigen. Das Diagramm zeigt den Einfluss einer jeden Input-Größe in Form eines horizontalen Balkens. Die Länge des Balkens ist ein Maß für die Sensitivität der Eingangsgröße. Die Balken sind für alle Eingangsgrößen nach ihrer Länge sortiert, wobei die Balken absteigend gezeigt werden. Die Basis-Outputgröße ist dabei genau in der Mitte als vertikale Linie dargestellt. Die Länge eines Balkens zeigt für die einzelnen Eingabeverteilungen jeweils das Ausmaß der Änderung an, die durch eine Standardabweichungsänderung von +1 in der Eingabe entstanden ist. Wenn sich die Eingabe also um eine Standardabweichung von +1 ändert, wird sich die Ausgabe um den x-Achsen-Wert ändern, der der Länge des betreffenden Balkens entspricht. Auf diese Weise können Entscheider genau die Bereiche einer weiteren Risikoanalyse unterziehen, die im Tornado-Diagramm die längsten Balken aufweisen. Ein Ergebnis resultierend aus einer MCS kann gegenüber seinen Input-Daten dahingehend sensitiv sein, wenn eine minimale Veränderung der Input-Größe zu einer signifikanten Veränderung der Output-Größe führt. Im Prinzip ist es wichtig, dass Entscheider wissen müssen, welche Input-Größen sensitiv und welche Größen vernachlässigbar sind. Die Schlussfolgerung ist, dass Variablen mit geringer Schwankungsbreite (Balken, die sich im unteren Bereich des Diagramms befinden) unbedenklich sind und somit nur einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis haben. Variablen mit höherer Schwankungsbreite und dementsprechend höherem Einfluss müssen weiter überprüft und verifiziert werden. In Abbildung 39 ist beispielhaft ein solches Diagramm dargestellt. Das fiktive Beispiel sagt hierbei aus, dass eine Änderung des Stahlpreises um die Standardabweichung eine Verringerung, wohingegen eine Veränderung der Bodenmenge eine Erhöhung der Gesamtkalkulation zur Folge hat. Unabhängig davon, ist weiterhin zu erkennen, dass der Stahlpreis den größten Einfluss auf das Ergebnis hat, so dass diese Größe die mit dem größten Risiko behaftet ist und dementsprechend einer weiteren Analyse unterzogen werden könnte.

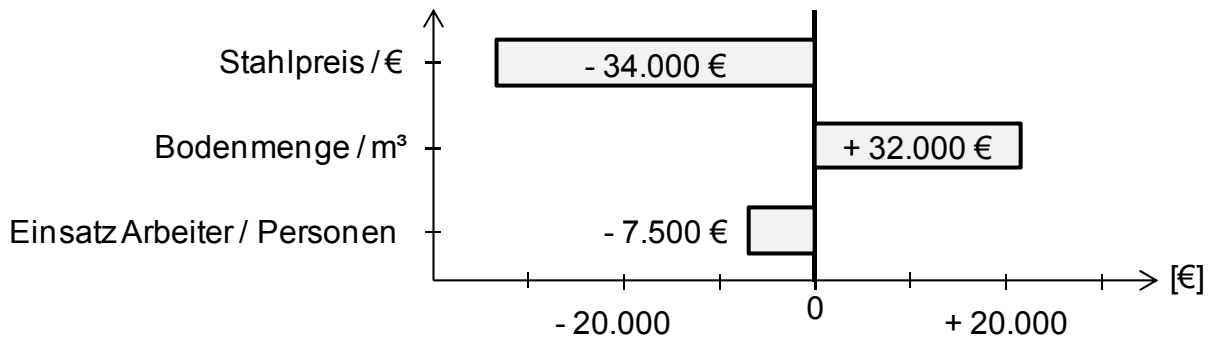


Abbildung 39: Beispiel eines Tornado-Diagramms

7.6 Kritische Würdigung der Monte-Carlo-Simulation

Die MCS ist ein Verfahren, welches für komplexe mathematische Fragestellungen hinsichtlich der Unsicherheitsbetrachtung konzipiert wurde. Ein großer Vorteil dieser Simulation liegt in dem leichten Verständnis, grundlegende statistische Zusammenhänge zu verstehen. Schwierig erweist sich die Nutzung von Daten, wobei diese heutzutage mit einer Simulation verbundenen Aufgaben durch leistungsfähige und einfach zu bedienende Softwareprogramme unterstützt werden, so dass eine Vielzahl an Informationen schnell und zuverlässig zu bearbeiten sind. Folglich nimmt die MCS einen immer höheren Stellenwert in der heutigen Risikobewertung ein. Insbesondere sind solche Simulationen verstärkt im Versicherungs- und Bankensektor zu finden, jedoch weitaus weniger im projektbezogenen Risikomanagement z.B. bei der Abwicklung von Bauprojekten, speziell von unterirdischer Infrastruktur. Gründe hierfür könnten in der analytisch-mathematischen Komplexität einer solchen Analyse liegen, die zum Beispiel im Zuge der Planungsphase unterirdischer Infrastruktur nur in geringem Maße von den beteiligten Personen verlangt wird, so dass eine solche Simulation eher nicht direkt durchgeführt und eventuell vernachlässigt wird, obwohl komplexere mathematische Beziehungen einfach modelliert werden können. Vorteilhaft erweist sich in diesem Fall auch das Modellverhalten, welches gerade in der Planungsphase sehr effizient analysiert werden kann, indem zuvor getroffene Annahmen ohne großen Aufwand geändert werden. Auf diese Art und Weise lassen sich neue Ergebnisse mit bereits ermittelten Ergebnissen gegenüberstellen. Ebenso ist bei einer MCS die Datengrundlage vor allem deswegen von immenser Bedeutung, weil Daten oftmals auf Schätzwerten beruhen. Es stellt sich die Frage, ob Schätzwerte korrekt ermittelt und durch Experten bestätigt wurden. Durch die vielen Schätzwerte können Ergebnisse berechnet werden, die dem Entscheider eine Genauigkeit suggerieren, die jedoch so nicht vorhanden sein könnte, insbesondere dann wenn die Eingabewerte nicht ausreichend genug geschätzt wurden. Eine intensive Auseinandersetzung mit der Dateneingabe bzw. mit der Aufstellung von Funktionen ist unbedingt zu forcieren. Insgesamt führt die Berücksichtigung der verschiedenen und vielfältigen Wahrscheinlichkeitsfunktionen dennoch zu einer umfassenden Einschätzung von Risiken und Unsicherheiten. Eine MCS kann bei ausführlicher Betrachtungsweise das Risikobewusstsein aller Projektbeteiligten schärfen und erhöhen, was sich natürlich positiv auf das Gesamtprojekt auswirkt. Ein weiterer Vorteil wird darin

gesehen, dass der Entscheider eine dem Problem angemessene Wahrscheinlichkeitsverteilung immer selbst definieren kann, vorausgesetzt Datengrundlagen und Expertenwissen reichen für die korrekte und nachvollziehbare Definition aus. Vorteilhaft für das Entscheidungsmodell ist die Tatsache, dass mit Hilfe der MCS keine singulären Werte sondern Wahrscheinlichkeitsverteilungen als Ergebnisse ermittelt werden, die eine vollkommen andere Aussagekraft hinsichtlich eines risikobehafteten Bauprojektes haben. Solche Verteilungen können die Prognosegenauigkeit von Kostenschätzungen erheblich verbessern, indem bspw. Szenarien klassifiziert werden können. Ein Entscheider hat die Möglichkeit zu erkennen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die vorher gemachte Kalkulation eintreten wird. Die Nutzung einer MCS führt insgesamt zu einer Professionalisierung des Risikomanagements, wobei anzumerken ist, dass Risikomanagement insgesamt konsequent angewendet und begleitet werden muss. Die Erhebung von Einschätzungen bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen stellt somit den wichtigsten Baustein zur Erfüllung eines funktionierenden Risikomanagements und schließlich zur Durchführung einer MCS dar. Es bietet sich an, Risiken zu Beginn zu sammeln, strukturieren und festzuhalten, so dass in einem zweiten Schritt Risiken charakterisiert und deren Gefahrenpotential aufgezeigt werden. Folglich sind nicht nur offensichtliche Risiken zu erwähnen, sondern vielmehr Risiken resultierend aus Erfahrungen von Expertenwissen, der Öffentlichkeit und anderen Gruppen, die Einfluss auf das Projekt haben könnten. Sind solche Informationen zusammengetragen und modelliert worden, lässt sich im Nachgang die MCS durchführen, deren Ergebnisse einer besonderen Interpretation bedürfen. Abschließend ist dennoch aufzuführen, dass ein risikobewusstes Verhalten der gesamten Projektgruppe von entscheidender Bedeutung ist, um ein funktionierendes und nachhaltiges Risikomanagement zu gewährleisten. Insgesamt gesehen hat sich die MCS in vielen anderen Bereichen als valide Methode bewährt, so dass eine hohe Akzeptanz gegeben ist.

8 Entwicklung eines Entscheidungsmodells für den Bau unterirdischer Infrastruktur basierend auf Unschärfen und Unsicherheiten

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die Grundlagen hinsichtlich der Wahl einer Entscheidungsmethodik sowie der Unschärfen und Unsicherheit vorgestellt wurden, werden in diesem Kapitel die erarbeiteten Theorien dahingehend genutzt, dass ein Entscheidungsmodell für unterirdische Infrastruktur erarbeitet wird.

8.1 Aufbau eines Entscheidungsmodells für unterirdische Infrastruktur

Das Entscheidungsmodell für unterirdische Infrastruktur (DEMUS - Decision Management for Underground Infrastructure) soll Entscheider in Form von Projektbeteiligten, Experten usw. helfen, im Zuge einer Projektuntersuchung das beste Bauverfahren für ein unterirdisches Infrastrukturprojekt zu ermitteln. Mit Hilfe des Modells soll es möglich sein, zum einen Informationen bzgl. des Projektes zu berücksichtigen und zum anderen den Entscheidungsprozess für die Projektbeteiligten transparent zu halten. In den vorherigen Abschnitten wurde gezeigt, dass eine Entscheidung, neben der Wahl des richtigen Entscheidungsverfahrens, auch von der Art der Bewertungsmethodik abhängig ist. Desweiteren konnte festgestellt werden, dass risikobehaftete und unscharfe Aspekte in ein Bewertungsmodell integriert werden sollten.

Die gesamte Entscheidung ist dabei als ein Prozess zu verstehen, so dass DEMUS dementsprechend auch als ein Prozess dargestellt werden muss. Zu klären ist, welche einzelnen Aspekte für DEMUS von Bedeutung sind. Schließlich sollte der genaue Zeitpunkt für den Start des gesamten Entscheidungsprozesses der Projektgruppe klar sein. In Anlehnung an [15, S.10f.] kann die Nutzung eines Betrachtungsfeldes von Vorteil sein, da sich so das Entscheidungsmodell besser in die einzelnen Planungsphasen integrieren lässt. Das Betrachtungsfeld zeigt eine strukturierte Übersicht über die Aspekte auf, die im Rahmen einer Entscheidung relevant sind. Das Betrachtungsfeld ist zunächst von konkreten Bewertungen unabhängig und besteht aus den einzelnen Aspekten wie den Betrachtungsstandpunkt, den Betrachtungsgegenstand, den Betrachtungszeitraum und den Betrachtungszeitpunkt.

Der Betrachtungsstandpunkt klärt auf, welche Projektgruppen im Entscheidungsprozess integriert sind. Das können der Bauherr, die Auftragnehmer, aber auch Teile der Öffentlichkeit und Politiker sein. Der Betrachtungsgegenstand beschreibt das zu untersuchende Objekt. Zur Ermittlung der besten Alternative sind jedoch Aspekte wie z.B. Bautechnik und Querschnitt von Bedeutung, so dass der Begriff Betrachtungsgegenstand etwas weiter gefasst werden sollte.

Der Betrachtungszeitpunkt klärt auf, wann das Entscheidungsmodell eingesetzt werden sollte. Im Betrachtungszeitraum wird der Frage nachgegangen, welche Zeitspanne für

das Modell sinnvoll ist. Auch wenn das Modell nur einmal für die Wahl einer Alternative benötigt wird. Dennoch sollten auch zukünftige Ereignisse in das Modell implementiert werden wie bspw. Folgekosten, die während der Betriebsphase eines unterirdischen Infrastrukturprojektes entstehen.

Unter Zuhilfenahme der bisher gemachten Erkenntnisse lassen sich für das Entscheidungsmodell der Betrachtungszeitraum und der Betrachtungszeitpunkt schnell festlegen. Da in der Planungsphase das Bauverfahren einer Maßnahme festgelegt wird, sollte der Betrachtungszeitpunkt auch in diese Phase zeitlich eingebunden werden. Insbesondere sollte zwischen den Phasen der Entwurfs- und Genehmigungsphase die Wahl des Bauverfahrens getroffen werden, so dass DEMUS in diesen Phasen seinen Einsatz findet. Der Betrachtungszeitraum hingegen umfasst dabei fast sämtliche Lebenszyklus- sowie HOAI-Phasen, wobei eine eventuelle Umnutzungs- oder Abbruchphase ohnehin nicht betrachtet wird. Für die Bewertung bedeutet der Zeitraum lediglich, dass Unsicherheiten sowie Unschärfen, die die späteren Phasen betreffen, unbedingt in die Evaluation berücksichtigt werden sollten. Wie bereits in Kapitel 7 beschrieben, geht es dabei in erster Linie um wirtschaftliche Risiken, die im Vorfeld abgebildet werden müssen.

Im Zuge dieser Bewertung ist auch die Frage hinsichtlich des Betrachtungsstandpunktes zu klären. Da eine der Prämissen darin besteht, eine transparente und ganzheitliche Bewertung zu gewährleisten, sollten die am Bau beteiligte Projektgruppen ihre Einwände bzgl. des Projektes zum Ausdruck bringen können. Zwar führt die Bewertung in erster Linie der zu beauftragende Projektmanager durch, jedoch sind die Ergebnisse aller Projektbeteiligten in das Modell einzubeziehen, um die unterschiedlichen Entscheiderperspektiven zu berücksichtigen.

Der Betrachtungsgegenstand stellt schließlich das für das individuelle Projekt beste Bauverfahren dar. Im Prinzip ist der Betrachtungsgegenstand die Menge aller möglichen Alternativen, die jedoch wiederum Einfluss auf weitere Aspekte haben wie z.B. auf den Querschnitt, die Sicherheitskonzepte, die Ausstattung, die Kosten etc. Zusammenfassen lässt sich das Betrachtungsfeld bildlich wie folgt (Abbildung 40):

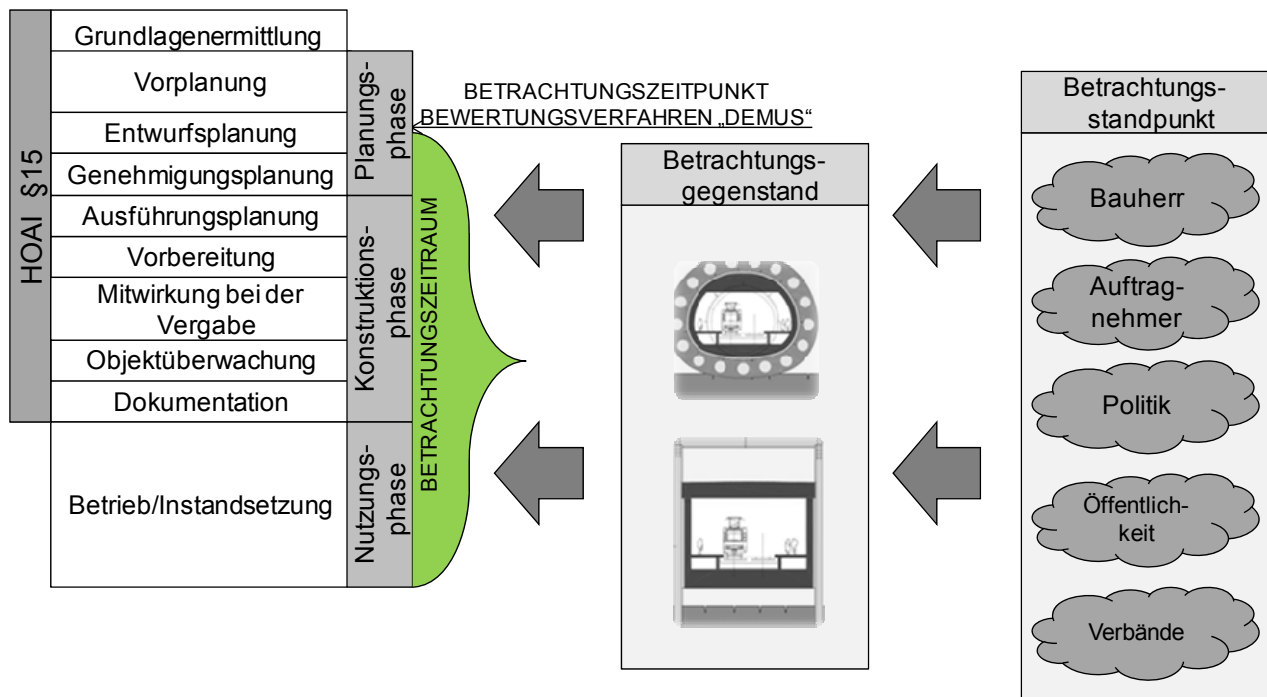


Abbildung 40: Betrachtungsfeld DEMUS

Das Entscheidungsmodell soll den Vorteil haben, Unschärfen und Risikoanalysen in die Bewertung mit einzubeziehen. Hierzu werden nicht nur klassische Kostenkalkulationen sondern auch Ereignisse betrachtet, die erst in einer späteren Lebenszyklusphase eintreten können. Die in der Planung von unterirdischer Infrastruktur berücksichtigten Risiken sind demnach nicht nur bauliche Maßnahmen, sondern sollen auch Aspekte wie Betriebs-, Instandhaltungs- und Wartungskosten beinhalten. Dazu kommen noch weitere unsichere Faktoren wie bspw. finanzielle Risiken resultierend aus Zinsen am Kapitalmarkt oder Materialpreisschwankungen. Vorab kalkulierte Baukosten wie bspw. Ausbruch, Baustelleneinrichtung, Personalkosten usw. können durch Risiken organisatorischer oder auch technischer Natur ergänzt werden. Die im Vorfeld durchgeführte Risikoanalyse stellt jedoch nur eine wichtige Säule im Entscheidungsmodell dar. Solche risiko-relevanten Größen können z.B. in verschiedene Kriterien (z.B. Lebenszykluskosten) berücksichtigt und in das Modell integriert werden.

Das Modell kann darüber hinaus Kriterien beinhalten, die nicht nur monetär ausgedrückt werden. Dazu gehören bspw. qualitative Aussagen über bestimmte Sachverhalte, ob z.B. ein Bauverfahren einen höheren Einfluss auf die Umwelt hat oder nicht. Solche Aspekte lassen sich qualitativ oder unter Berücksichtigung nunmehr unscharfer Größen in das Modell integrieren. Das Gesamtprojektergebnis ergibt sich aus der Aggregation der einzelnen Kriterien, die teilweise sämtliche Projektrisiken von Ereignissen beinhalten.

Das Entscheidungsmodell ist in mehrere Phasen unterteilt. DEMUS umfasst drei Phasen (Projektanalyse, Datentypanalyse, Software DEMUS², wobei der Exponent „2“ für die Kennzeichnung des Software-Tools dienen soll), welche die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Methoden berücksichtigen und hier erstmals zusammengeführt werden. In Abbildung 41 ist der Aufbau von DEMUS dargestellt, wobei die Phase der Datentypa-

lyse nochmals in drei Bereiche (Fuzzy, Risiko sowie ein Sonderfall) unterteilt ist. Eine Erklärung der einzelnen Phasen findet in den nächsten Abschnitten statt.

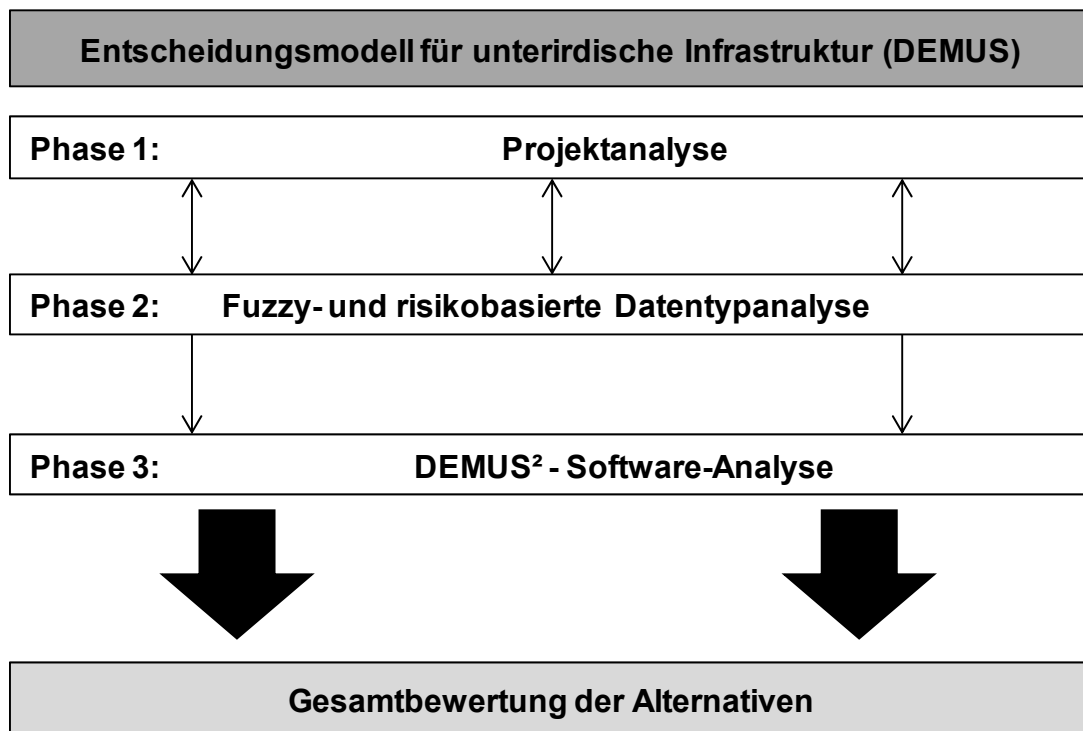


Abbildung 41: Aufbau des Entscheidungsmodells für unterirdische Infrastruktur

8.2 Phase 1: Projektanalyse

Die erste Phase beinhaltet die grundlegenden Arbeiten für das Entscheidungsmodell. In Anlehnung an die gewählte Entscheidungsmethodik (AHP) ist die Projektanalyse dementsprechend durchzuführen. Vereinfachend lässt sich das wie folgt zusammenfassen: Im Zuge der Vorplanung muss zunächst das Ziel der Entscheidung klar ausformuliert sein, was bedeutet, dass die Wünsche bzw. die Anliegen der Projektbeteiligten eindeutig definiert werden müssen. Neben der Zielvorgabe, die sich bspw. in einer Minimierung von Kosten oder einer kurzen Bauzeit darstellen lässt, sind weitere Subziele zu definieren. Grundsätzlich sind Subziele dafür geeignet, dass das Hauptziel effektiver erreicht wird. Gerade in dieser Phase können Aspekte wie eine Lebenszyklusbetrachtung sehr gut integriert werden. Unter Nennung der möglichen Alternativen werden weitere Kriterien aufgezeigt, die das Projekt beschreiben sollen. Wichtig ist hierbei die Ordnung der Kriterien. Zudem stellen sich Fragen hinsichtlich des einzelnen Kriterienranges. Dabei sei zu beachten, dass Kriterien bzw. Kriterienhierarchien in Abstimmung mit den Projektpartnern in Rahmen von z.B. Workshops erarbeitet werden, um anschließend eine Kriterienhierarchie zu generieren und die zweite Phase zu beginnen. In Abbildung 42 ist der Ablauf der Projektanalyse dargestellt.

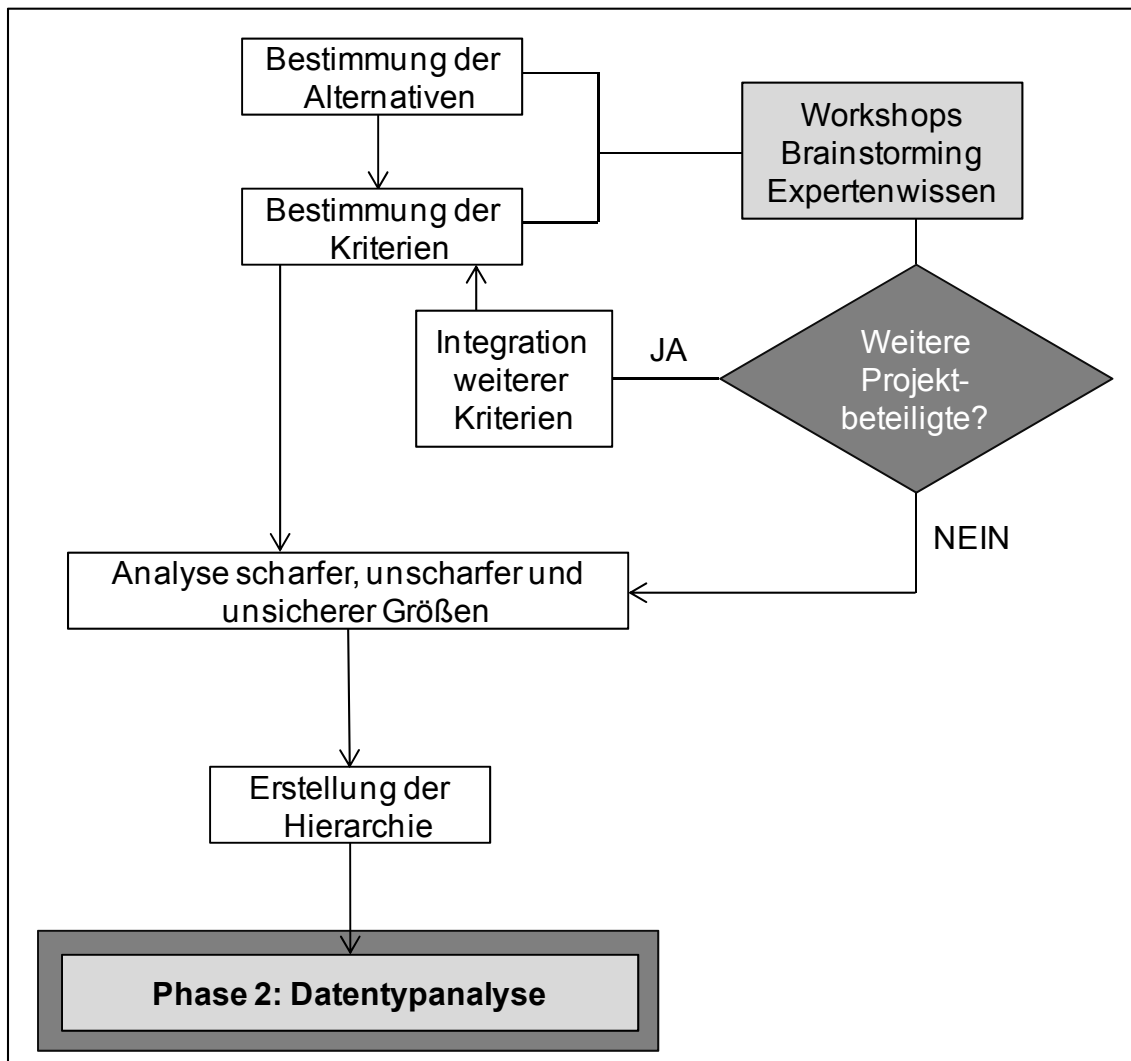


Abbildung 42: Ablauf der Projektanalyse (Phase 1)

Das Entscheidungsmodell soll in erster Linie die Planungsphase unterstützen, wobei die am Planungsprozess beteiligten Gruppen an der Durchführung des Entscheidungsprozesses partizipieren sollen. Mit Hilfe des AHP ist es möglich, die Entscheidung zunächst hierarchisch aufzubauen. Mögliche Alternativen für das beste Bauverfahren werden ebenso diskutiert und berücksichtigt. Unter Zuhilfenahme der stochastischen Risikomeethoden sowie der unscharfen Fuzzy-Theorie kann der Entscheidungsprozess transparent, nachvollziehbar und exakter ausgelegt werden als mit der alleinigen Nutzung des AHP. Insbesondere werden durch die erste Phase Fragen hinsichtlich der systematischen Identifikation der Haupt- und Subkriterien beantwortet. Dazu sind die Kriterien in graphischer Form hierarchisch anzuordnen. Auf diese Weise ist es möglich, die Kriterien paarweise zu vergleichen und ein Ranking innerhalb der Kriteriengruppen zu erhalten. Ebenso sind nach der Identifikation der Kriterien die Ziele hinsichtlich der Alternativen zu klären, indem bspw. Massen, Zeitangaben, physikalische und monetäre Größen benannt werden. Folglich lassen sich durch die umfangreiche Sammlung an Informationen Kriterien und Alternativen kontrollieren und bewerten. Im Zuge der Bewertung ist es möglich, quantitative Risikoanalysen durchzuführen, deren Ergebnisse sich ebenfalls als quantita-

tive Größen in das Modell integrieren lassen. Insgesamt gesehen sollte die hohe Dichte an Informationen zu einer ausreichenden Projektuntersuchung führen. Da der AHP einen prozessartigen Charakter aufweist, können nicht beachtete Kriterien nachträglich in den Entscheidungsprozess implementiert werden, so dass die Entscheidung erneut durchgeführt werden kann.

Mit Hilfe der qualitativen Bewertungsskala und der klassischen quantitativen AHP-Berechnung ist es selbst zu einem späteren Zeitpunkt möglich, das Entscheidungsverhalten einzelner Projektbeteiligter zu verändern. Auf diese Art kann der Entscheidungsprozess dynamisch gestaltet werden, so dass der Entscheidungsprozess zu jederzeit den vorliegenden Anforderungen angepasst wird. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten des gewählten Entscheidungsverfahrens ist eine stetige Kommunikation innerhalb der Entscheidergruppen durchaus möglich. Das gemeinsame Analysieren und Bewerten einer Entscheidung fördert die gewünschte Transparenz.

8.2.1 Projektplanung

Im Zuge der Projektplanung sind zunächst allgemeine organisatorische Aufgaben zu klären. Hierbei ist die genaue Beschreibung des Entscheidungsziels sehr wichtig. Dazu müssen zu Beginn Attribute wie bspw. erste Kostenaufstellungen, Bedeutsamkeit einzelner Kriterien, Projektbeschreibungen etc. zusammengestellt werden. Ziel ist es, die Entscheider zu unterstützen, um im weiteren Schritt Kriterien sowie Alternativen zu entwickeln. In der Projektplanungsphase müssen zudem die verschiedenen Perspektiven einzelner Entscheider herausgearbeitet werden. Fragen hinsichtlich der Konstellation solcher Gruppen müssen beantwortet werden, zumal jede Gruppe unterschiedliche Interessen bzgl. der Wahl eines Bauverfahrens hat. Sind die einzelnen Projektgruppen bekannt, können die einzelnen Ziele und Vorstellungen der Projektbeteiligten zusammengetragen werden. Zusätzlich kann jede Projektgruppe Experten hinzuziehen, die in dieser Phase bereits benannt werden können. Mit Hilfe der Experten und den einzelnen Projektgruppen lässt sich das weitere Vorgehen durch die Hinzunahme von Sub-Zielen konkretisieren.

Mit Einsatz der Experten sowie einzelnen Projektgruppen lassen sich erste Daten bzgl. des Bauprojektes zusammenstellen. Betrachtet man die bereits vorgestellten Planungsphasen für unterirdische Infrastrukturprojekte, so lassen sich erste Ergebnisse aus Gutachten wie z.B. aus einer Umweltverträglichkeitsstudie integrieren. Darüber hinaus werden Datenbanken aus bereits abgeschlossenen Projekten zusammengestellt, die für eine weitere Risikoanalyse herangezogen werden. Selbst zu späteren Zeitpunkten können quantitative aber auch qualitative Daten und Einschätzungen in Abhängigkeit mit den Projektgruppen in diese Phase integriert werden.

Einen besonderen Stellenwert erfährt in dieser Phase die organisatorische Struktur der unterschiedlichen Projektgruppen und Experten. Für eine effektive Entscheidung sind

Flussdiagramme mit einzelnen Aktivitäten der verschiedenen Gruppen zu erstellen. Es müssen Fragen hinsichtlich der Bedeutsamkeit, des Einflusses auf das Projekt, der Beziehungen zueinander usw. geklärt sein, damit bei Bewertungen die Eigenschaften der Beteiligten berücksichtigt werden.

Schließlich können die Projektbeteiligten untereinander mit der Ermittlung der entscheidungsrelevanten Kriterien beginnen, wobei zunächst grundsätzlich sämtliche Kriterien hergeleitet werden (bspw. in Form eines Brainstormings). Zusätzlich ist darauf zu achten, dass durchaus KO-Kriterien existieren können, die eindeutig gekennzeichnet werden müssen. KO-Kriterien können für die Wahl eines Bauverfahrens ausschlaggebend sein, so dass zu klären ist, ob KO-Kriterien mit berücksichtigt oder aus dem Entscheidungsmodell herausgelöst und separat betrachtet werden. Ein KO-Kriterium könnte zum Beispiel eine bereits im Vorfeld festgelegt Kostenbarriere sein, die zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf.

8.2.2 Kriterienentwicklung

Nach Abschluss der Projektplanung sind erste Kriterien bekannt und zusammengetragen worden, so dass in einem nächsten Schritt die Kriterien unter Berücksichtigung der verschiedenen Entscheiderperspektiven weiter ausgearbeitet werden. Hierzu sind verschiedene Techniken und Methoden möglich. Wichtig ist, dass nicht nur klassische Methoden, wie das Brainstorming genutzt werden sollten, sondern auch auf Datenbanken bestehender Projekte sowie Informationen aus Gutachten zurückgegriffen werden.

Eine der systematischen Herangehensweisen ist die Nutzung bereits existierender Checklisten, welche z.B. auf Erfahrungswerten anderer Projekte beruhen und durchaus die Risiken strukturiert aufzeigen [1, S.67]. Auf diese Weise können anhand der Unterlagen des jeweiligen Projektes Kriterien und somit Risiken ausfindig gemacht oder durch vorliegende Dokumente aus bereits durchgeführten Projekten Vergleiche gezogen werden [1, S.67].

Expertenbefragungen stellen ebenfalls eine wichtige Grundlage für die Kriterienentwicklung dar. Dabei können Experten interne oder externe Fachleute sein, die mit Hilfe von Fragebögen, Checklisten oder in Interviews befragt werden. Der Dialog bei der persönlichen Befragung kann dazu führen, dass weitaus mehr Kriterien und durchaus Risiken durch den Gedankenaustausch von Interviewer und Befragten identifiziert werden [1, S.155].

Zu den systematischen Methoden können zudem kreative Methoden, die meist in Gruppen durchgeführt werden, bei der Kriterien- und Risikoidentifikation zum Einsatz kommen. Dazu zählt das Brainstorming, welches als strukturierte Kreativitätstechnik in einer Gruppe aus Personen unterschiedlicher Fachgebiete angewendet werden kann [1, S.145]. Beim Brainstorming werden dann Ideen und Gedanken gesammelt und sichtbar

für alle protokolliert. Nach einer festgelegten Zeit für die Ideensammlung, können die Ergebnisse innerhalb der Gruppe diskutiert werden [156, S.19].

Beim Brainwriting [207, S 46] handelt es sich um eine abgewandelte Form des Brainstormings, bei der die Ideen einzeln schriftlich festgehalten werden und anschließend gesammelt werden. Es existieren verschiedene Techniken. Eine Technik sieht das schriftliche Sammeln der Gedanken der Teilnehmer vor. Die schriftlichen Ausführungen werden weitergereicht, so dass jeder Teilnehmer der Gruppe seine Ergänzungen hinzufügen kann. Im Gegensatz zum Weiterleiten der Unterlagen können Karten ebenfalls in die Tischmitte gelegt werden, um von dort aus von anderen Teilnehmern aufgegriffen zu werden. Der Unterschied der zweiten Techniken liegt in der Bewahrung der Anonymität des Schreibers. Das Mind-Mapping stellt eine weitere Technik des Brainwritings dar. Bei der Anwendung des Mind-Mappings werden Ideen zu einem Problem innerhalb einer Gruppe oder durch eine Einzelperson auf einer Oberfläche gesammelt. Sie werden logisch verknüpft, mit Zahlen oder mit Farben markiert. Das Ergebnis ist eine Darstellung aus Verästelungen um das ins Zentrum gelegte Ausgangsproblem und zeigt so die Wichtigkeiten und Zugehörigkeiten der einzelnen Gedanken untereinander [1, S.150].

Insgesamt können die vorgestellten Methoden zu einer klaren und systematischen Kriterienentwicklung führen, die für den Entscheidungsprozess von elementarer Bedeutung sind. Es werden nicht nur Kriterien entwickelt, sondern risikobehaftete Größen und Datenbanken können ebenso erarbeitet und berücksichtigt werden.

8.2.3 Analyse unscharfer und risikobasierter Größen

Der Bewertungsprozess ist in dieser Arbeit in zwei Teile gegliedert. Die Projektgruppen müssen in einem ersten Schritt die Kriterien paarweise gewichten. Die Bewertung der Kriterien wird unter Nutzung der 9-Punkte-Bewertungsskala durchgeführt. In dem zweiten Schritt werden die Kriterien hinsichtlich der Alternativen bewertet (qualitativ und/oder quantitativ).

Bevor eine Bewertung durchgeführt wird, ist zu klären, in welcher Form die Informationen bzgl. der Kriterien und Alternativen vorliegen. Im Zuge der Kriterienbewertung kann erstmals untersucht werden, ob die Bewertungen scharf oder unscharf durchgeführt werden müssen. Dazu sind die Kriterien zu bestimmen, die evtl. nicht exakt vorliegen bzw. nicht exakt den Präferenzen des Entscheiders entsprechen.

Ähnlich verläuft auch die Bewertung der Alternativen. Es ist zu prüfen, welche der Kriterien exakt vorliegen, welche Kriterien unscharf (Mangel an Informationen) und welche Kriterien risikobehaftet sind. Folglich werden die verschiedenen Ziele und Erwartungen kombiniert, so dass eine ganzheitliche und exakte Bewertung vorgenommen wird (Abbildung 43).

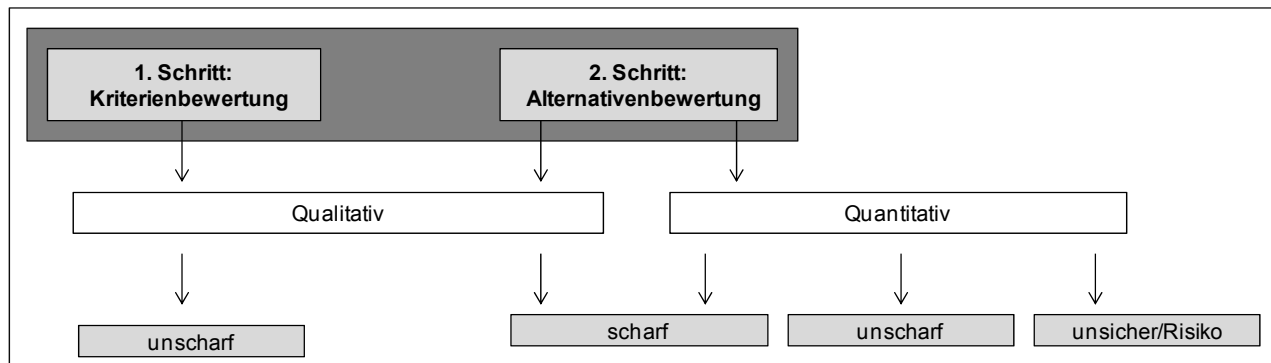


Abbildung 43: Gruppierung der einzelnen qualitativen und quantitativen Kriterien

Im nächsten Schritt ist zu klären, auf welche Art und Weise die quantitative Bewertung ausgeführt wird. Nachdem Kriterien gemäß Abbildung 44 aufgeteilt und gruppiert wurden, sind die Kriterien zu analysieren. Zu unterscheiden ist zwischen den risikobasierten, risikounabhängigen, unscharfen sowie scharfen Kriterien. Viele dieser Kriterien wurden bereits in den vorherigen Prozessen ermittelt und beschrieben, so dass in diesem Schritt sämtliche Kriterien nochmals genauer untersucht und abgeglichen werden müssen.

Insbesondere stellt die Analyse unscharfer und unsicherer Kriterien einen wichtigen Prozess dar. Dazu existieren unterschiedliche risikoanalytische sowie fuzzybasierte Methoden zur Verfügung, die in genau dieser Phase eingesetzt werden sollen. Diese Methoden können mit Hilfe des hier vorgestellten Entscheidungsmodells kombiniert werden, so dass diese Ergebnisse ohne weiteres in die Bewertung implementiert werden. Folglich sind sämtliche Analysen hinsichtlich der Kriterien und Alternativen durchzuführen, so dass eine ganzheitliche Bewertung vollzogen werden kann. Zu beachten ist, dass in diesem Schritt die Kriterien und Alternativen lediglich in Gruppen zu ordnen sind. Eine genaue Analyse erfolgt erst in den weiteren Phasen.

8.2.4 Aufbau der Bewertungshierarchie

Die Bewertungshierarchie wird in Anlehnung an den AHP erstellt. Dabei sollte im Idealfall die Hierarchie in Workshops gemeinsam mit allen Projektbeteiligten erarbeitet werden. Grundsätzlich ändern sich für viele Bauprojekte die Kriterien nicht in großem Maße, so dass zumindest die Hauptkriterien stets benannt werden können. Die klassischen Hauptkriterien sind die ökonomischen, technischen, ökologischen sowie sozio-kulturellen Kriterien. Die Hauptkriterien können je nach Projekt in weitere Unterkriterien unterteilt werden, wobei auch hier gilt, dass ein Großteil der Unterkriterien auch für viele weitere Bauprojekte genutzt werden können. Eine weitere Unterteilung in eine dritte Ebene ist für die folgende Ausarbeitung ebenfalls vorgesehen.

Wie bereits angesprochen, stellen diese Kriterien nicht die endgültige Lösung dar, sondern sollen dem Entscheider als eine erste Hilfestellung dienen. Im Einzelfall müssen Kriterien eventuell entfernt oder gar neue hinzugefügt werden. Daher wird eine gültige

Grundhierarchie erstellt, die für diese Arbeit zur Verfügung steht und dynamisch variiert werden kann. Zusätzlich ist diese Hierarchie durch Projektbeteiligte beeinflussbar. Das bedeutet, dass jeder Projektbeteiligte auf seine individuellen Anforderungen reagieren und handeln kann. Die Kriterien wurden bereits im Zuge des Forschungsprojektes ‚Analyse zur ökologischen und ökonomischen Bewertung offener und geschlossener Bauverfahren zur Herstellung unterirdischer Infrastrukturmaßnahmen (Verkehrstunnel, Ver- und Entsorgungsleitungen) – Phase II‘ erarbeitet, welches in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb und der GSTT Beratungsservice GmbH bearbeitet wurde [179]. In Abbildung 44 ist die Gesamthierarchie dargestellt, die im weiteren Verlauf erklärt wird. Die einzelnen Kriterien werden kurz aufgeführt und in Grundzügen erklärt.

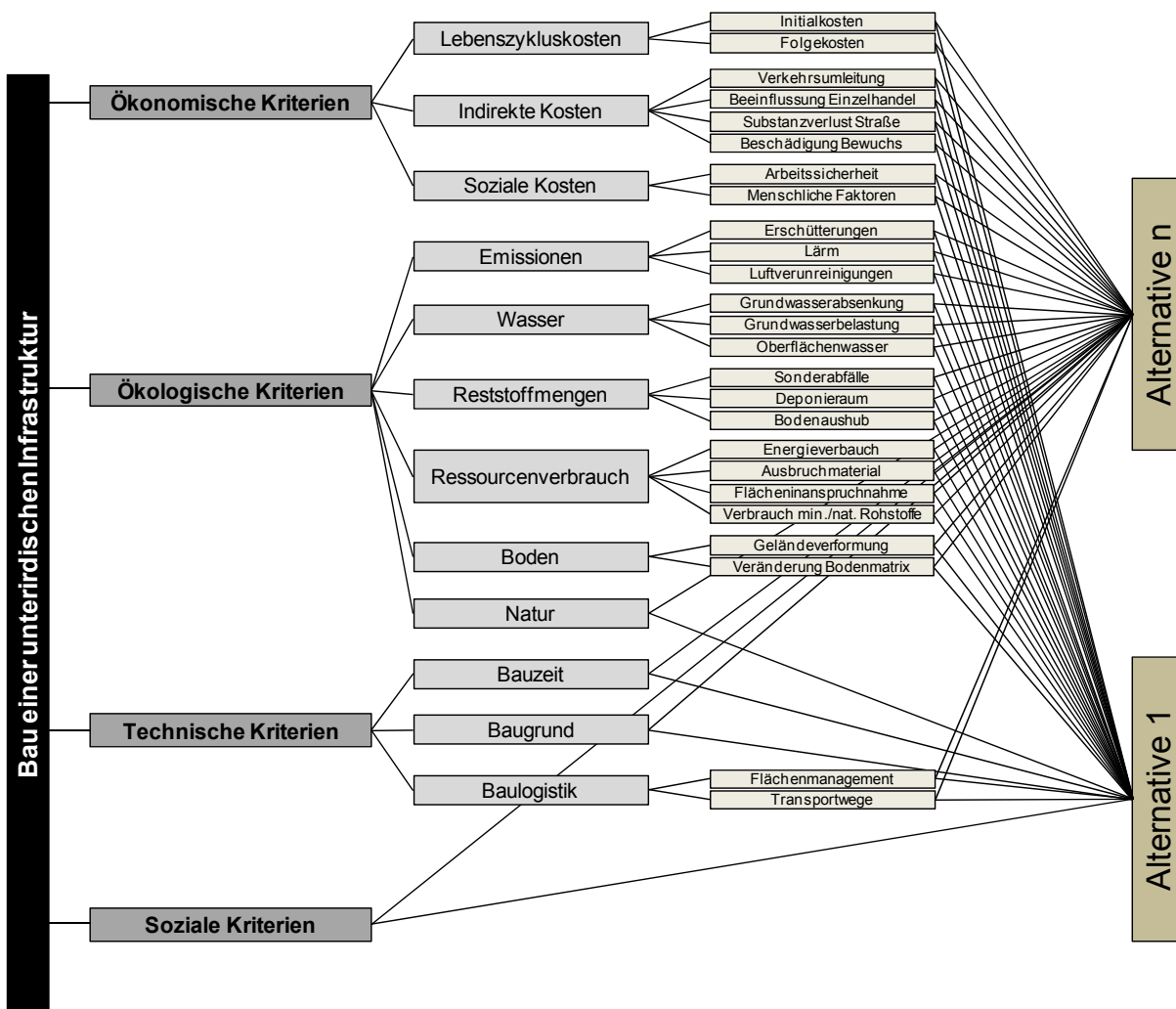


Abbildung 44: Klassische Hierarchie für den Bau unterirdischer Infrastruktur, nach [179]

8.2.4.1 Ökonomische Kriterien

Bei der wirtschaftlichen Vorausplanung für die Erstellung eines Bauwerkes müssen neben den klassischen Initialkosten und den indirekte Kosten die sogenannten Folgekosten mit berücksichtigt werden. Hierbei handelt es sich um weitere Ausgaben, die durch die Nutzung, Instandsetzung und bei einem eventuellen Abriss des Gebäudes anfallen. Das

Kriterium `Ökonomie` wird zur Berücksichtigung aller Kosten in eine zweite Ebene unterteilt, die die *Lebenszykluskosten (LCC; oder auch Life Cycle Costs* genannt), *indirekte Kosten* und *soziale Kosten* beinhalten.

Lebenszykluskosten (LCC)

Die LCC umfassen die gesamten Kosten von der Planung, über den Aufbau bis zum Abriss des Bauwerkes. Jene Kosten können für das Vorhaben als fester Bestandteil mit einkalkuliert werden. Die LCC untergliedern sich in eine dritte Ebene des `Ökonomischen Kriteriums`, in die sogenannten *Initialkosten* und *Folgekosten*.

Unter den *Initialkosten* fallen jene Kosten an, die zu Beginn eines unterirdischen Bauvorhabens grundsätzlich ermittelt werden können (Kalkulation der Baukosten). Unter Folgekosten werden alle weiteren Kosten berücksichtigt, die für den Betrieb und für die Unterhaltung des Bauwerkes anfallen. Für jene Kriterien können die Ergebnisse der Untersuchung von Vogt herangezogen und für eine weiterführende Bewertung in das Entscheidungsmodell integriert werden [197].

Indirekte Kosten

Die indirekten Kosten umfassen Kosten des Bauwerkes, die nicht direkt am Bau beteiligte Gruppen betreffen. Hierbei handelt es sich zum Beispiel um die Verkehrsumleitung und –sicherung, den Verlust von anliegenden Geschäften, Lärm- und Schadstoffemission (die öffentliche Gesundheit und das allgemeine Wohlbefinden werden durch die Abgas- und Staubemission beeinträchtigt und führen zu gesundheitlichen Folgekosten), den Substanzverlust der Straße und die Beschädigung der Vegetation (Absenken des Grundwassers; Beschädigung von Wurzeln). Jene Kosten finden bislang keine Berücksichtigung bei den Planungs-/Genehmigungs- oder Herstellungskosten, wodurch nachhaltig die Volkswirtschaft belastet wird [169].

Soziale Kosten

Die sozialen Kosten umfassen die gesellschaftlichen Konsequenzen bei der Durchführung eines Bauvorhabens. Jene Auswirkungen können nicht in den Planungs-/ Genehmigungs- oder Herstellungskosten berücksichtigt werden. Untergliedert werden sie in *Arbeitssicherheit* und *menschliche Faktoren*. Die *Arbeitssicherheit* umfasst die umliegende Sicherung des Bauvorhabens durch entsprechende Beschilderung oder durch Bauzäune. Die Bauzäune verringern die Unfallgefahr für Dritte und schützen das Bauwerk vor Vandalismus und Diebstahl. Weitere Faktoren wie bspw. eine ausreichende Baustellenbeleuchtung, die Baugrubensicherung durch den Verbau sowie Bautreppen und Witterungsschutz verringern die Unfallgefahr auf der Baustelle. *Menschliche Faktoren* umfas-

sen die Sicherheit der öffentlichen Gesundheit, das allgemeine Wohlbefinden und eventuell anfallende Abfindungsschäden, die bei Anwohnern und/oder Nutzern des Bauwerkes aufkommen können.

8.2.4.2 Ökologische Kriterien

Das Ziel eines jeden Bauvorhabens sollte ein möglichst schonender Umgang mit ökologischen Ressourcen sowie eine begrenzte Erzeugung von Schadstoffen sein. Die ökologischen Kriterien umfassen jene Bereiche, die sich auf umwelterhaltende Faktoren beziehen. Das Kriterium umfasst auf zweiter Ebene die *Auswirkungen von Emissionen*, den *Boden*, das *Wasser*, den *Ressourcenverbrauch*, die *Reststoffmengen* sowie die *Natur*.

Auswirkungen von Emissionen

Die *Auswirkungen von Emissionen* umfassen den CO₂-Ausstoß sowie den Baustellen- und Verkehrslärm, welche die Umwelt belastet. Weitere Umweltbelastungen werden durch die Baustoffherstellung und die Bereitstellung von Energie bewirkt. Zur Berücksichtigung aller Merkmale untergliedert sich das Kriterium *Auswirkungen von Emissionen* in einer dritten Ebene in die Bereiche *Erschütterungen*, *Lärm* sowie *Luftverunreinigung*.

Die *Erschütterungen* beinhalten Vibrationen, die durch den Gebrauch von Maschinen hervorgerufen werden. Durch die Schwingungen können Risse und Setzungen in umliegenden Bebauungen entstehen. Der *Lärm* bezieht sich auf die Einschränkungen auf das menschliche Wohlbefinden durch einen erhöhten Lärmpegel. Gehörschäden, Unwohlsein, Konzentrationsstörungen und Schlafstörungen können die Folgen sein, so dass der Einsatz von großen Maschinen über einen langen Zeitraum als störend empfunden wird. Eine weitere Steigerung des Lärmpegels kann durch eine Verkehrsumleitung verursacht werden. Eine solche Umleitung führt zu einer Zunahme des Verkehrs in Nebenstraßen, was ebenfalls eine erhöhte Lärmbelastung zur Folge hat. Desweiteren führen zum einen die Verkehrsumleitungen und zum anderen der Einsatz der Maschinen auf der Baustelle zu einer zusätzlichen *Luftverunreinigung*. Diese anthropogene Umweltbelastung kann durch feste, flüssige oder gasförmige Stoffe wie Staub, Rauch, Dämpfe oder Gase entstehen. Einige Geruchsstoffe zählen durch bestimmte Arbeitsvorgänge ebenfalls zu Luftverunreinigungen dazu.

Boden

Der Boden beinhaltet eine Vielzahl von Funktionen wie bspw. die Wasserfilter- und Nahrungsmittelfunktion. Eine Veränderung des Bodengefüges kann Setzungen und Betonerosionen zur Folge haben. Zudem wird die Photosynthese beeinträchtigt, da der Boden

aufgrund von Vermischungen mit schädlichen Substanzen nicht die erforderlichen Nährstoffe aufbringen kann. Desweiteren führt die Veränderung des Bodengefüges zu einem veränderten Ablauf für das Niederschlagswasser. Schädliche Partikel oder Verschmutzungen der Oberfläche gelangen leichter in den Boden.

Bei dem Kriterium Boden werden die Subkriterien *Geländeverformung* und *Veränderung der Bodenmatrix* verwendet.

Eine *Geländeverformung* kann durch die Baumaßnahmen während und nach Beendigung der Bauzeit ausgelöst werden. Außerdem wird der Boden beim Wiederverfüllen in der Bodenmatrix verändert bzw. ist die ursprüngliche Struktur der bodenmechanischen Eigenschaften nicht mehr gegeben, so dass eine Stabilität nicht mehr gewährleistet werden kann, was wiederum Setzungen des Bodens bedingt. Nach der Wiederverfüllung verändert sich der Boden und verdichtet sich nach einiger Zeit von selbst, was unter Umständen zu Straßenschäden wie Rissen im Asphalt führen kann. Darüber hinaus ist der natürliche Filterprozess von Niederschlagswasser durch den Boden zum Grundwasserspiegel beeinträchtigt.

Wasser

Bei einer entsprechenden Tiefe der Baugrubensohle kann das Grundwasser abgesenkt werden, um die Sicherheit in einer trockenen Baugrube zu gewährleisten. Durch die Beeinflussung des natürlichen Grundwasserverlaufs kann der Ablauf von biochemischen Prozessen gestört werden. Beispielsweise kann die Photosynthese ohne Wasser nicht erfolgen, da die Pflanzen austrocknen könnten. Dies gilt auch für die natürliche Selbstreinigung von Gewässern beim Abbau organischer Substanzen durch Mikroorganismen. Das Kriterium Wasser wird in die drei Subkriterien *Grundwasserabsenkung*, *Grundwasserbelastung* und *Verschmutzung von Oberflächenwasser* unterteilt. Bei Baugruben wird die *Grundwasserabsenkung* über vertikale (Brunnen) oder horizontale Fassungen (Drainagen) ermöglicht. Folgen des Wasserentzugs sind Austrocknungen des Pflanzenbewuchses sowie Setzungen aufgrund des fehlenden Auftriebs. Zudem können längere Grundwasserabsenkungen zu einem Ausfall von landwirtschaftlichen Bewässerungsanlagen führen. Eine Absenkung des Grundwassers sollte daher nur erfolgen, wenn keine Setzungen zu befürchten sind.

Eine ständige Grundwasserkontamination durch unbemerktes Auslaufen von bspw. Mineralöl, kann zu einer langanhaltenden *Grundwasserbelastung* führen. Ist das Grundwasser mit Schadstoffen erst belastet, ist die Trinkwasserversorgung gefährdet und muss durch aufwendige Aufbereitungsvorgänge gereinigt werden.

Durch die Verschmutzung des Oberflächen- und Niederschlagswassers durch Schwebstoffe kann das Wasser erst durch aufwendige Wasseraufbereitung wiederverwertet werden. Unter Oberflächenwasser wird das stehende Gewässer oder auch Fließgewässer

verstanden. Befindet sich ein Baukörper im Fließgewässer, so verengt er den Abflussquerschnitt. Diese Verengung bewirkt eine Veränderung des lokalen Abflusses. Die Folgen können der Aufstau und eine niedrigere bzw. höhere Fließgeschwindigkeit auf der entsprechenden Seite sein. Bei stehenden Gewässern wird das Niederschlagswasser mit Fremdstoffen vermischt und zugeleitet. Dadurch wird die natürliche Eigenschaft des Wassers gefährdet und verändert.

Ressourcen

Das Kriterium *Ressourcen* umfasst alle produktions- und lebensbedeutsame Umweltgüter für die wirtschaftliche Tätigkeit des Menschen. Ressourcen sind somit natürliche Produktionsmittel, die für die Wirtschaft genutzt werden. Unterschieden wird zwischen den erneuerbaren (nachwachsende) und nichterneuerbaren Rohstoffe. Nichterneuerbare Rohstoffe sollten aufgrund der begrenzten Menge an Vorräten eingespart werden. Der Verbrauch an Ressourcen wird größer, weil Materialien und Energie für eine Baumaßnahme benötigt werden. Weiterhin betrifft dieser Umstand auch neue Deck-, Trag- und Frostschutzschichten. Die Ressourcen beschreiben zudem die Ver- und Entsorgung von Wasser, Baustrom sowie Gasversorgung. Beim Ressourcenverbrauch wird zwischen vier Subkriterien unterscheiden: Der *Energieverbrauch*, die *Wiederverwendung von Ausbruchmaterial*, die *Flächeninanspruchnahme* und der *Verbrauch von mineralischen und natürlichen Rohstoffen*.

Eine Erhöhung des *Energieverbrauchs* wird durch die Nutzung von Maschinen und Transportfahrten für die Baumaßnahmen stetig erhöht. Jene Erhöhung des Energieverbrauchs führt zu einer Belastung der Umwelt, da die Umwandlung und Nutzung von Energieträgern wie z.B. Öl, Gas und Kohle mit erheblichen Emissionen verbunden ist.

Die *Wiederverwendung von Ausbruchmaterialien* führt zu einer Senkung der Materialkosten und Abfallverwertung sowie zu einer Einsparung der Rohstoffe. Fahrbahndecken aus Beton, die in Aufbereitungsanlagen zerkleinert werden, können für Betondeckschichten, Schottertragschichten und Frostschutzschichten als Recyclingmaterial eingesetzt werden.

Die Größe der *Flächeninanspruchnahme* wird durch das Bauverfahren beeinflusst. Die beanspruchten Flächen können nach der Baumaßnahme verändert werden. Eine eventuelle Verschmutzung der Flächen führt dazu, dass der Schmutz über den Niederschlag in den Boden gelangt oder in die Kanalisation dringt und so in die Gewässer einfließt. Zudem kann die erhöhte Belastung durch Lagerflächen die Bodenstruktur verändern bzw. verdichten, so dass Setzungen zu erwarten sind. Durch die Flächeninanspruchnahme des Baus kann die Beeinflussung des sozialen Umfeldes durch Einschränkung der Lebensfunktion zunehmen.

Das Kriterium *Verbrauch von mineralischen und natürlichen Rohstoffen* ist für das Betreiben der Baugeräte und -maschinen von Bedeutung. Ferner wird aus Erdöl durch Destillation von Rohöl Straßenbaubitumen gewonnen, welches für die Wiederherstellung der Straßenoberfläche nötig ist. Deswegen sollte eine Sicherung der Vorräte an mineralischen Rohstoffen angestrebt werden.

Reststoffmengen

Die Reststoffmengen stellen bei Bauprojekten einen Großteil der zusätzlichen Kosten dar. Deck- und Tragschichten sowie Frostschutzschichten und das Aushubmaterial, welches vom Abriss der Straßenoberfläche anfällt, gelten als Abfall und nehmen Deponieräume in Anspruch. Reststoffmengen können durch aufwendige Prozeduren wiederverwertet werden. Die stoffliche und energetische Nutzung von Reststoffmengen wird als Verwertung bezeichnet. Werden Reststoffmengen auf einer Deponie gelagert, gilt dies als Beseitigung. Das Kriterium *Reststoffmengen* teilt sich in einer dritten Ebene in die Bereiche *Sonderabfälle*, *Deponieraum* und *Bodenaushub* auf.

Die *Sonderabfälle* umfassen Abfallarten wie Chemikalien, Brennstoffe, kontaminiertes Restholz und kontaminierten Betonabbruch. Jene Sonderabfälle müssen aufgrund der Platzbereitschaft abtransportiert werden. Besonders Deck-, Trag- und Frostschutzschichten sowie Aushubmaterial werden als Abfälle gesehen. Eine Vermeidung von Abfällen führt zur Senkung der Beseitigungskosten und Senkung der Umweltgefahren durch Verbrennen.

Der *Bodenaushub* einer Baumaßnahme, der nicht vollständig wieder eingebaut werden kann, wird klassisch auf eine Deponie entsorgt. Dieser benötigte *Deponieraum* verursacht Entsorgungskosten, die jedoch bereits in den Initialkosten Berücksichtigung finden. Der Bodenaushub ist in den meisten Fällen verwertbar, außer bei Verunreinigung des Bodenaushubs z.B. durch den Bau von Bahnanlagen. Je nach Bauverfahren kann der Bodenaushub stark variieren.

Natur

Die Erhaltung und der Schutz der Natur sind während einer Baumaßnahme von großer Bedeutung. Die Natur umfasst die gesamte Tier- und Pflanzenwelt, Gewässer und Gesteine. Das Kriterium *Natur* beinhaltet folgende Attribute, die jedoch nicht in eine dritte Ebene überführt werden, sondern im gesamten Kontext genutzt werden. Hierbei handelt es sich um Bereiche, wie die Flora/Pflanzen, die Fauna/Tierwelt, die Erhaltung der ökologischen Funktion, die Erholungsgebiete und die Zerschneidung von Lebensräumen.

8.2.4.3 Technische Kriterien

Die technischen Kriterien umfassen die unmittelbaren technischen Abläufe des Bauverfahrens. Jene Kriterien beinhalten normalerweise eine Vielzahl an Aspekten. Zum Zeitpunkt der Verfahrensauswahl sind jedoch detaillierte Beschreibungen über konkrete technische Gegebenheiten noch nicht in aller Ausführlichkeit gegeben, so dass die technischen Kriterien einzig die wichtigsten Aspekte aufgreifen und näher erläutern. Zu jenen Unterkriterien zählen die *Bauzeit*, die *Baulogistik* sowie der *Baugrund*.

Bauzeit

Das Kriterium *Bauzeit* beschreibt die Dauer einer Projektausführung. Umso schneller die Baumaßnahmen abgeschlossen werden können, desto eher können der Verkehr, die Anlieger oder auch der Einzelhandel mit ihrem gewohnten Ablauf fortfahren. Das Kriterium *Bauzeit* umfasst sowohl den Zeitaufwand der verschiedenen Bauverfahren als auch weitere Faktoren, die zu einer Verlängerung der Gesamtbauzeit führen. So können bei einer offenen Bauweise bspw. jahreszeitlich bedingte Klimaverhältnisse eine Verlängerung der Bauzeit verursachen, da einige Arbeiten, wie z. B. das Betonieren, bei bestimmten Temperaturen nicht durchführbar sind. Gleichzeitig können sich Sondermaßnahmen, die sich aus einem Bauverfahren ergeben, z.B. spezielle Sicherungsverfahren oder die Wiederherstellung der Straßenoberfläche, negativ auf die Gesamtzeit des Vorhabens auswirken. Oftmals stellt die Bauzeit ein zeitlich nicht einzuhaltendes bzw. schlecht kalkuliertes Kriterium dar, was zu erheblichen Vertragsstrafen führt. Folglich ist die Bauzeit konkret abzuschätzen und sollte nicht überschritten werden. Bei einer Überschreitung der Bauzeit sollte ein definitiv der Aspekt der Vertragsstrafen mit in eine Entscheidung berücksichtigt werden. Dieser Punkt wird jedoch erst in den nächsten Abschnitten näher erläutert.

Baulogistik

Das Kriterium *Baulogistik* wird oft in Verbindung mit der *Sechs-R-Regel* gebracht, welche besagt, das richtige Produkt (1), zur richtigen Zeit (2), am richtigen Ort (3), in der richtigen Menge (4), in der richtigen Qualität (5) und zu den richtigen Kosten (6) zu sichern [203, S.30]. Die Baulogistik beschäftigt sich mit der Organisation, Planung und Steuerung der logistischen Abläufe der Baumaßnahme [132, S.214ff]. Darunter fallen die Koordination von Gewerken, die Lagerung und das Transportwesen, die Versorgung mit Baumaterialien, die Planung, Steuerung, Durchführung sowie die Bereitstellung. Das Kriterium Baulogistik unterteilt sich in die Subkriterien Flächenmanagement und Transportwege.

Das *Flächenmanagement* beschreibt den Geräteeinsatz und die Flächennutzung. Es sollte genug Platz für Arbeits- und Lagerflächen sowie für Sicherheitsbereiche vorhanden

sein. Ebenso wird unter dem Flächenmanagement der Bedarf an Geräten und Maschinen verstanden. Grundsätzlich zählen Großbagger, Kompressoren, Ladegeräte und Aufbruchhammer zu der Grundausstattung, die hauptsächlich im oberirdischen Bereich ihren Einsatz finden. Ferner werden für den Straßenwiederaufbau Transporte mit dem LKW und Raupenfertiger benötigt. Beim Rohrvortrieb werden Minibagger sowie Abbaumaschinen und –geräte benötigt. Diese stellen im oberirdischen Flächenmanagement eine geringe Beanspruchung dar.

Die *Transportwege* beziehen sich auf die rechtzeitige Lieferung der Ware an ihren Bestimmungsort, um Zwischenlagerungen zu verhindern. Aufgrund der Entmischungsgefahr der Tragschichten, die im Werk gemischt wurden und unmittelbar nach dem Transport zur Baustelle eingebaut werden sollten, sind Zwischenlagerungen auf der Baustelle zu vermeiden. Des Weiteren wird unter den Transportwegen die Entfernung zwischen dem Werk und der Baustelle verstanden. Je größer die Entfernung ist, desto höher sind die Transportkosten. Transportkosten hängen zudem von der Transportart, Geometrie und Masse der Fertigteile sowie der Empfindlichkeit gegen Transportschäden ab.

Baugrund

Der *Baugrund* bezieht sich auf die technische Verarbeitung des Baugrundes und ist daher von dem Kriterium Boden abzugrenzen, da es sich hier um die technische Nutzung handelt. Im Allgemeinen werden Aspekte zusammengetragen, die Einflüsse auf den Bauablauf haben. Beispielsweise können Störzonen den Baugrund und somit den Bauablauf massiv beeinflussen.

8.2.4.4 Soziale Kriterien

Die sozialen Kriterien beinhalten in dieser Untersuchung individuelle und soziale Zwecksetzungen. Diese beleuchten unmittelbare oder mittelbare Belange von Nutzern, Anwohnern oder Dritten, die sich in der Nähe der Baustelle befinden. Insbesondere spielt hier auch das Wohlbefinden eine entscheidende Rolle, da der Bau der Infrastruktur vor allem während der Betriebsphase Auswirkungen auf das Individuum Mensch hat. Hierbei ist darauf zu achten, ob der Bau eines Infrastrukturprojektes Einbußen auf die Lebensqualität des Menschen hat. Dazu zählen sicherlich auch volkswirtschaftliche Aspekte, wie der Rückgang von Tourismus und Lebensqualität, was in einer solchen Bewertung in dieser Arbeit nicht monetär ausgedrückt werden kann.

8.2.5 Zusammenfassende Betrachtung zur Phase 1

Der erste Schritt zur Bestimmung des besten Bauverfahrens ist die zeitliche Einordnung des Modells in die konkrete Planungsphase. Erst in dieser Phase, in welcher nicht nur ökonomische, sondern auch ökologische und technische Untersuchungen durchgeführt werden, ist es wichtig, dass sich einzelne Projektgruppen mit der Thematik der Entschei-

dungsfindung befassen. Die Projektgruppen bzw. Projektbeteiligten sollten in Workshops die Identifikation von Kriterien voranbringen, um erste Vorarbeiten für die Bewertung des Projektes zu leisten. Je nach Informationen lassen sich so Kriterien in qualitative und quantitative Kriterien unterteilen. Darüber hinaus wird in einem weiteren Schritt untersucht, welche dieser Kriterien scharf, unscharf oder unsicher bzw. risikobehaftet sind. Auf diese Weise kann nicht nur eine erste Bewertungshierarchie geschaffen, sondern auch weitere Analysen vorgenommen werden, um die Bedeutsamkeit der einzelnen Kriterien zu untersuchen. Diese weiteren Analysen betreffen dabei unscharfe sowie unsichere Faktoren, die nunmehr in den einzelnen Abschnitten der Datentypanalyse bearbeitet werden.

8.3 Phase 2: Datentypanalyse

Nach Abschluss der Phase 1 erfolgt die genaue Bewertung der Kriterien- sowie Alternativenvergleiche. Zuvor wurden die einzelnen Kriterien hinsichtlich ihres Datentyps sortiert (scharf, unscharf sowie unsicher). Erst nach diesen Untersuchungen kann die Bewertung vollständig durchgeführt werden, so dass eine Empfehlung hinsichtlich der Alternativen getroffen werden kann (Phase 3: Software DEMUS²). Dazu ist es zunächst erforderlich, die einzelnen Bewertungsmöglichkeiten vorzustellen, da diese auf unterschiedliche Methoden basieren, die in diesem Modell zusammengeführt werden müssen. Insgesamt lässt sich die Phase 2 in drei Abschnitte unterteilen. Aufgrund der Tatsache dass es sich um ein fuzzybasiertes Entscheidungsmodell handelt, müssen sämtliche Bewertungen in einer fuzzyfizierten Form vorliegen. Für unscharfe Werte gilt, dass diese nach der Fuzzy-Theorie berechnet werden (Phase 2-1: Fuzzybasierte Bewertung). Unsichere Werte hingegen werden zunächst mit der zuvor festgelegten Risikomethode evaluiert (Phase 2-2: Risikobasierte Bewertung). Das bedeutet aber auch, dass scharfe sowie unsichere Werte in einem weiteren Schritt noch fuzzyfiziert werden müssen (Phase 2-3: Sonderfall der fuzzybasierten Bewertung), damit diese überhaupt in das Modell integriert werden können. Unter Berücksichtigung der gemachten Angaben lässt sich die Datentypanalyse wie in Abbildung 45 darstellen.

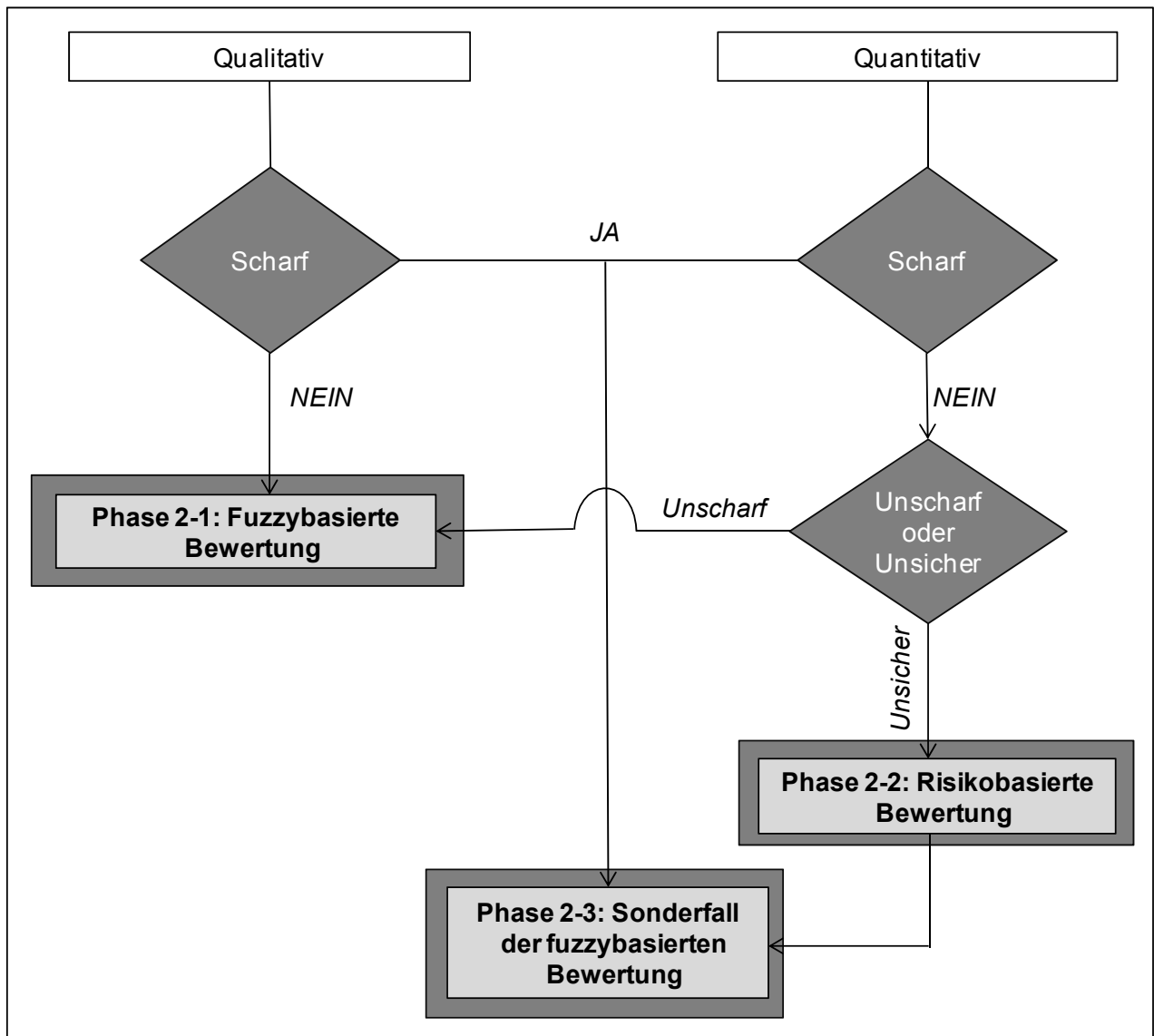


Abbildung 45: Ablauf der Datentypanalyse (Phase 2)

8.3.1 Phase 2-1: Fuzzybasierte Bewertung

Wie bereits erwähnt hat die AHP-Methode den Vorteil, qualitative und quantitative Kriterien gleichzeitig zu berücksichtigen. Quantitative Kriterien sind dabei objektiv und messbar, so dass vorhandene Daten in die Methodik ohne größeren Aufwand implementiert werden können. Aufgrund der unzureichenden Messbarkeit qualitativer Kriterien können diese nur auf subjektive Weise bewertet werden, so dass die Erfahrung eines Entscheiders die wichtigste Eigenschaft sein muss. Betrachtet man erneut quantitative Größen, so müssen die Ausführungen aus Kapitel 6 herangezogen werden. Quantitative Größen unterliegen durchaus Toleranzen bzw. Messungenauigkeiten, so dass Unschärfen vorhanden sind. Ziel ist es aufzuzeigen, wie unscharfe qualitative und quantitative Größen in die AHP-Methodik berücksichtigt werden. Der Abschnitt zeigt, wie qualitative und quantitative Eingangsparameter erfasst und im Folgeschritt fuzzyfiziert werden, so dass eine Integration in die AHP-Methodik möglich ist (Abbildung 46).

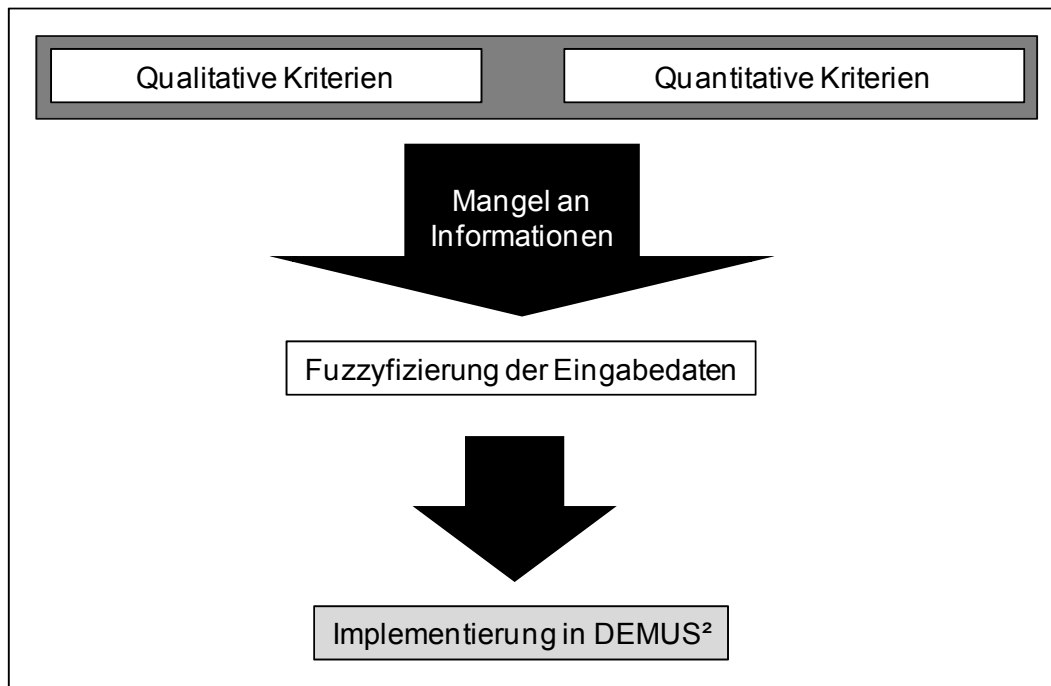


Abbildung 46: Vorgehensweise bei unscharfen Eingangsgrößen

8.3.1.1 Unschärfe bei qualitativ zu bewertenden Größen

Gemäß den Ausführungen aus Kapitel 6 wird die Berechnung unter Zuhilfenahme des Fuzzy-AHP-Theorems nach Cheng ausgeführt. Jede Bewertungszahl ist in dem Modell und somit auch in DEMUS² mit jeweils zwei Funktionen ausgestattet. Die Bewertungszahlen können ein größtmögliches Intervall von ± 1 oder auch ± 2 annehmen. Der Entscheider hat demnach nicht nur die Möglichkeit, das klassische AHP-Ergebnis einzusehen, sondern im späteren Verlauf vertiefte Einblicke in die fuzzyfizierten Ergebnisse zu bekommen, falls einzelne Paarvergleiche fuzzyfiziert werden sollen.

In den Funktionsverläufen der Abbildung 47 und 48 wird deutlich, dass sich der fuzzyfizierte Wert ‚1‘ über die klassische AHP-Skala hinaus erstreckt. Es stellt sich die Frage, ob der Wert ‚1‘ grundsätzlich immer dann vergeben werden kann, wenn ein Zustand zwischen zwei Attributen nicht exakt vorherbestimmt wird. Zusätzlich stellt sich die Frage, ob es durchaus möglich ist, dass bei absolut unzureichender Informationslage beide Attribute eine höhere Bedeutung gegenüber dem zu vergleichendem Attribut haben können. Dies erlaubt eine exaktere Betrachtung von qualitativen Paarvergleichen. Eine marginale Änderung zugunsten eines Attributes könnte in einem solchen Fall ein gesamtes Ergebnis verändern.

Die Abbildungen zeigen, dass der fuzzyfizierte Wert ‚1‘ (gestrichelte Funktion) in der Software zu beiden Attributen tendieren kann, sollten die Informationen gänzlich unzureichend sein. In den Tabellen 13 und 14 sind die Funktionen hinterlegt, die über den Alpha-Cut α sowie Optimismus-Index λ definiert werden. Entgegen den ersten Beschreibungen aus Kapitel 6.4.1 (Qualitative Unschärfe) werden für alle weiteren Berechnungen

alle AHP-Werte von ,1' bis ,9' herangezogen, so dass folglich auf die geraden Zwischenwerte nicht verzichtet wird. Auf diese Art muss ein Entscheider nicht zwischen der ursprünglich vorgestellten Fuzzy-AHP-Skala und der klassischen AHP-Skala unterscheiden. Somit hätte er die Möglichkeit, stets die gleiche Skala zu nutzen, was sich für einen Entscheider als einen erheblichen Vorteil herausstellt. Aus Platzgründen werden in den Tabellen 13 und 14 für den fuzzyfizierten Wert ,1' das Intervall $f(\alpha)$ sowie die Funktionen $f(\alpha, \lambda)$ nicht angezeigt. Das Intervall ist in den Abbildungen 47 und 48, die Funktionen in den Abbildungen 49 bis 52 ausführlich dargestellt.

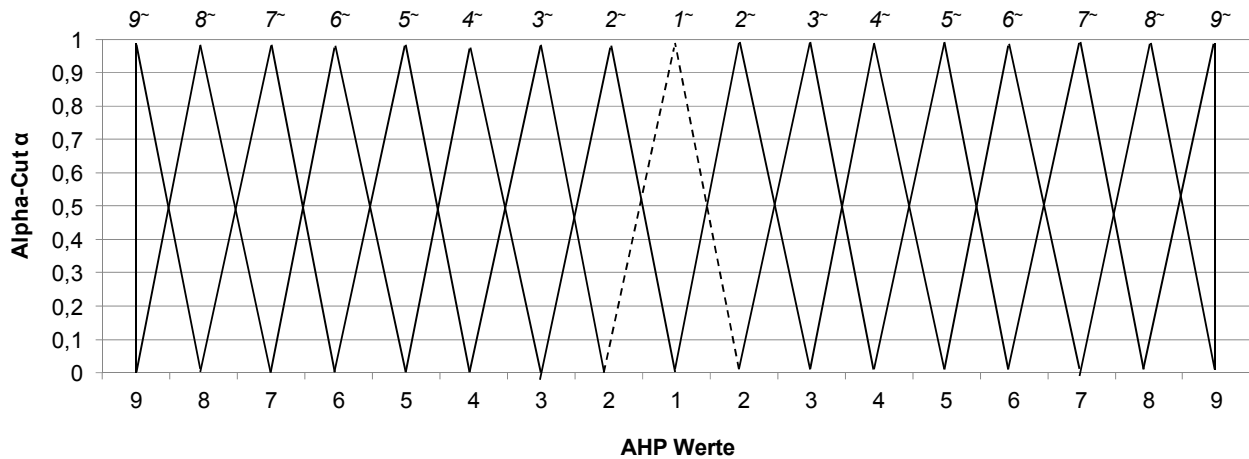


Abbildung 47: Fuzzy-Dreiecksfunktionen für AHP-Bewertungszahlen (Intervall ± 1)

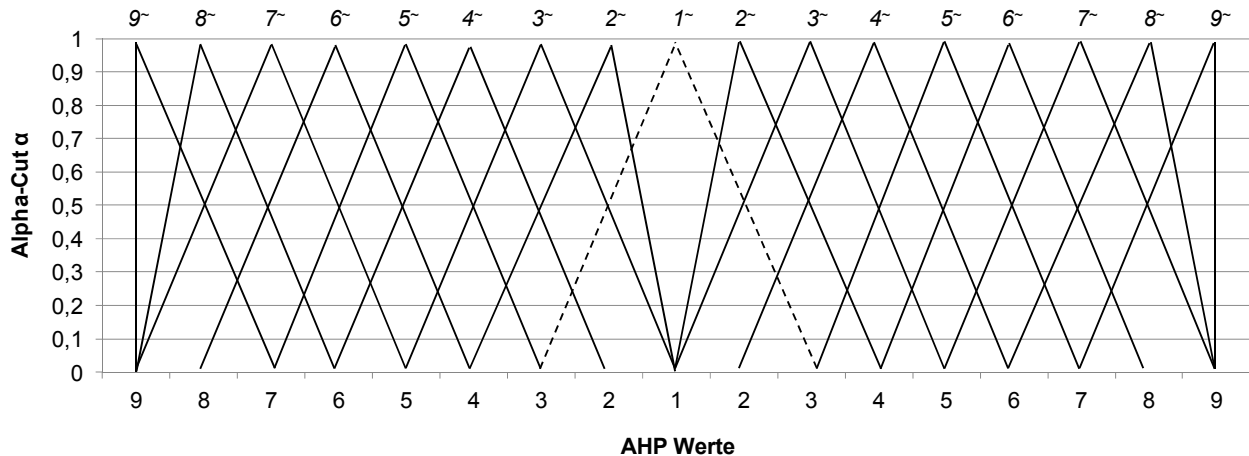
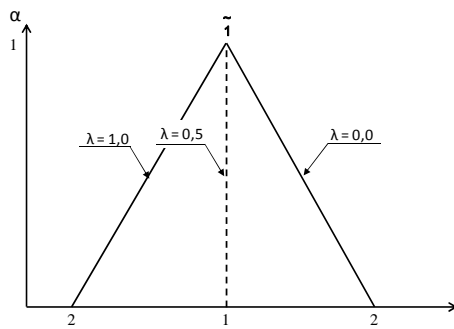
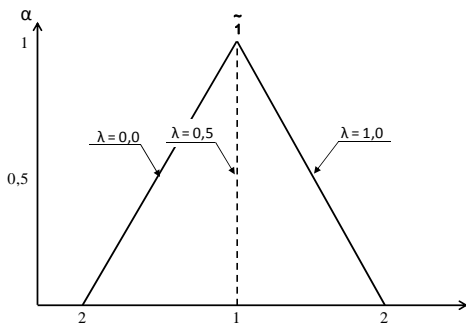


Abbildung 48: Fuzzy-Dreiecksfunktionen für AHP-Bewertungszahlen (Intervall ± 2)

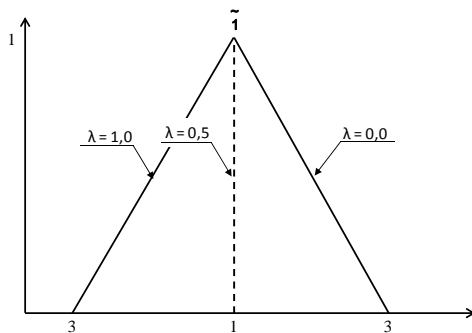
In den Abbildungen 49 bis 52 sind die Funktionen für die fuzzyfizierten Werte ,1' dargestellt. Dabei wird wie folgt unterschieden: Handelt es sich um einen Vergleich in der Form A zu B, so wird festgelegt, welches Attribut die stärkere Präferenz hat. Handelt es sich dabei um das Attribut A, so ist der Entscheider optimistisch dahingehend eingestellt, dass dieses Attribut eine stärkere Gewichtung gegenüber dem Attribut B aufweist ($\lambda = 1,0$). Analog dazu ergibt sich die Gewichtung bei einer Präferenz für B. Sollte die Untersuchung mit dem größeren Intervall erfolgen, so gilt die gleiche Vorgehensweise wie bei dem Intervall ± 1 .



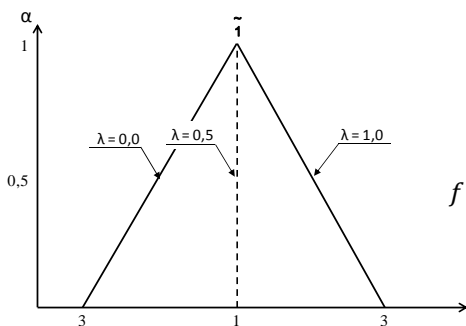
$$f(\alpha, \lambda) = \begin{cases} (1 - \lambda) \cdot \alpha + \lambda \cdot (2 - \alpha), & \lambda \geq 0,5 \\ \frac{1}{((1-(1-\lambda)) \cdot \alpha + (1-\lambda) \cdot (2-\alpha))}, & \lambda < 0,5 \end{cases} \quad (\text{Gl. 8-1})$$

Abbildung 49: Fuzzyfizzierter AHP-Wert '1', Präferenz links, Intervall ± 1 

$$f(\alpha, \lambda) = \begin{cases} (1 - (1 - \lambda)) \cdot \alpha + (1 - \lambda) \cdot (2 - \alpha), & \lambda \leq 0,5 \\ \frac{1}{(1-\lambda) \cdot \alpha + \lambda \cdot (2-\alpha)}, & \lambda > 0,5 \end{cases} \quad (\text{Gl. 8-2})$$

Abbildung 50: Fuzzyfizzierter AHP- Wert '1', Präferenz rechts, Intervall ± 1 

$$f(\alpha, \lambda) = \begin{cases} (1 - \lambda) \cdot 2\alpha + \lambda \cdot (3 - 2\alpha), & \lambda \geq 0,5 \\ \frac{1}{(1-\lambda) \cdot 2\alpha + \lambda \cdot (3-2\alpha)}, & \lambda < 0,5 \end{cases} \quad (\text{Gl. 8-3})$$

Abbildung 51: Fuzzyfizzierter AHP- Wert '1', Präferenz links, Intervall ± 2 

$$f(\alpha, \lambda) = \begin{cases} (1 - (1 - \lambda)) \cdot 2\alpha + (1 - \lambda) \cdot (3 - 2\alpha), & \lambda \leq 0,5 \\ \frac{1}{(1-(1-\lambda)) \cdot 2\alpha + (1-\lambda) \cdot (3-2\alpha)}, & \lambda > 0,5 \end{cases} \quad (\text{Gl. 8-4})$$

Abbildung 52: Fuzzyfizzierter AHP- Wert '1', Präferenz rechts, Intervall ± 2

Fuzzy Wert	1 ⁻	2 ⁻	3 ⁻	4 ⁻	5 ⁻	6 ⁻	7 ⁻	8 ⁻	9 ⁻
Intervall f(α)	Siehe Abb. 47	[1+α; 3-α]	[2+α; 4-α]	[3+α; 5-α]	[4+α; 6-α]	[5+α; 7-α]	[6+α; 8-α]	[7+α; 9-α]	[8+α; 9]
AHP Wert f(α;λ)	Siehe Abb. 49/50	(1-λ)*(1+α) + λ*(3-α)	(1-λ)*(2+α) + λ*(4-α)	(1-λ)*(3+α) + λ*(5-α)	(1-λ)*(4+α) + λ*(6-α)	(1-λ)*(5+α) + λ*(7-α)	(1-λ)*(6+α) + λ*(8-α)	(1-λ)*(7+α) + λ*(9-α)	(1-λ)*(8+α) + λ*(9)

Tabelle 13: Funktionen für das Intervall ± 1

Fuzzy Wert	1 ⁻	2 ⁻	3 ⁻	4 ⁻	5 ⁻	6 ⁻	7 ⁻	8 ⁻	9 ⁻
Intervall f(α)	Siehe Abb. 48	[1+α; 4-2α]	[1+2α; 5-2α]	[2+2α; 6-2α]	[3+2α; 7-2α]	[4+2α; 8-2α]	[5+2α; 9-2α]	[6+2α; 9-α]	[7+2α; 9]
AHP Wert f(α;λ)	Siehe Abb. 51/53	(1-λ)*(1+α) + λ*(3-α)	(1-λ)*(2+α) + λ*(4-α)	(1-λ)*(3+α) + λ*(5-α)	(1-λ)*(4+α) + λ*(6-α)	(1-λ)*(5+α) + λ*(7-α)	(1-λ)*(6+α) + λ*(8-α)	(1-λ)*(7+α) + λ*(9-α)	(1-λ)*(8+α) + λ*(9)

Tabelle 14: Funktionen für das Intervall ± 2

8.3.1.2 Unschärfe bei quantitativ zu bewertenden Größen

Im Zuge der Planungsphase von unterirdischer Infrastruktur gehört es nicht nur zu der Aufgabe der Entscheider, Sachverhalte auf qualitative Art zu bewerten, sondern auch Fakten, Daten und vorliegende quantitative Größen zu beurteilen und zum Entscheidungsprozess hinzuzufügen. Zu den Merkmalen solcher vorliegenden Daten gehören allerdings auch die Heterogenität und Ungenauigkeit, da die Daten aus verschiedenen Quellen und mit verschiedenen Mess- und Beobachtungsmethoden gewonnen werden.

Die Erfassung solcher Daten ist neben stochastischer Unsicherheit (siehe Kapitel 7) auch eng mit einer Ungenauigkeit verbunden, die durchaus durch den Entscheider impliziert wurde. Oftmals werden in der Praxis Daten aus vergangenen Projekten herangezogen bzw. durch Dritte am Projekt beteiligte Personen übermittelt, so dass eine gewisse Subjektivität in der Form der Daten vorliegt. Daher ist es notwendig, Bewertungsverfahren zu nutzen, um unpräzise und subjektiv geprägte Daten transparent und nachvollziehbar zu verarbeiten [145].

Wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, erfolgt die mathematische Modellierung solcher Problemstellungen mit Hilfe von mathematischen Modellen, wobei jedoch exakt formulierte Modelle Idealisierungen benötigen, um einen formalen Ansatz zu generieren. In der Praxis zeigt sich allerdings, dass Daten keinesfalls genau und exakt vorliegen, womöglich auch deswegen, weil Daten durchaus in anderen Skalen vorliegen könnten. Zu erwarten wäre nun, dass mit Hilfe von statistischen Mitteln solche Daten mathematisch ausgedrückt werden können, um die Ungewissheit in das Entscheidungsmodell zu berücksichtigen. Jedoch kann auf diesem Wege die übrige Unschärfe nicht erfasst werden, so dass diese mathematischen Mittel nicht zielführend sind. Zur Lösung der Problematik müssen die Ausführungen aus Kapitel 3 erneut herangezogen werden. Um die Ungenauigkeit und Unschärfe von Daten in das AHP-Modell zu implementieren, ist die intrinsische und informationale Unschärfe von entscheidender Bedeutung. Die intrinsische und informationale Unschärfe lässt sich mit Hilfe der Fuzzy-Theorie beschreiben, da sie die

Möglichkeit bietet, Abstufungen in der Zugehörigkeit zu einer Menge oder einer Zahl genau zu beschreiben, so dass die durch den Entscheider erstellten und benutzten Funktionen gute Annäherungen an die subjektive Vorstellung darstellen. Aus diesem Grund sind auch für die quantitativen Daten lineare Funktionen zu bilden.

Der Vorteil der im vorherigen Abschnitt genutzten Theorie von Cheng war, dass neben dem eingeführten Alpha-Cut auch die Nutzung des Optimismus-Index eine entscheidende Rolle spielt. Mit Hilfe dieser beiden Variablen lässt sich jeder beliebige Wert aus der gesamten Fuzzy-Menge bestimmen. Diese Theorie, welche das menschliche Urteilsvermögen sehr gut abbilden kann, soll nun für die quantitativen Sachverhalte genutzt werden. Gemäß der AHP-Methodik werden quantitative Vergleiche durch die Berechnung einer Verhältniszahl ausgedrückt. Auf diesem Wege können sowohl maximale Werte ermittelt werden, das heißt dass je höher ein Wert ist, desto höher ist auch sein Nutzen, als auch minimale Werte einer Bewertung, das heißt je höher ein Wert ist, desto niedriger ist sein Nutzen, berechnet werden. Folglich sollte es möglich sein, diese beiden Variablen für die quantitative Bewertung zu nutzen. Der Entscheider modelliert unter Zuhilfenahme seines Expertenwissens und seiner Erfahrung die ihm vorliegenden quantitativen Daten. Die Daten werden fuzzyfiziert und als Funktion in Abhängigkeit des Unschärfegrades sowie Optimismus-Index dargestellt. Zur Implementierung in das AHP-Modell ist eine Defuzzyfizierung notwendig, wobei für jedes beliebige α und λ Verhältniszahlen berechnet werden, die in die Datenbank der Software abgelegt werden. Je nach notwendiger Analyse kann jeder beliebige Wert in das Modell integriert werden. In Abbildung 53 ist die Vorgehensweise für die Fuzzyfizierung von quantitativen Größen dargestellt.

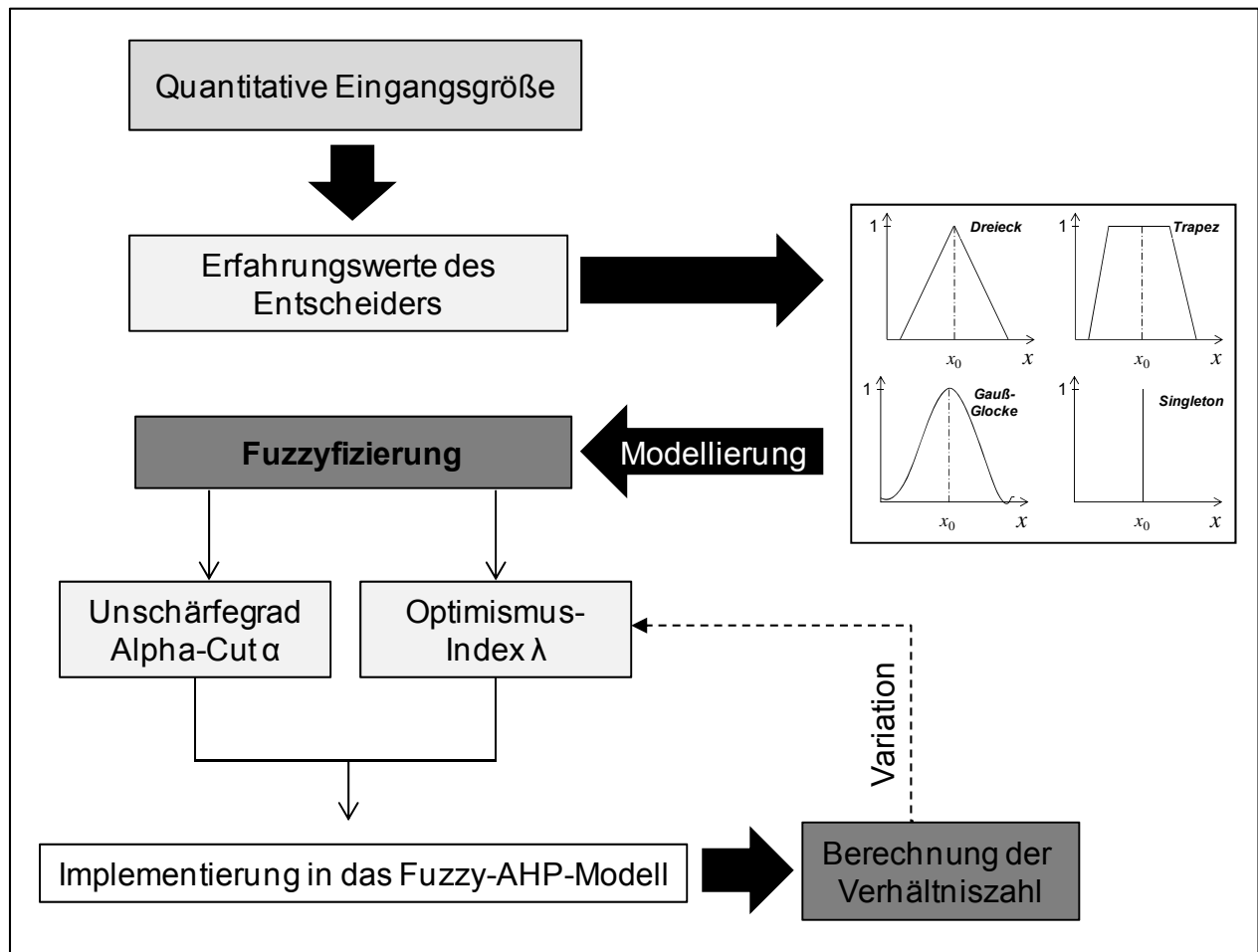


Abbildung 53: Ablauf bei der Fuzzyfizierung einer quantitativen Größe

Die Fuzzyfizierung einer quantitativen Größe soll im folgenden kurzen Beispiel veranschaulicht werden. Alle Angaben beruhen dabei auf Annahmen: Ein Entscheider erhält Daten bzgl. eines neuen Projektes. Insbesondere fällt dem Entscheider auf, dass die Transportmenge des abgebauten Bodenmaterials mit ca. 5 to/Tag bei einer offenen Bauweise und ca. 8 to/Tag bei einem konventionellen Vortrieb beträgt. Würde der Entscheider den klassischen AHP nutzen, so würde er die Verhältniszahl berechnen, indem er für beide Werte die folgende Formel nutzt:

$$w_i = \frac{a_i}{a_1 + a_2 + \dots + a_n} \quad (\text{Gl. 8-5})$$

Das Ergebnis besagt, dass der konventionelle Vortrieb mit 61,5% zu präferieren wäre. Diese Vorgehensweise entspricht einer scharfen und herkömmlichen Bewertung.

Dem Entscheider liegen jedoch aus der Vergangenheit verschiedene Protokolle zur Verfügung, aus welchen hervorgeht, dass die Transportmengen des abgebauten Bodenmaterials täglich aufgrund von Pannen der Transporter und unvorhersehbaren Ereignissen stark abweichen. Bei der offenen Bauweise stellt er fest, dass die Toleranzen minimal sind, das heißt, dass täglich zwischen 4 und 6 Tonnen pro Tag transportiert werden können. Bei dem konventionellen Vortrieb hingegen können durchaus auch nur 3 Tonnen pro

Tag abtransportiert werden. Der maximale Transport von 8 Tonnen war zwar zwischenzeitlich möglich, jedoch wurde eine höhere Leistung nicht erzielt. Mit Hilfe weiterer am Projekt beteiligter Personen sollen nunmehr Fuzzy-Funktionen ermittelt werden. Der Entscheider stellt dabei folgende Funktionen (Abbildung 54) zusammen:

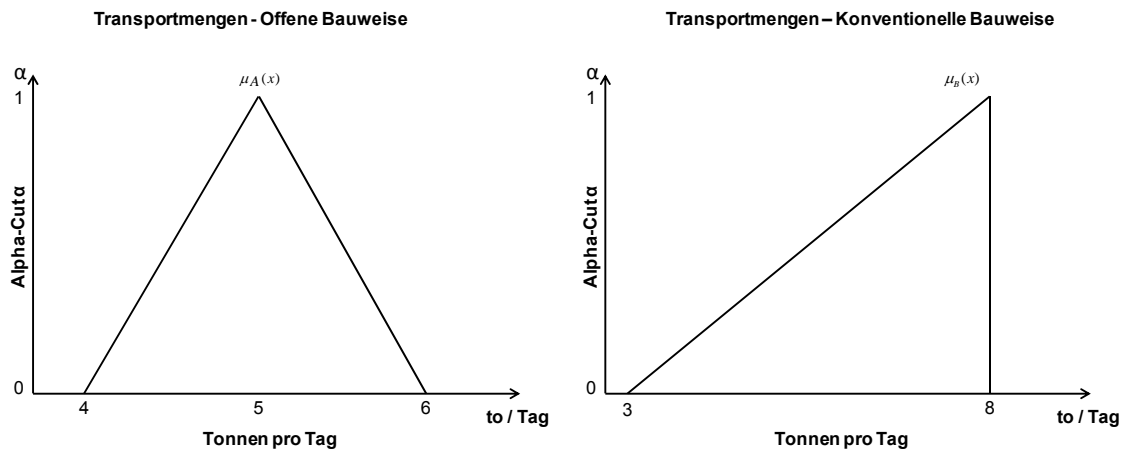
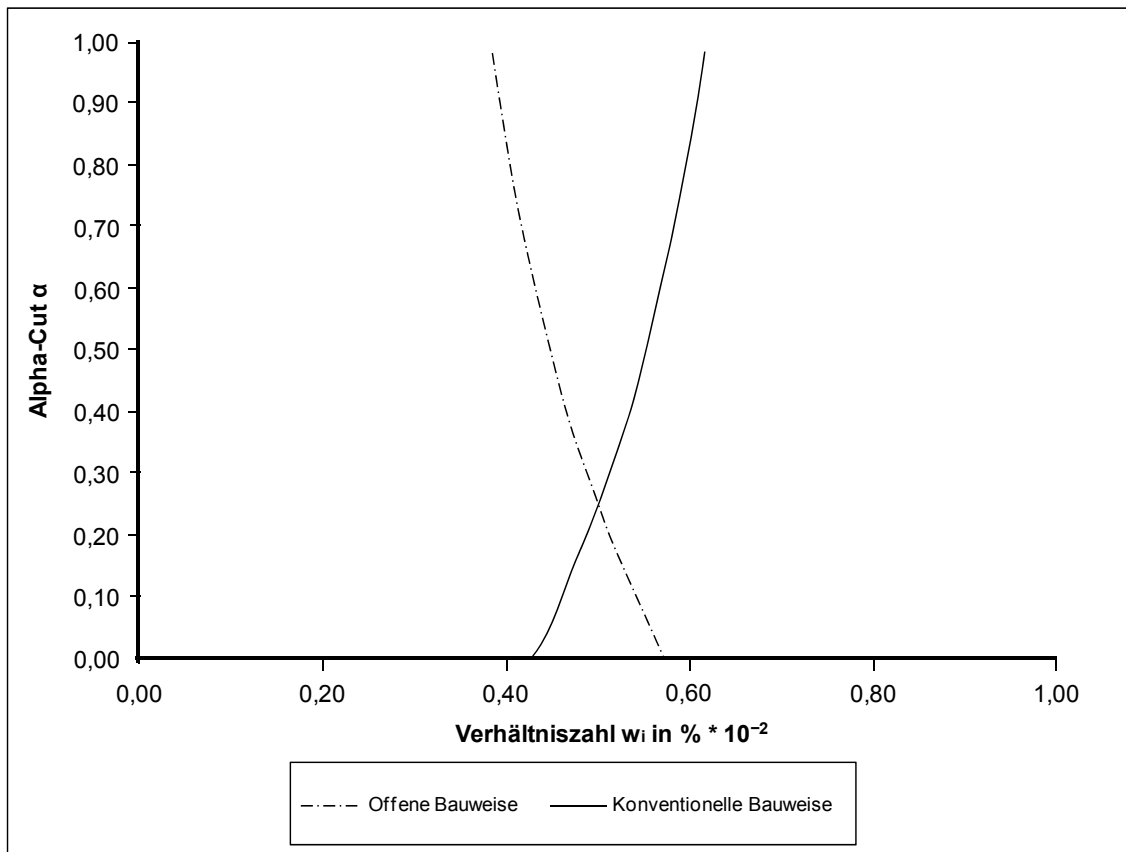
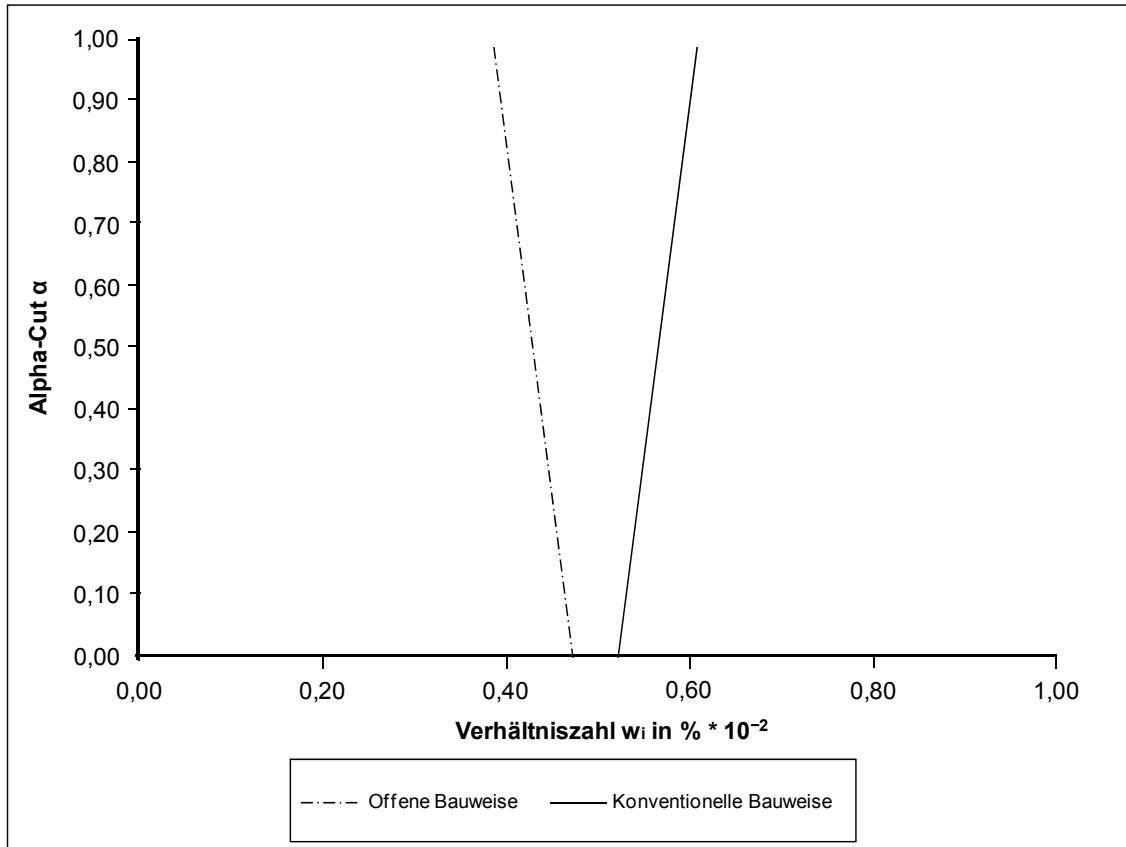


Abbildung 54: Zugehörigkeitsfunktionen Transportmengen in to/Tag

Durch Nutzung der beiden Variablen des Alpha-Cuts und des Optimismus-Index lässt sich so jeder Wert aus den Fuzzy-Mengen bestimmen. Geht man davon aus, dass der Entscheider jeweils ein pessimistischer ($\lambda=0$), moderater ($\lambda=0,5$) oder optimistischer Entscheider ist ($\lambda=1$), können in Abhängigkeit des Alpha-Cuts folgende Funktionsverläufe erstellt werden, wobei die Verhältniszahl mit der Gleichung 5-4 ermittelt wird. (Abbildungen 55 bis 57).

Abbildung 55: Funktionsverläufe der Gesamtgewichtung der Alternativen für $\lambda=0,0$ Abbildung 56: Funktionsverläufe der Gesamtgewichtung der Alternativen für $\lambda=0,5$

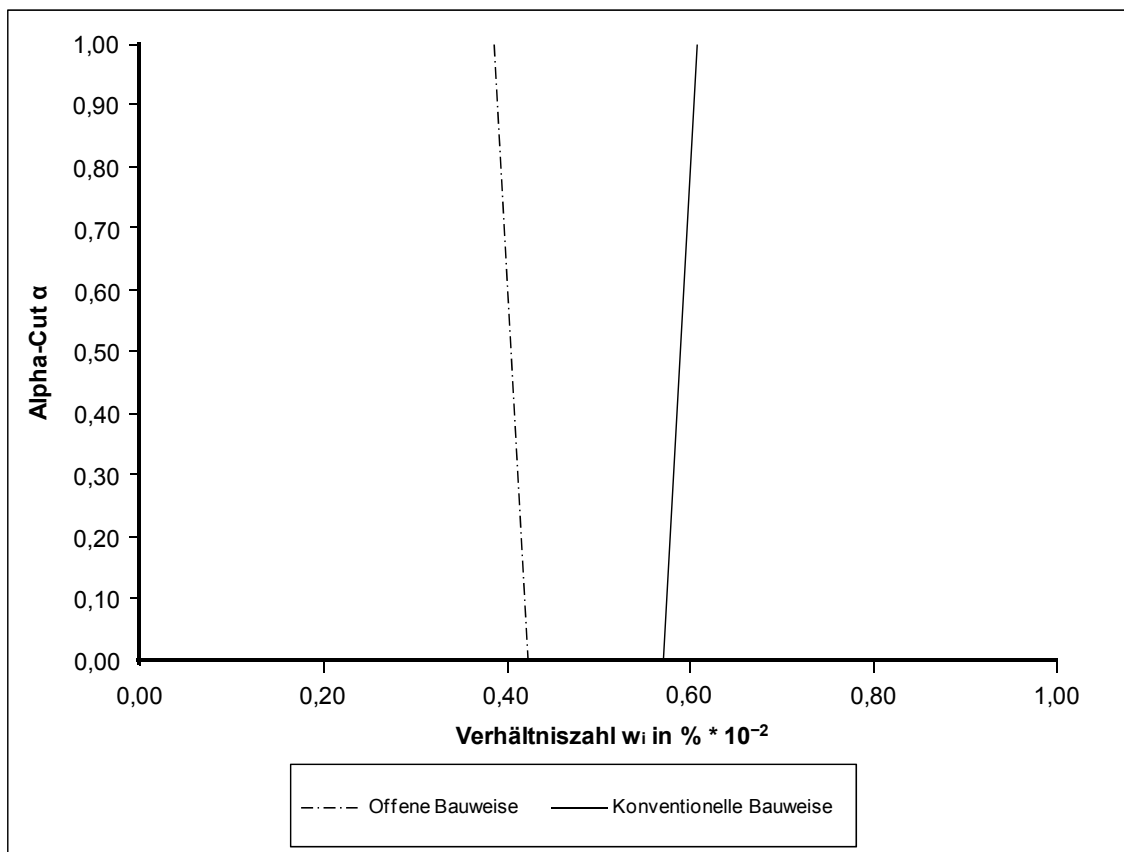


Abbildung 57: Funktionsverläufe der Gesamtgewichtung der Alternativen für $\lambda=1,0$

Durch die Variation der beiden Variablen α und λ konnten auf diese Weise Funktionsverläufe dargestellt werden. Je nachdem wie der Entscheider der Bewertung gegenüber steht bzw. die Informationen zu dem Sachverhalt vorliegen, können die Ergebnisse der Verhältniszahl durchaus variieren. Betrachtet man bspw. Abbildung 55, so fällt auf, dass bei einer pessimistischen (vorsichtigen) Haltung des Entscheiders und bei relativ mangelhaften Informationen über die Transportmenge durchaus die zu Beginn augenscheinlich schlechter erscheinende Alternative (offene Bauweise) vorzuziehen wäre. Erst ab einem Alpha-Cut von $\alpha > 0,25$ wäre wiederum die konventionelle Bauweise zu empfehlen.

8.3.2 Phase 2-2: Risikobasierte Bewertung

Das Entscheidungsmodell hat die Möglichkeit, unsichere und somit risikobehaftete quantitative Größen zu berücksichtigen. Nach den Ausführungen in Kapitel 6 fiel die Wahl auf die Nutzung der Monte-Carlo-Simulation als quantitative Risikoanalysemethode, da diese eine der gebräuchlichsten stochastischen Risikomethoden ist, um verschiedene mögliche Szenarien zu evaluieren. Dabei wird die Methode zur Ermittlung der Verteilung einer stochastischen Ergebnisgröße genutzt.

Wie bereits in Kapitel 6 erwähnt, soll das DEMUS unter anderem auch wirtschaftliche Zusammenhänge beinhalten, die auf monetärer Basis gegründet sind. Die Vorgehens-

weise kann dabei grundsätzlich variieren, wobei hier die fünf Verfahrensschritte nach [14, S.243ff.] sowie die Arbeit von Hertz [80] genutzt werden sollen.

Die ersten beiden Schritte des Ablaufs sind zeitlich in der Phase ‚Analyse unscharfer und risikobasierter Größen‘ einzuordnen, werden aber im Rahmen dieses Punktes intensiver erläutert. Nach den Ausführungen in Kapitel 6 ist zunächst die Menge der Variablen zu bestimmen, die das Resultat der Analyse ergeben sollen. Darauf aufbauend sind die unsicheren Größen zu ermitteln, welche in einem weiteren Schritt als stochastische Einflussgröße definiert werden. Diese Größen werden im zweiten Schritt mit Hilfe einer zu wählenden Wahrscheinlichkeitsverteilung quantifiziert. Die Quantifizierung kann auf zwei unterschiedliche Methoden erfolgen. Es lassen sich Wahrscheinlichkeitsverteilungen aufgrund verfügbarer Daten schätzen. Dazu ist es notwendig, dass sämtliche Projektbeteiligte Daten aus bereits abgeschlossenen und ähnlichen Projekten zur Verfügung stellen. Mit Hilfe solcher Datenbanken ist die Nutzung dieser Methode möglich. Sind keine Daten verfügbar, so sind die Verteilungen ebenfalls aufgrund von Expertenmeinungen zu schätzen.

Im dritten Schritt werden die Abhängigkeiten zwischen den Eingangsgrößen geschätzt, damit bei der anschließenden Simulation nur realistische Szenarien generiert werden. Bezogen auf die unterirdische Infrastruktur bedeutet dieser Schritt, dass bspw. eine lange Projektdauer hohe Projektkosten verursacht, so dass Szenarien unrealistisch sind, die z.B. eine lange Projektdauer, jedoch geringe Kosten aufweisen. Solch eine Ergebnishäufigkeitsverteilung würde das Ergebnis stark verfälschen, was genauso zu einer Verfälschung der Entscheidung führen könnte.

Im vorletzten Verfahrensschritt findet die MCS z.B. mit Hilfe des Risikoanalyseprogramms @RISK von PALISADE ihre Anwendung, in welcher eine bestimmte Anzahl von Simulationsdurchläufen stattfindet. Für die Durchläufe werden für sämtliche stochastische Eingangsgrößen zufallsbasierte Werte erzeugt, welche miteinander verknüpft werden. Das Ergebnis stellt schließlich eine mögliche Wertausprägung der Ergebnisgröße dar, wobei in der Regel einige hundert (bis zehntausend) Simulationsdurchläufe geführt werden müssen, um zu einer empirischen Häufigkeitsverteilung der Ergebnisgröße zu gelangen. Die Analyseergebnisse werden in Form von Dichte- und Verteilungsfunktionen grafisch dargestellt. @RISK ist ein Add-In für Microsoft Excel, so dass @RISK sich ohne großen Aufwand in bestehende Kalkulationstabellen integrieren lässt. Das Add-In verwendet die Simulationsmethode ‚Monte Carlo‘, um alle in einer gegebenen Situation möglichen Ergebnisse anzuzeigen. Dabei erfolgt dieses Analyse in drei Schritten.

1. Das Berechnungsmodell wird in Excel abgebildet.
2. Die unbestimmten bzw. unsicheren Größen werden durch @RISK-Wahrscheinlichkeitsverteilungen ersetzt, so dass für diese bestimmten Zellen ein Bereich von verschiedenen möglichen Werten dargestellt wird.

3. Im dritten Schritt wird das Modell durch Simulation analysiert, d.h. dass @RISK das Kalkulationsmodell in vielen Simulationsschritten durchrechnet, so dass ein gesamter Bereich der möglichen Ergebnisse errechnet wird.

Der fünfte Verfahrensschritt besteht darin, die Verteilungen pro Entscheider auszuwerten und auf Plausibilität zu prüfen. Wichtig hierbei ist die Risikoeinstellung des Entscheiders, das heißt, ob es sich um einen risikoscheuen oder risikofreudigen Entscheider handelt. Folglich können unterschiedliche Schlussfolgerungen aus den Verteilungen gezogen werden, so dass risikoscheue Entscheider geringe, wohingegen risikofreudige Entscheider größere Streuungen der Ergebnisse akzeptieren.

Der Vorteil bei der Nutzung von @RISK liegt in der bereits erwähnten grafischen Ergebnisdarstellung. Interessant ist dabei nicht nur die Verteilung der Ergebnisse, sondern auch das Analysieren von Best- und Worst-Case Szenarien, obgleich deren Eintrittswahrscheinlichkeiten sehr gering sind. Gerade durch die Generierung von Dichtefunktionen ist die Eintrittswahrscheinlichkeit jedes Ergebnisses abzulesen, so dass jedes Szenario in das Entscheidungsmodell untersucht werden kann.

Beispielhaft sei folgender Sachverhalt kurz dargestellt: Es wird untersucht, welches Bauverfahren lediglich hinsichtlich der Kosten und unter Berücksichtigung der risikobehafteten Größen am ehesten geeignet ist. Die Projektgruppe entscheidet sich dafür, eine Monte-Carlo-Simulation für die beiden Bauverfahren durchzuführen. Zuvor wurden klassische Kalkulationen für beide Verfahren vorgenommen. Alternative A wurde mit ca. 600.000 € und Alternative B mit ca. 700.000 € kalkuliert. Ohne Nutzung einer MCS würde die Entscheidung aufgrund der geringeren Kosten auf Alternative A fallen. Bei Durchführung der Simulation können nunmehr verschiedene Szenarien untersucht werden: Unterschieden wird in Szenarien, die erwartungsgemäß (Wahrscheinlichkeit $p=50\%$), besser als erwartet (Wahrscheinlichkeit $p=5\%$) und schlechter als erwartet (Wahrscheinlichkeit $p=95\%$) abgeschnitten haben. Durch Nutzung der Quantile $Q_{0,05}$ sowie $Q_{0,95}$ (5%- sowie 95%-Quantile) lassen sich Randbereiche von einzelnen Verteilungen ausschalten, da diese oftmals mit Ungenauigkeiten versehen sind, die ein Ergebnis schnell verfälschen können. Die Abbildungen 58 und 59 zeigen die fiktiven Ergebnisse der Simulation für beide Alternativen.

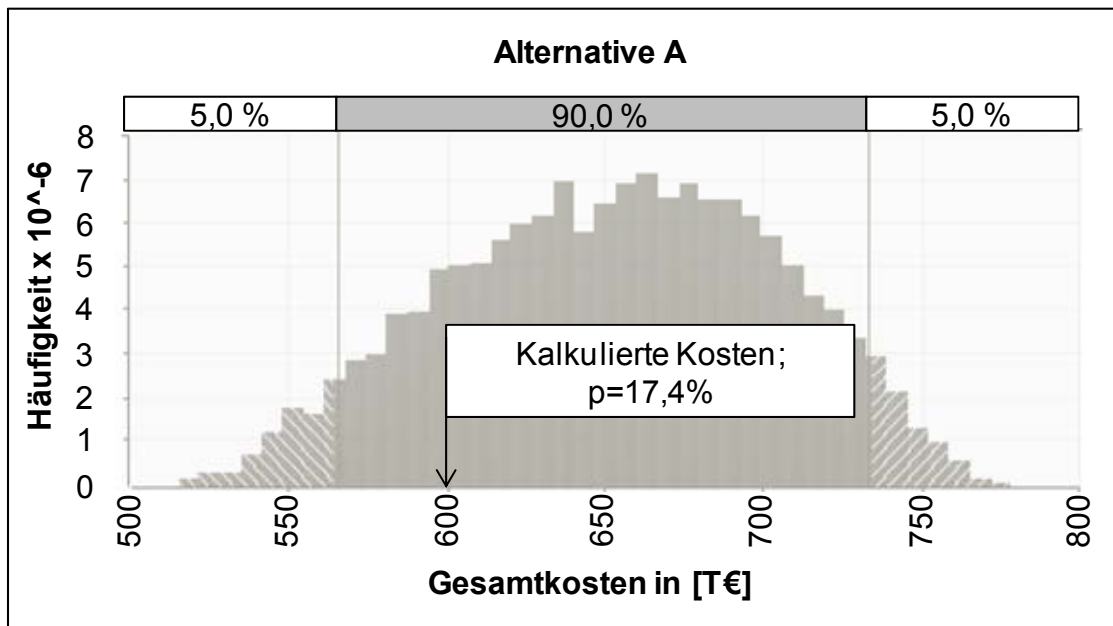


Abbildung 58: Dichtefunktion der Alternative A nach einer MCS

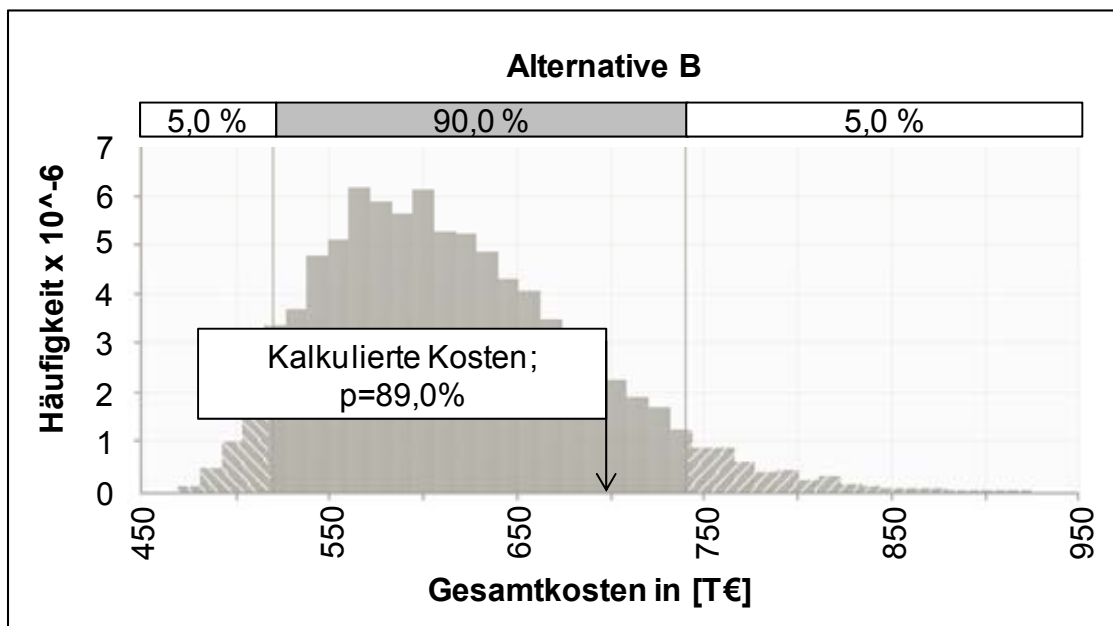


Abbildung 59: Dichtefunktion der Alternative B nach einer MCS

Die kalkulierten Kosten der Alternative A werden mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 17,4% auftreten, wohingegen für Alternative B eine weitaus höhere Wahrscheinlichkeit für das nicht Überschreiten der kalkulierten Kosten von ca. 89% gelten wird. Für die Entscheider bedeutet dieser Sachverhalt, dass eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit (11%) existiert, dass die Kosten bei Alternative B höher als 700.000 € ausfallen werden. Das Ergebnis zeigt darüber hinaus, dass die Wahrscheinlichkeit sehr groß ist, dass die Kosten für Alternative B sich sogar zwischen 560.000€ und 660.000€ belaufen werden, und somit unterhalb der vorab kalkulierten Summe liegen. Analog dazu belaufen sich die Kosten für Alternative A im Bereich zwischen 640.000 € bis 720.000 €. Schließlich lässt

sich festhalten, dass die Durchführung der MCS grundsätzlich von Experten durchgeführt werden sollte. Erst in einem weiteren Schritt sind die Risikoeinstellungen der einzelnen Entscheider festzulegen, um die Ergebnisse in das Entscheidungsmodell zu implementieren. Die einzelnen Schritte zur Vorgehensweise im Zuge dieser Phase sind zusammenfassend in Abbildung 60 grafisch dargestellt.

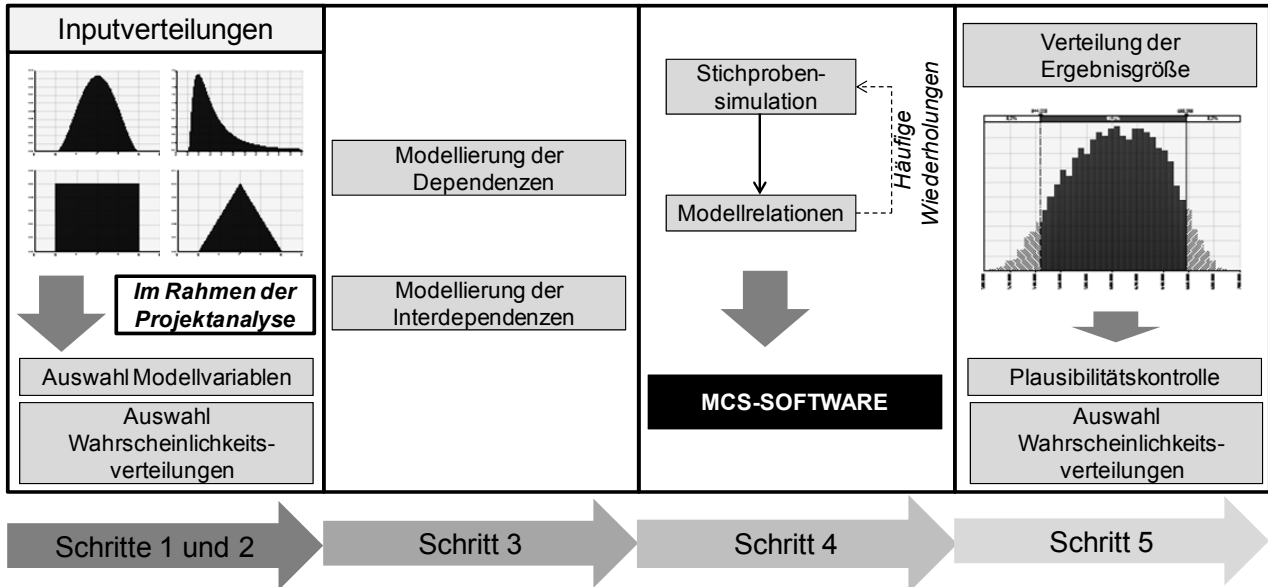


Abbildung 60: Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse im Zuge der risikobasierten Datentypanalyse

8.3.3 Phase 2-3: Sonderfall der fuzzybasierten Bewertung

Die Nutzung eines fuzzybasierten Entscheidungsmodells setzt im Prinzip voraus, dass sowohl die Eingabewerte als auch die Ausgabewerte bzw. das Gesamtergebnis in einer fuzzyfizierten Form ausgegeben werden. Dennoch stellt sich die Frage, wie Daten behandelt werden müssen, die bspw. keiner Messungenauigkeit unterliegen und demnach exakt und scharf sind, oder wenn scharfe Dichtefunktionen, welche in der risikobasierten Bewertung berechnet wurden, in das fuzzybasierte Entscheidungsmodell integriert werden müssen. Dazu muss der sowohl scharfe qualitative (9-Punkt-Skala) als auch scharfe quantitative Wert fuzzyfiziert werden, da eine Vermischung von scharfen und unscharfen Daten gegen mathematische Konventionen stößt. Nutzt man erneut Chengs-Theorie, so lässt sich feststellen, dass für jedes α und λ stets ein einziger Funktionswert gelten muss. Im Prinzip lässt sich festhalten, dass scharfe exakte Werte in der Fuzzy-Theorie als eine Singleton-Funktion dargestellt werden können, wie die Untersuchungen in Kapitel 6 bereits gezeigt haben. Der Vorteil dieser Darstellung ist, dass stets für beliebige bzw. für alle Alpha-cuts ein Wert, nämlich x_0 gilt. Analog dazu gilt, dass der Optimismus-Index λ ebenfalls keinen Einfluss auf x_0 hat. Demnach gilt:

$$\forall \alpha \in [0, 1] \text{ und } \forall \lambda \in [0, 1] = \mu(x) = x_0 \tag{Gl. 8-6}$$

Abschließend lässt sich somit festhalten, dass scharfe quantitative Daten sowie qualitative Werte stets fuzzyfiziert werden müssen, um diese in das Entscheidungsmodell zu integrieren, wobei scharfe Werte über die Darstellung als Singleton-Funktionen quasi fuzzyfiziert werden, ohne dabei ihre Exaktheit zu verlieren. Schließlich gilt, dass ein scharfer Wert stets einen Sonderfall einer Fuzzy-Funktion darstellt, nämlich dann, wenn α und λ exakt 1 entsprechen. Das Ergebnis resultierend aus der risikobasierten Bewertung sollte etwas genauer betrachtet werden. Hier wird, wie in den Abbildungen 59 und 60 beispielhaft gezeigt, eine Vielzahl an scharfen Einzeldaten in Form von Dichtefunktionen dargestellt. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, beinhaltet diese Analyse eine Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeiten. Das Ergebnis als Form einer Dichtefunktion sagt aus, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Wert eintreten kann. Unter Angabe einer frei zu wählenden Wahrscheinlichkeit lässt sich nunmehr exakt ein scharfer Wert ermitteln, der im nächsten Schritt wiederum mit Hilfe der Singleton-Funktion fuzzyfiziert wird. Ein Anwender kann unter Nutzung verschiedener Wahrscheinlichkeiten jeden Wert der Dichtefunktion fuzzyfizieren und in das Entscheidungsmodell implementieren. Beispielhaft sei in folgender Abbildung 61 visualisiert, wie ein Anwender den Wert mit der Wahrscheinlichkeit $p=17,4\%$ untersucht. Dieser Wert wird in einem nächsten Schritt als Singleton-Funktion dargestellt, so dass eine Implementierung in das Modell erfolgen kann.

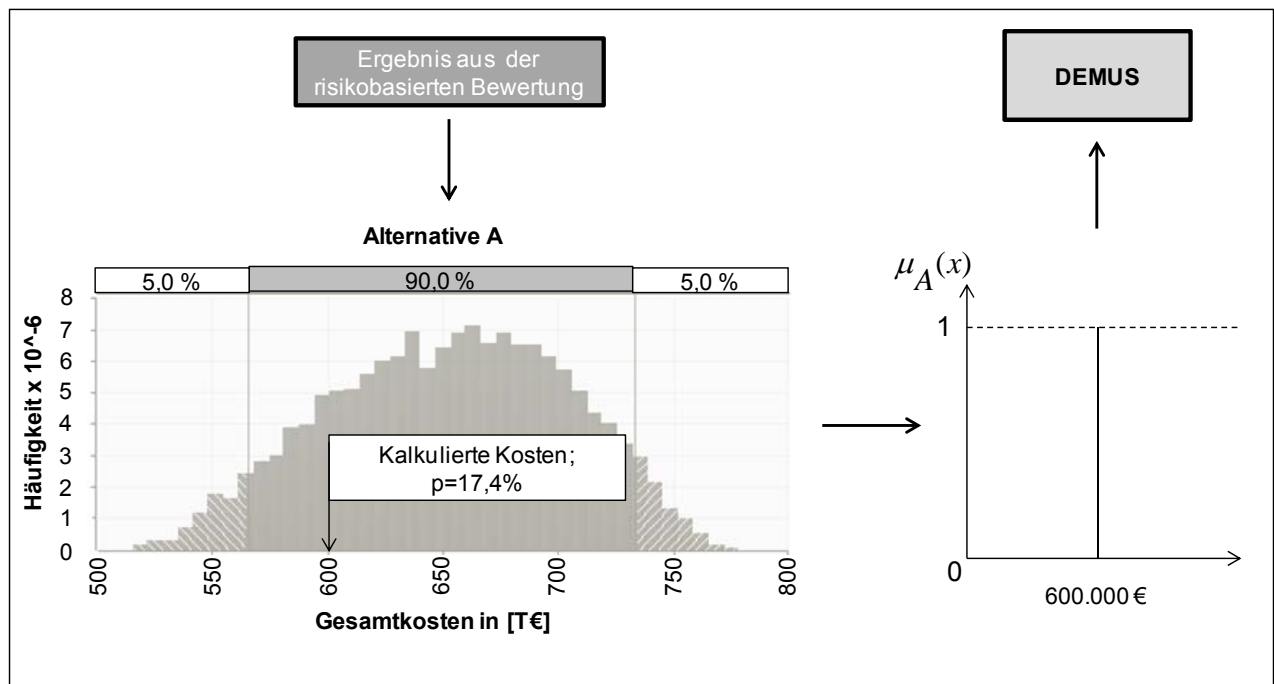


Abbildung 61: Beispiel einer Fuzzyfizierung eines Wertes aus der risikobasierten Bewertung

8.4 Phase 3: DEMUS² - Risiko -und fuzzybasierte Software-Analyse

Die Ergebnisse bzw. Voruntersuchungen aus allen Phasen werden in der letzten Phase miteinander verknüpft, wobei alle Bewertungen im Rahmen dieser Software erstmals durchgeführt werden. Insgesamt ist der klassische Entscheidungsprozess in zwei Schritte unterteilt. Der erste Schritt besteht darin, sämtliche Kriterien zu bewerten, um die Rangfolge bzw. Relevanz der Kriterien untereinander zu ermitteln. Im zweiten Schritt erfolgt die Bewertung der Kriterien hinsichtlich der Alternativen. Hierzu können klassische quantitative Daten oder die qualitative AHP-Skala genutzt werden.

8.4.1 Software DEMUS² - Version 1.0

Im Zuge des Forschungsprojekts [179] wurde eine solche Software programmiert, die es Entscheidern ermöglichen sollte, eine transparente und ganzheitliche, multikriterielle Bewertung vornehmen zu können. Die mathematische Basis wurde bereits in Kapitel 5 ausführlich erläutert. Die Entwicklung dieser Software wurde nach dem Abwägen aller Vor- und Nachteile in der Excel-Umgebung vorgenommen. Gründe hierfür waren zum einen der weitverbreitete Einsatz von Microsoft Excel sowie die Einfachheit der Programmiersprache VBA. Im weiteren Verlauf der Programmierung und gleichzeitigen Einsatz der Software an verschiedene Projekte haben sich mehrere Defizite gezeigt, die schließlich im Rahmen dieser Arbeit zu einer Neuprogrammierung führten. Wichtige Indikatoren dafür waren zum Beispiel:

- Eine lange und nutzerunfreundliche Berechnungsdauer,
- eine teilweise fehlende Gewährleistung einer dynamischen Ausrichtung, vor allem beim Entfernen und Hinzufügen von Kriterien,
- die fehlende Programmierung von Schnittstellen zu anderen Programmen, so dass z.B. Risikoanalyseergebnisse nicht direkt integriert werden konnten,
- eine fehlende Fuzzyfizierung über wechselnde Intervalle,
- eine fehlende Sensitivitätsanalyse für die Variation des Alpha-Cuts sowie Optimismus-Index,
- die nicht ideale Darstellung graphischer Oberflächen,
- fehlende Implementierungsmöglichkeiten von quantitative Fuzzyfunktionen,
- das Resultat, dass die Bewertungen auch dann durchgeführt werden mussten, obwohl den Entscheidern von Beginn an klar war, dass die Gewichtungen gleichverteilt sind. Gerade dieser Punkt führte zu einem sehr hohen Arbeitsaufwand.

8.4.2 Software DEMUS²-Version 2.0

Die Software DEMUS² wurde eigens für diese Arbeit in der Softwaresprache ‚Java‘ programmiert. Die Software ist dahingehend ausgelegt, dass eine Vielzahl an Kriterien und

Alternativen integriert werden können. Insgesamt verfügt die Software über drei Kriterienebenen, wobei jede Unterebene beliebig viele Sub-Kriterien beinhalten kann. Um eine schnelle und effektive Bewertung zu erhalten, sind jedoch pro Kriteriengruppe maximal sechs Kriterien festzulegen. Eine Erhöhung der Kriterien würde zu insgesamt inkonsistenteren Ergebnissen führen, da bereits bei 7 Kriterien insgesamt 21 Paarvergleiche vorgenommen werden müssten, was für den Entscheider zu einem erhöhten Aufwand führen würde. Im Folgenden sollen kurz die wichtigsten Eingabe- sowie Analyse-möglichkeiten und Verbesserungen aufgezeigt werden.

8.4.2.1 Eingabe und Erstbewertung der Kriterien und Alternativen

Für eine schnelle Bearbeitung der Entscheidungsproblematik ist es wichtig, dass Kriterien und Alternativen ohne große Schwierigkeiten eingegeben werden. Entscheidend dabei ist, dass Kriterien und Alternativen bereits bei der Eingabe gleichverteilt bewertet werden, um den Arbeitsaufwand erheblich zu verringern. Gleichzeitig soll über einen Kriterienbaum sichergestellt sein, dass alle Kriterien implementiert wurden. Die dynamische Ausrichtung wurde dahingehend verbessert, dass beim Hinzufügen oder Entfernen eines Kriteriums oder einer Alternative die ursprüngliche Bewertung direkt gelöscht und eine erneute Gleichverteilung der Gewichtung stattfindet. Auf diese Weise ist die Software im gesamten Betrachtungszeitraum einsetzbar.

Eine weitere Vereinfachung wurde ebenfalls für die qualitative Bewertung der Kriterien und Alternativen programmiert. Der AHP nutzt für qualitative Vergleiche die 9-Punkte-Skala, so dass qualitative Bewertungen stets mit Paarvergleichen durchgeführt werden müssen. Gerade wenn viele Kriterien miteinander verglichen werden, kann es zu arbeitsintensiveren Abläufen und sogar zu Inkonsistenzen kommen. Folglich hat der Entscheider die Möglichkeit, seine Verteilungen (basierend auf 100%) direkt manuell zu vergeben, ohne die 9-Punkte-Skala zu nutzen. Hierbei sei jedoch angemerkt, dass eine nachträgliche Fuzzyfizierung dieser Werte nicht mehr möglich ist. Eine Fuzzyfizierung findet nur für die Nutzung der 9-Punkte-Skala statt. In folgender Abbildung 62 ist die Eingabemaske für die Kriterien und Alternativen zu betrachten.

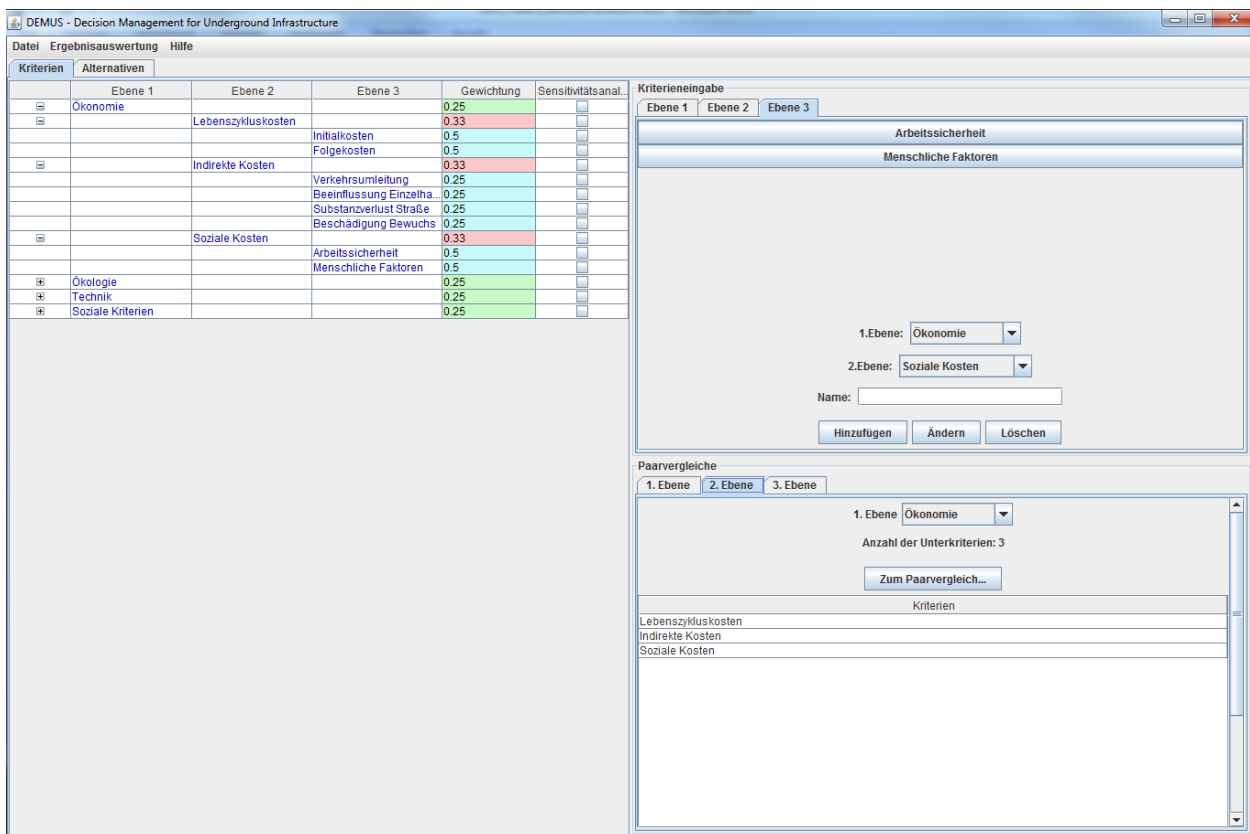


Abbildung 62: Screenshot DEMUS²; Fuzzyfizierung scharfer qualitativer und quantitativer Daten

8.4.2.2 Qualitative Bewertung mit DEMUS²

Die Gewichtung der Paarvergleiche aller Kriterien nach der Methodik des AHP wird als erstes durchgeführt. Dazu wird die betreffende Kriteriengruppe ausgewählt, die einem paarweisen Vergleich unterzogen werden soll. In Abbildung 63 ist beispielhaft ein Paarvergleich einer Kriteriengruppe dargestellt. Der Anwender wählt zunächst den Paarvergleich aus und vergibt eine Bewertungszahl. Je nachdem welches Kriterium wichtiger ist, wird entweder eine ‚rote‘ Ziffer gewählt (d.h. das Kriterium, welches links steht, ist wichtiger als das rechte Kriterium), oder eine ‚grüne‘ Ziffer (d.h. das Kriterium, welches rechts steht, ist wichtiger als das linke Kriterium). Sind beide Kriterien gleich wichtig, so wird der Vergleich mit der Ziffer ‚1‘ bewertet. Sind sämtliche Paarvergleiche durchgeführt, startet die Berechnung, so dass für diese Kriteriengruppe ein normiertes Ergebnis ermittelt wird. Nach den klassischen Regeln des AHP erhält der Entscheider ein scharfes normiertes Ergebnis.

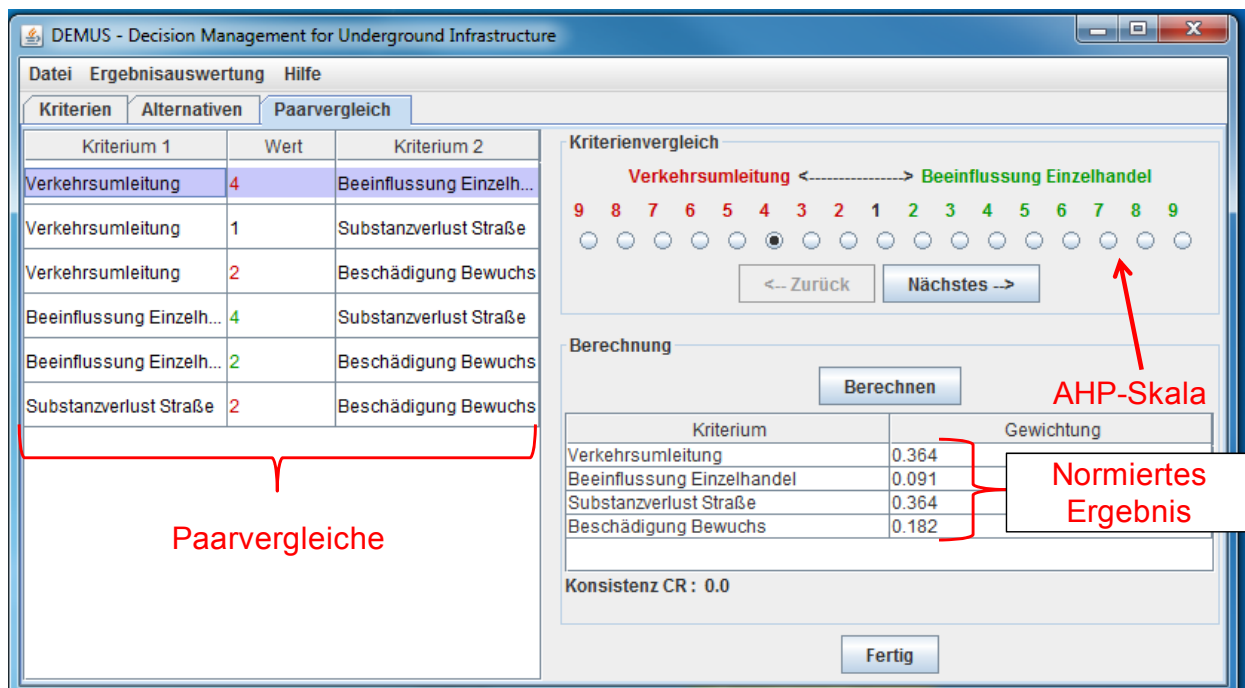


Abbildung 63: Screenshot DEMUS²; Bewertung der Paarvergleiche in DEMUS²

Im Hintergrund der Software ist der Algorithmus komplexer angelegt. Da es sich um ein fuzzybasiertes Bewertungsmodell handelt, wird jede Bewertung im Hintergrund in eine fuzzybasierte qualitative Berechnung umgerechnet.

8.4.2.3 Quantitative Bewertung mit DEMUS²

Die quantitative Bewertung findet erstmals in den Paarvergleichen der Alternativen hinsichtlich der Kriterien statt. DEMUS² vereint in dieser Phase drei unterschiedliche Eingabemöglichkeiten von bestehenden Daten, wobei stets zu unterscheiden ist, ob Daten ‚positiv‘ oder ‚negativ‘ bewertet werden. Die Auswahl ‚positiv‘ bedeutet, dass im Zuge einer Untersuchung maximale Werte gesucht werden. Je höher ein Wert ist, desto höher ist auch sein Nutzen. Für eine Betrachtung der minimalen Werte einer Bewertung (‚negativ‘), werden Werte untersucht, die bei höheren Werten einen niedrigen Nutzen haben.

Nutzung von scharfen Eingabedaten:

Diese Eingabemöglichkeit berücksichtigt die klassische AHP-Eingabe. Vorhandene Daten können exakt in die dafür vorgesehenen Felder eingegeben werden. Zu beachten ist dabei, dass der Nutzer sich über die Exaktheit der Daten sicher sein muss. Gemäß den Ausführungen in Kapitel 4 werden die Verhältnisse ermittelt, so dass ein normiertes Ergebnis bestimmt wird (Abbildung 64). Dieses augenscheinlich scharfe Ergebnis wird im Hintergrund der Software als ‚Sonderfall der fuzzybasierten Bewertung‘ behandelt, welches zu einer Singleton-Fuzzy-Funktion umgerechnet wird.

Eingabe ,scharf'

Eingabe der Daten

Normiertes Ergebnis

Zu bewertende Kriterien

Alternative	Gewichtung
Alternative 1	0.545
Alternative 2	0.273
Alternative 3	0.182

Abbildung 64: Screenshot DEMUS²; Eingabe von scharfen Eingangsdaten

Nutzung von unscharfen Eingabedaten:

Die Nutzung von unscharfen Daten (bspw. Messungenauigkeiten, Toleranzen, Schätzungen usw.) kann mit dem zweiten Optionspunkt gestartet werden. Bei Wahl dieser Option wird die fuzzybasierte Berechnung aktiviert und genutzt. Als Eingabewert wird grundsätzlich für jede Alternative zunächst ein Referenzwert gewählt. Mit Hilfe dieses Wertes wird eine fuzzyfizierte Dreiecks-Funktion gebildet. Dazu hat man die Möglichkeit entweder einen oberen und unteren Grenzwert, oder ein Intervall zu vergeben (siehe Abbildung 65). Somit besteht die Möglichkeit nicht nur gleichschenklige Fuzzy-Mengen zu bilden. Analog zu den Ausführungen der fuzzybasierten Berechnung werden unter Be-

rücksichtigung des Alpha-Cuts und des Optimismus-Index sämtliche Werte der Fuzzy-Funktionen ermittelt und in eine Datenbank gespeichert.

The screenshot shows the DEMUS software interface. The main workspace is titled '3. Ebene' and 'Initialkosten'. It features a 'Referenzwert' section with input fields for 'oberer Grenzwert' (1000.0), 'unterer Grenzwert' (1500.0), and 'Gewichtung' (300.0). The 'fuzzy' option is selected. A 'Berechnen' button is visible. Below the input fields is a table showing 'Normiertes Ergebnis' for three alternatives: Alternative 1 (0.545), Alternative 2 (0.273), and Alternative 3 (0.182). On the right, a list of criteria is shown, including 'Soziale Kriterien', 'Natur', 'Bauzeit', 'Baulogistik', 'Baugrund', 'Initialkosten', 'Folgekosten', 'Verkehrsumleitung', 'Beeinflussung Einz...', 'Substanzverlust Str...', 'Beschädigung Bew...', 'Arbeitsicherheit', 'Menschliche Faktor...', 'Erschütterungen', 'Lärm', 'Luftverunreinigungen', 'Grundwasserabsen...', 'Grundwasserbelast...', 'Oberflächenwasser', 'Sonderabfälle', 'Deponieraum', 'Bodenaushub', 'Energieverbrauch', 'Ausbruchmaterial', 'Flächenanspruch...', 'Verbrauch min./nat...', 'Geländeverformung', and 'Veränderung Boden...'. Red callouts point to the 'fuzzy' option, the data input fields, the 'Normiertes Ergebnis' table, and the criteria list.

Option ,fuzzy'

Eingabe der Daten

Normiertes Ergebnis

Zu bewertende Kriterien

Option ,fuzzy'

Ermittlung klassisches AHP-Ergebnis über den Referenzwert

Klassisches Ergebnis

Fuzzybasierte Datenstrukturanalyse

Fuzzyfiziertes Ergebnis

Berechnung im Hintergrund und Erstellung einer Datenbank für alle α und λ

Abbildung 65: Screenshot DEMUS²; Eingabe von unscharfen Eingangsdaten

Nutzung von unsicheren risikobasierten Eingabedaten:

Sind für die Bewertung unsichere risikobasierte Daten vorhanden, so können in diesem Fall zwei Untersuchungen durchgeführt werden. Liegen der Projektgruppe bspw. Kalkulationen vor, die klassisch durch ein Intervall ausgedrückt werden (Minimum- und Maximumwerte), so werden diese Daten direkt in die Software eingegeben. Wurde jedoch eine quantitative Risikoanalyse in Form einer MCS durchgeführt, so können die Ergebnisse aus dieser Simulation direkt in die Software eingelesen werden. Hierzu wurde

eine Schnittstelle zu der Software @RISK programmiert, die es ermöglicht, die Dichtefunktionen direkt in DEMUS² einzufügen. Dabei kann der Anwender ebenso den kalkulierten Wert verwenden, der für eine klassisch scharfe Betrachtung genutzt wird. Damit der Entscheider ein fuzzyfiziertes Ergebnis erhält, müssen die Daten für beide Untersuchungsoptionen zu Fuzzy-Singleton-Funktionen transformiert werden (Abbildung 66).

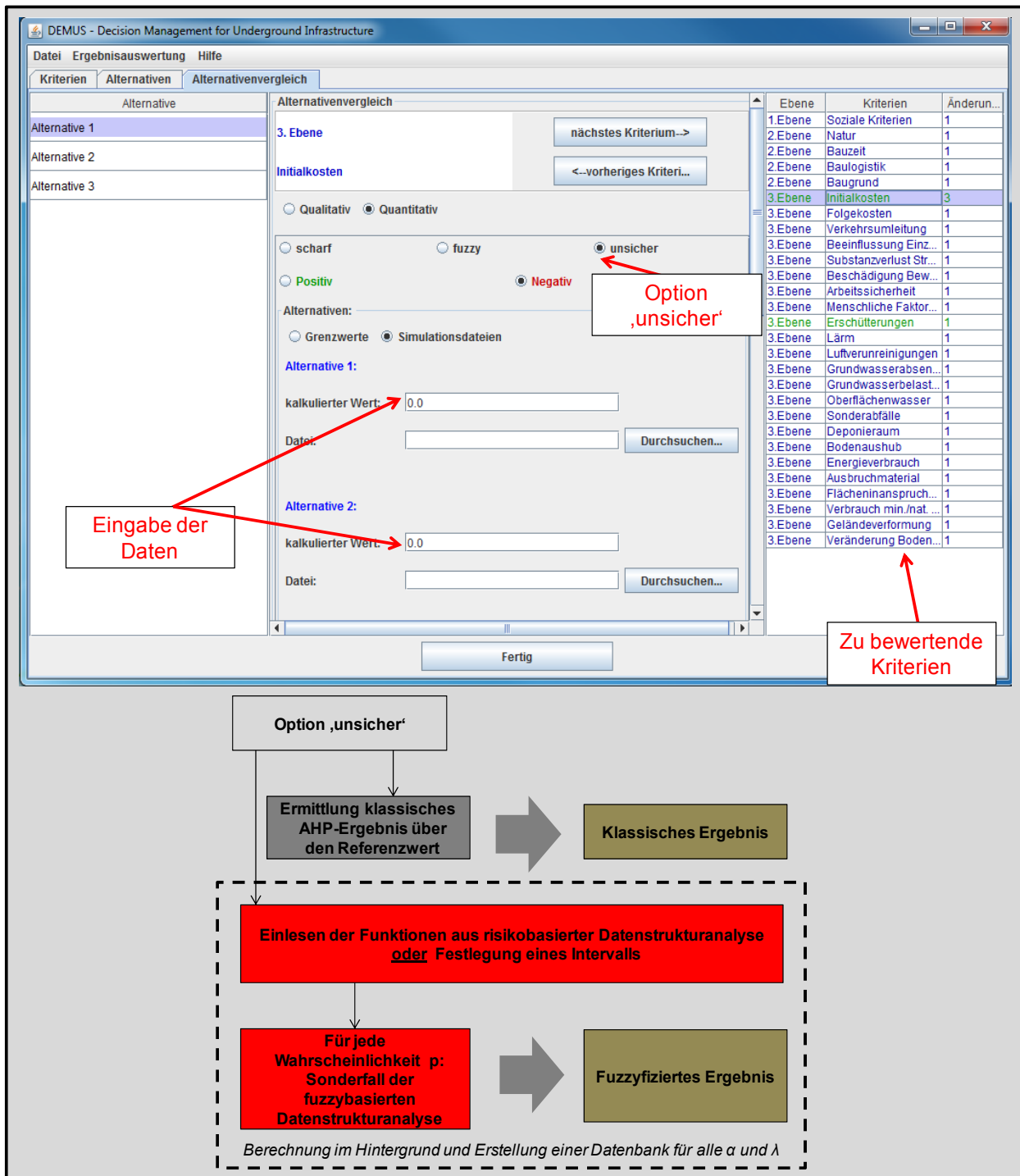


Abbildung 66: Screenshot DEMUS²; Eingabe von risikobasierten Simulationsdateien und Intervallen

8.4.2.4 Ergebnisauswertung

Nachdem sämtliche Daten eingegeben und Bewertungen durchgeführt wurden, stellt die Ergebnisauswertung die Option dar, weitere Analysemöglichkeiten vorzunehmen. Die Option bietet zunächst die Möglichkeit, die Kriterien- sowie Alternativenvergleiche zu fuzzyfizieren. Dabei können entweder alle Kriterienvergleiche, alle Alternativenvergleiche, alle Kriterien- und Alternativenvergleiche oder benutzerdefinierte Vergleiche fuzzyfiziert werden. Werden die ersten drei Optionen ausgewählt, so wird für sämtliche zu fuzzyfizierende Vergleiche stets der gleiche Optimismus-Index λ herangezogen. Eine Vermischung unterschiedlicher λ -Werte ist im Zuge dieser Optionen nicht gegeben. Wird jedoch die Option ‚Benutzerdefiniert‘ ausgewählt, so ergibt sich hier die Möglichkeit zu entscheiden, welche Kriteriengruppen sowie Alternativenvergleiche fuzzyfiziert werden sollen. Zusätzlich ist die Möglichkeit gegeben, einen genauen λ -Wert zu wählen, falls bestimmte Funktionswerte für die Entscheidung von großer Wichtigkeit sind. Zum besseren Verständnis sei im Folgenden ein kurzes Beispiel aufgeführt.

Beispiel:

Es soll jeweils eine Kriteriengruppe (bestehend aus zwei Kriterien K1 und K2; Bewertung mit ‚1‘), zwei quantitative Fuzzy-Funktionen (je eine Funktion pro Alternative; A1 und A2; Abbildung 67) sowie zwei unsichere risikobasierte Dichtefunktionen (ebenfalls je eine Dichtefunktion pro Alternative; Abbildungen 68 und 69) genauer untersucht werden. Dabei soll nicht die Kriteriengruppe sondern die Fuzzy-Funktionen über ein $\lambda=0$ und die Dichtefunktionen über ein $p=0,5$ bzw. $p=0,8$ fuzzyfiziert werden. Die einzelnen Werte sind dimensionslos und dienen nur zum Verständnis der Ergebnisauswertung.

Die Gesamtbewertung in den Abbildungen 70 und 71 zeigen das Ergebnis in Abhängigkeit des Unschärfegrades (Alpha-Cut). Zu erkennen ist, dass je exakter die Informationen bzgl. der Fuzzy-Funktionen sind, desto eher es zu einem Rangwechsel zwischen den Alternativen kommen kann. Die Entscheidung ist demnach vom Optimismus-Index abhängig, welcher in Fall des Ergebnisses in Abbildung 70 einen pessimistischen Entscheider widerspiegelt. Insgesamt ist das Ergebnis jedoch als stabil einzustufen. Als Vergleich soll das Ergebnis in Abbildung 71 dienen, welches unter Berücksichtigung eines optimistischen Entscheiders ermittelt wurde: Hier ist im Gegensatz zum pessimistischen Entscheider ein Rangwechsel zu erkennen. Der Unterschied der beiden Graphen ist somit lediglich im unterschiedlichen Optimismus-Index der Fuzzy-Funktionen zu finden.

Insgesamt wird deutlich, dass mit Hilfe der benutzerdefinierten Option eine weitaus größere Analysemöglichkeit gegeben ist, so dass mehrere Szenarien genauer analysiert werden können. Folglich sind Entscheidungsverhalten, Qualität der Informationen sowie Wahrscheinlichkeiten genauestens zu überprüfen. Betrachtet man hingegen nur eine scharfe klassische Bewertung (Alternativenvergleiche ‚negativ‘), so wird die Alternative

A1 mit 51,6 % präferiert (A2 mit 48,4%). Daraus lässt sich erkennen, dass durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Analysemöglichkeiten das Ergebnis intensiver interpretiert werden kann.

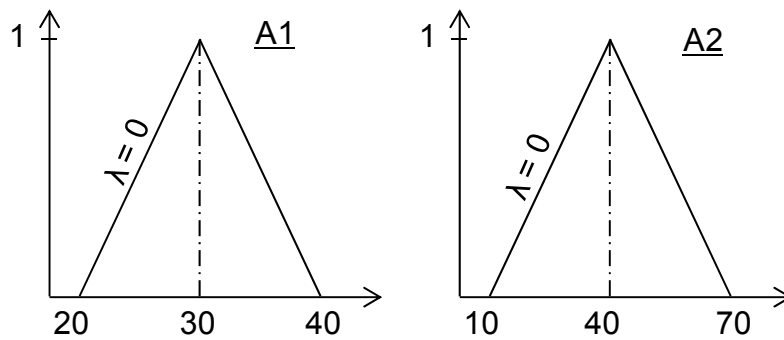


Abbildung 67: Fuzzy-Funktionen für die Alternativen A1 und A2 (Kriterium K1)

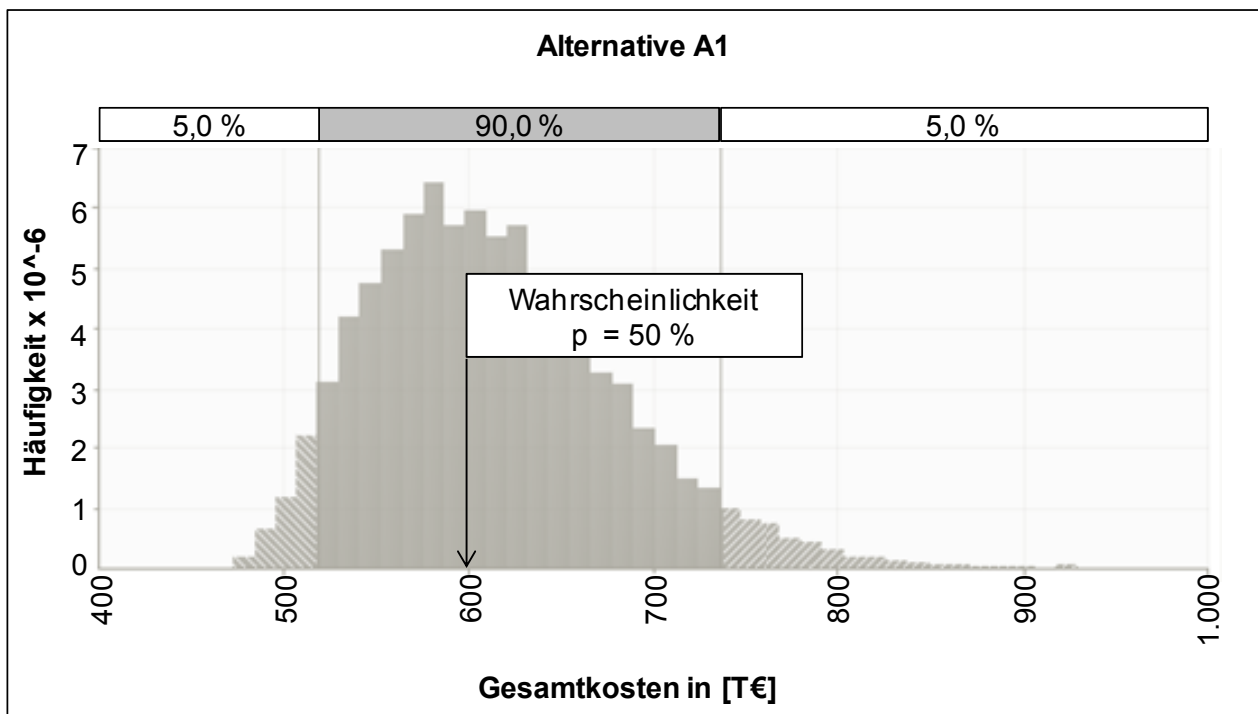


Abbildung 68: Dichtefunktionen für die Alternativen A1 (Kriterium K2)

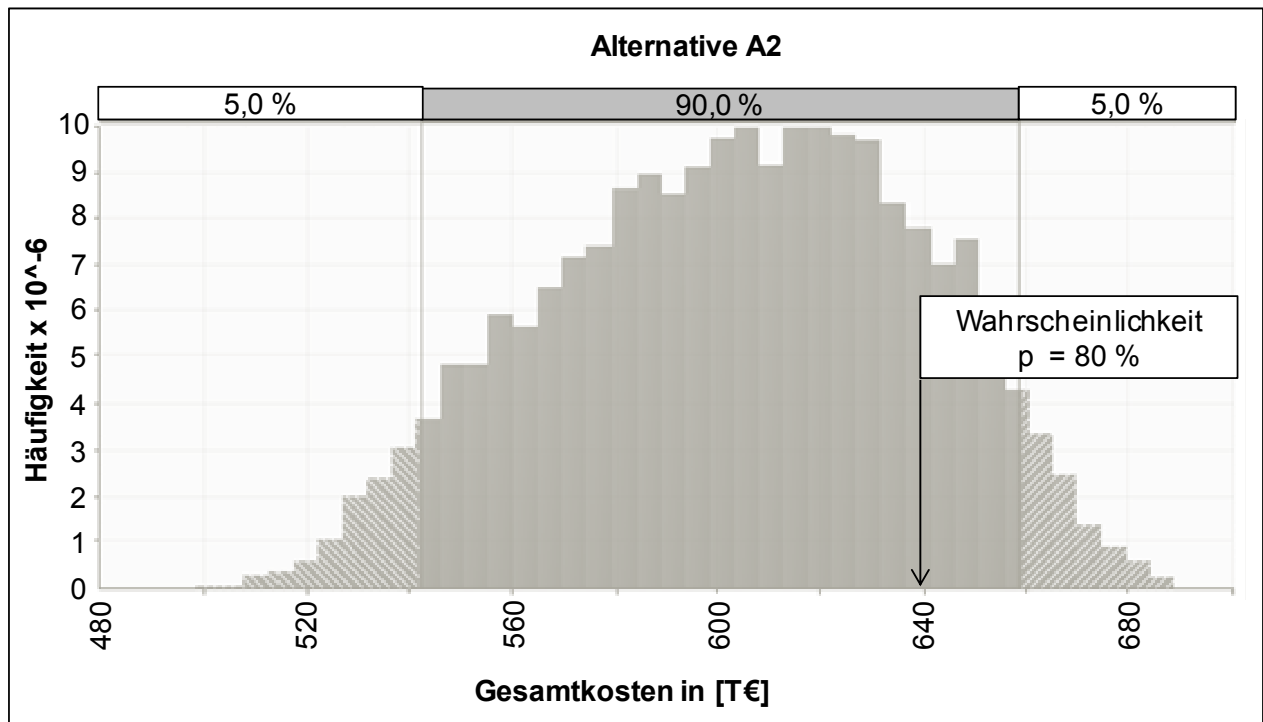
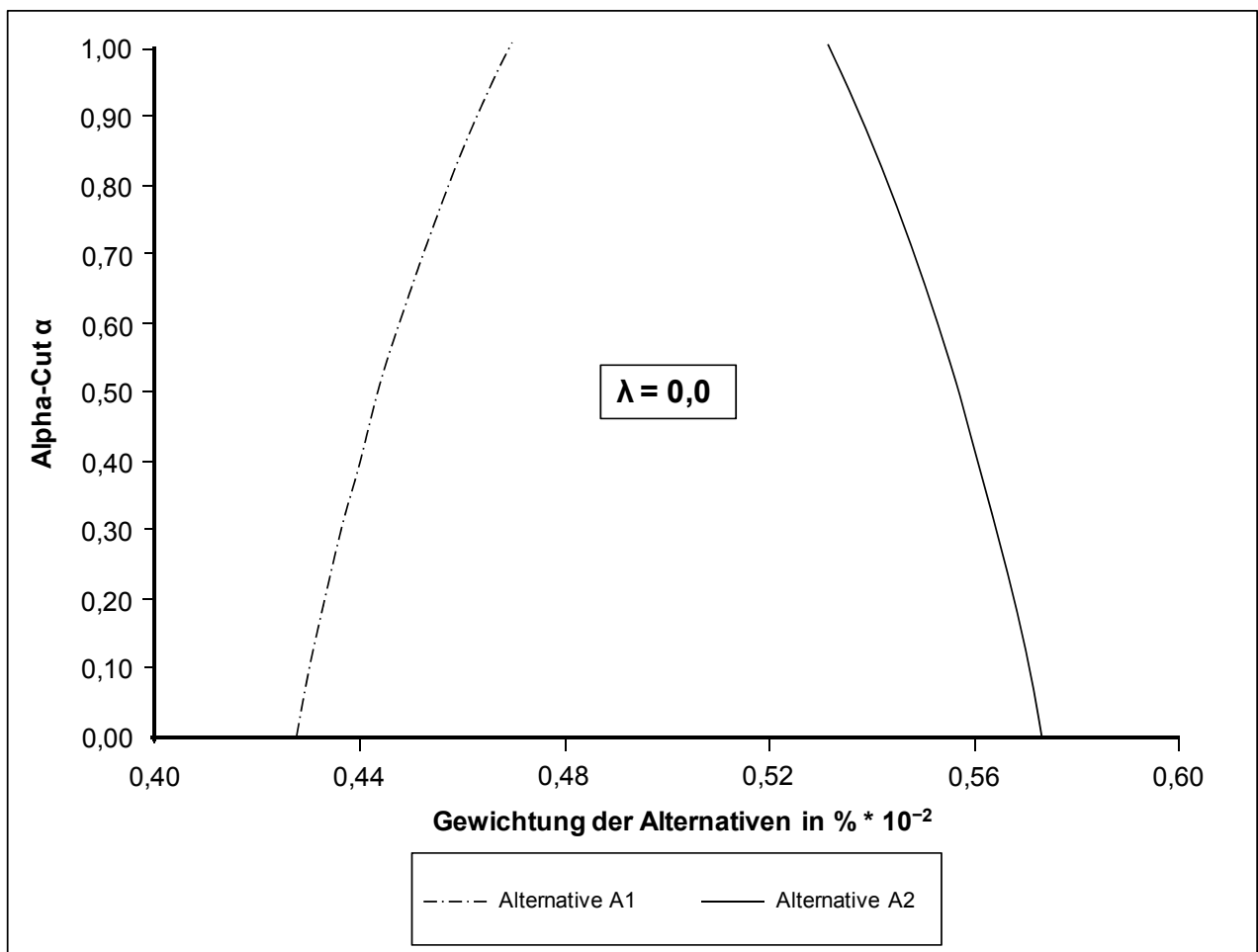


Abbildung 69: Dichtefunktionen für die Alternativen A2 (Kriterium K2)

Abbildung 70: Gesamtgewichtung der Alternativen A1 und A2 für $\lambda = 0,0$

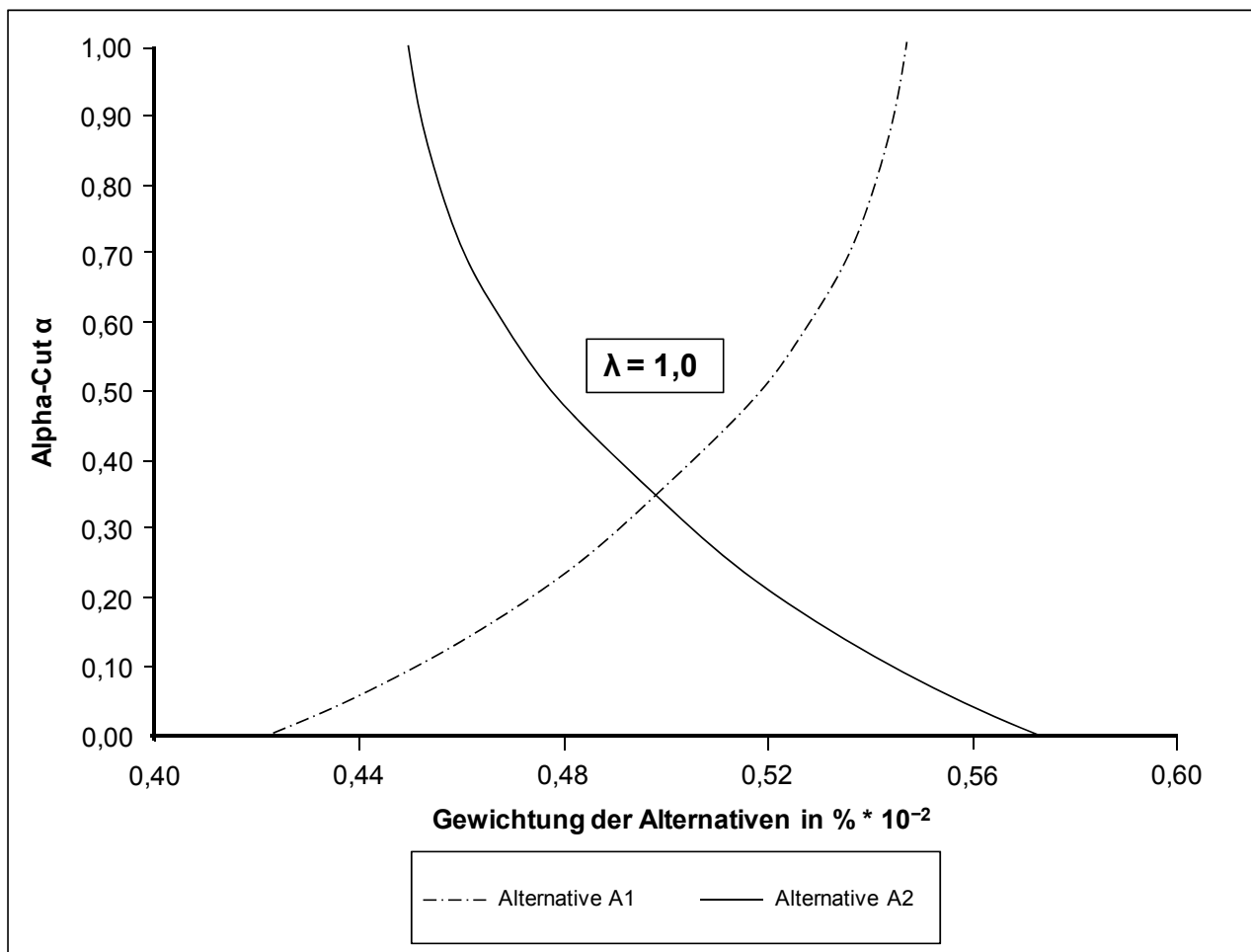


Abbildung 71: Gesamtgewichtung der Alternativen A1 und A2 für $\lambda = 1,0$

8.4.3 Rückschlüsse für Projektbeteiligte

Die erzielten Ergebnisse sind in einem letzten Schritt der gesamten Projektgruppe aufzuzeigen. Dabei gilt abzuklären, ob die Erwartungen oder Ziele gemeinsam erreicht wurden. Sollte der Fall eintreten, dass Projektbeteiligte mit den Ergebnissen nicht einverstanden sind, so müssen neue Ziele geschaffen bzw. vorhandene Ziele erweitert werden. Die prozessartige Struktur der AHP-Methodik stellt in solchen Situationen eine Stärke dar, weil der gesamte Bewertungsprozess erneut bzw. mit veränderten Gegebenheiten durchgeführt werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, die hohen Erwartungen an eine transparente Entscheidung zu erfüllen. Zusätzlich lassen sich Ergebnisse mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen überprüfen. Dabei können sensible Kriterien einer vertieften Analyse unterzogen werden, wobei nicht nur die Gewichtung variabel gestaltet wird, sondern die Qualität der Informationen sowie risikobehaftete Größen optimiert werden.

8.4.4 Verifizierung der Software DEMUS²

Zur Überprüfung der Software wurden mehrere Handberechnungen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde eine fiktive Hierarchie über drei Ebenen erstellt sowie zwei Alternativen berücksichtigt (siehe Abbildung 72). Der erste Schritt bestand darin, den klas-

sischen AHP-Algorithmus zu testen. Dabei wurde die gesamte Bandbreite der AHP-Werte verwendet, um sämtliche Funktionen hinsichtlich ihres Einsatzes zu testen.

In einem zweiten Schritt wurden alle klassischen Paarvergleiche fuzzyfiziert und per Handrechnung erneut überprüft. Der Überprüfungsaufwand wurde sukzessive erhöht bis sämtliche Eingabemöglichkeiten erfolgten (unscharfe qualitative und quantitative sowie risikobasierte Daten, Eingabe der Alpha-Cut-Größen sowie Optimismus-Indizes). Die Gesamtergebnisse wurden mit sämtlichen Handberechnungen verglichen und hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass die Software unter Berücksichtigung der gesamten Theorie vollständig funktionstüchtig ist. Die vollständigen Handberechnungen befinden sich auf dem Datenträger, welcher dieser Arbeit beigelegt wurde.

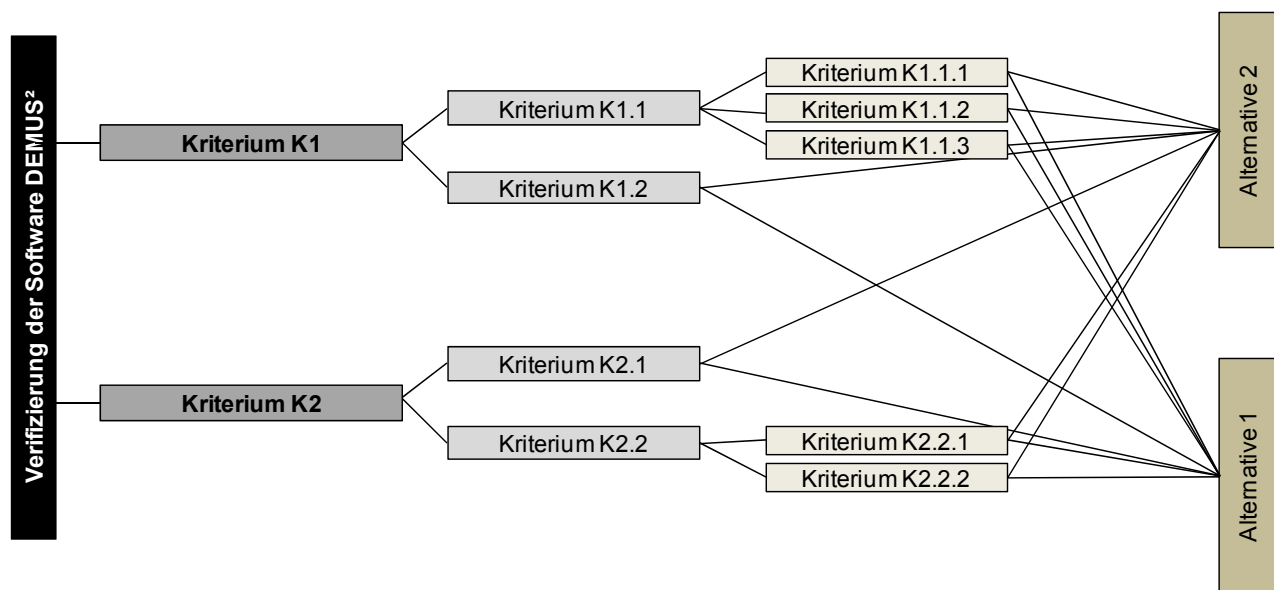


Abbildung 72: Fiktive Hierarchie zur Verifizierung der Software DEMUS²

8.5 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieses Kapitels wurden die erarbeiteten Theorien in ein Entscheidungsmodell überführt. Hauptbestandteil des Modells ist die Betrachtung risikobasierter sowie unscharfer Größen, wobei nicht nur qualitative sondern auch quantitative Aspekte gleichzeitig integriert werden. Das Modell ermöglicht einer Projektgruppe, eine transparente und nachvollziehbare Bewertung durchzuführen, in welcher verschiedene Alternativen hinsichtlich vorab definierter Kriterien untersucht werden.

Vor der klassischen Bewertung ist jedoch eine Reihe von Vorarbeiten notwendig. Bspw. ist zu Beginn zu klären, wann der richtige Zeitpunkt für den Einsatz des Modells ist. Darauf aufbauend sind Projektgruppen zu bilden, die mit der Entwicklung von Kriterien beauftragt sind, die in weiteren Prozessen zuerst hierarchisch gegliedert und dann in Kriteriengruppen (z.B. scharf, unscharf, unsicher, qualitativ und quantitativ) zusammengefasst werden. Schließlich ist der Bewertungsprozess in zwei weitere Schritte unterteilt. Zum

einen sind die Kriterien untereinander zu gewichten und zum anderen müssen die Kriterien hinsichtlich der Alternativen bewertet werden. In dieser Phase durchläuft das Modell mehrere Schritte, was die Transparenz der Entscheidung signifikant erhöhen soll. Hierbei wurde erstmals eine neue Methodik vorgestellt, die es erlaubt, scharfe, unscharfe sowie risikobasierte unsichere Daten zu vereinen und diese in einem weiteren Schritt in ein Ergebnis zu überführen.

Als schwierig erweist sich dennoch der richtige Umgang mit den vorliegenden Daten. Gerade die Qualität solcher Daten ist ein wichtiger Indikator für die Sicherstellung des Bewertungsergebnisses. Folglich stellt die erste Phase des Modells den wichtigsten Baustein im Entscheidungsprozess dar, um die geforderte Transparenz zu erhöhen. Daten und Informationen müssen eindeutig mit Hilfe von Expertenwissen erarbeitet werden, um Wahrscheinlichkeits- und Fuzzyfunktionen den realen Projektgegebenheiten zu entsprechen.

Unabhängig davon erweist sich die Berücksichtigung von unscharfen und unsicheren Daten als wichtiger Bestandteil einer transparenten Entscheidungsfindung, wobei eindeutig auf die Notwendigkeit von existierenden Datenbanken hingewiesen werden muss. Die unterschiedlichen Möglichkeiten des Entscheidungsmodells soll anhand eines Anwendungsbeispiels diskutiert werden.

9 Einsatz des Entscheidungsmodells am Beispiel eines unterirdischen Infrastrukturprojektes

9.1 Allgemeines und Ansatz zur Verifizierung der Methodik

In diesem Abschnitt wird das Entscheidungsmodell erstmalig auf ein konkretes Projekt angewendet. Dazu wird ein bereits abgeschlossenes Bauprojekt herangezogen, welches hinsichtlich des Entscheidungsprozesses genauer analysiert wird. Entscheidend hierbei ist, dass der gesamte, bereits beendete, Entscheidungsprozess offengelegt wird, um Rückschlüsse für den Einsatz des Entscheidungsmodells zu ziehen. Folglich soll nicht nur die Art und Weise der Entscheidung dokumentiert, sondern auch verwendete Daten, Kriterien und Methoden betrachtet werden.

Damit das Entscheidungsmodell konkret angewendet werden kann, wird zwischen insgesamt zwei Tests unterschieden. Im ersten Test soll nach vorangegangener Analyse des bereits abgeschlossenen Entscheidungsprozesses die Bewertung nach der klassischen Methode des AHP vollzogen werden. Zunächst ist zu prüfen, in welchem Betrachtungszeitraum das Modell eingeordnet wird. Desweiteren ist in diesem Zusammenhang lediglich die erste Phase des Entscheidungsmodells durchzuführen, d.h. die Kriterien, Alternativen und vorhandene Daten werden erneut gesichtet und in Anlehnung an den AHP sortiert und bewertet. Hierbei sei erwähnt, dass unsichere sowie unscharfe Faktoren vorerst nicht betrachtet werden. Ziel ist es, zunächst eine Entscheidungssituation zu schaffen, die nachvollziehbar und transparent gestaltet ist.

Im zweiten Test werden die weiteren Faktoren, wie Unschärfe sowie Unsicherheit, mit in das Modell integriert. Die Bewertungsmethodik wird nicht verändert, lediglich sollen Aspekte wie finanzielle Risiken (unsichere Faktoren), Entscheiderverhalten (qualitative Bewertungen) sowie Unschärfebetrachtungen (z.B. Messungenauigkeiten, Toleranzen usw.) mit in die Entscheidungsfindung implementiert werden. Unter Berücksichtigung der weiteren Phasen sollen die weiteren Analysemöglichkeiten des Modells ausführlich aufgezeigt werden, um auf diese Weise die geforderte Transparenz zu gewährleisten.

Hintergrund des hier vorgestellten und erstmalig angewendeten Entscheidungsmodells ist die Tatsache, dass die Nutzung unscharfer und unsicherer risikobehafteter Größen zu einem noch exakteren Ergebnis als im Zuge des klassischen AHP-Bewertungsverfahrens führt. Zur Verifizierung dieses Ansatzes wird die Arbeitshypothese aufgestellt, dass unscharfe und unsichere Daten zu keiner Veränderung im Endergebnis führen, so dass die Ergebnisse aus Test 1 und Test 2 identisch sind. Es soll daraufhin in Test 2 gezeigt werden, dass diese Arbeitshypothese widerlegt bzw. falsifiziert wird, indem aufgezeigt wird, dass die Ergebnisse eine Streuung verursachen und demnach eine größere Transparenz und Genauigkeit im Gesamtergebnis erwartet wird.

Ziel dieses Kapitels ist es, die Entscheidung mit dem Entscheidungsmodell abzubilden, die Stabilität des Modells zu überprüfen, weitere Analysemöglichkeiten hinsichtlich einer ganzheitlichen Entscheidungsfindung sowie die Notwendigkeit eines Einsatzes unscharfer und unsicherer Aspekte aufzuzeigen.

Im Zuge einer Abschlussarbeit an dem Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb wurde bereits das Projekt ‚Lotter Straße‘ ausführlich beschrieben. Diese Informationen werden teilweise in den nachfolgenden Abschnitten ‚Projektbeschreibung‘, ‚Spezifische Randbedingungen‘ und ‚Entscheidungsprozess in der ursprünglichen Planungsphase‘ dazu genutzt, um das Projekt erneut zu beschreiben. Dazu finden neben den Ausführungen aus dieser Abschlussarbeit die dazugehörigen Leistungsverzeichnisse zu dem Bauprojekt ebenfalls Verwendung [98] [165].

9.2 Projektbeschreibung

In der Stadt Osnabrück wurden an einer stark befahrenen Straße (Lotter Straße) erforderliche Kanalsanierungsarbeiten durchgeführt. Es sollte ein im Jahre 1887 gebauter Mischwasserkanal im Zuge der Bauarbeiten durch ein Trennsystem ersetzt werden. Die Arbeiten betrafen zwei Bauabschnitte, wobei der erste Bauabschnitt von ca. 730 m in Stollenbauweise und der zweite von ca. 300 m in offener Bauweise ausgeführt wurden.

Der alte Mischwasserkanal im ersten Bauabschnitt (Stollenbauweise) bestand aus einem gemauerten Eiprofil 750/950 mm. Er wurde für den Schmutzwasserkanal durch Steinzeugrohre DN 400 und für den Regenwasserkanal durch GFK-Rohre (Glasfaser verstärkte Kunststoffrohre) DN 300 bis DN 1000 ersetzt. Die Verlegung erfolgte in einer Tiefenlage von bis zu 6,50 m.

Im zweiten Bauabschnitt (offene Bauweise) bestand der alte Mischwasserkanal aus einem gemauerten Eiprofil 600/740 mm. Das neue Trennsystem besteht aus Steinzeugrohren DN 200 bis DN 400 für den Schmutzwasserkanal sowie Betonrohren DN 400 bis DN 600 für den Regenwasserkanal. Die Rohre wurden in einer Tiefenlage von bis zu 4,00 m verlegt. Der zweite Bauabschnitt findet in der weiteren Betrachtung dieser Arbeit keine Berücksichtigung, da nur ein Vergleich des Bauabschnittes in Stollenbauweise mit der adäquaten offenen Bauweise durchgeführt wird. Aufgrund dessen werden die maßgebenden Randbedingungen im ersten Bauabschnitt dargestellt, um so die Problematiken infolge dieser Randbedingungen zu erfassen.

9.3 Spezifische Randbedingungen

In diesem Abschnitt werden die ersten wichtigen Informationen bzgl. der näheren Umgebung rund um die geplante Baumaßnahme gesammelt.

9.3.1 Lage

Die Lage der Lotter Straße verbindet gemeinsam mit anderen Hauptstraßen einen Innenstadtring in Richtung einer Autobahn. Sie zeichnet sich aus durch ihre zentrale, innenstadtnahe Lage mit umliegenden überwiegend gründerzeitlich geprägten Stadtteilen, die eine sehr gute Wohn- und Lebensqualität besitzen.

9.3.2 Verkehr

Das Verkehrsaufkommen auf der Straße beträgt täglich ca. 17.000 Fahrzeuge täglich. Dabei erstreckt sich der Verkehr vom Schwerlast- bis zum normalen Pkw-Verkehr. Den Großteil des Verkehrs stellen die täglichen Berufspendler dar, weshalb es in den frühen Morgenstunden zu Verkehrsspitzen in Richtung Stadtmitte und nachmittags in die entgegengesetzte Richtung kommt. Insgesamt verkehren auf der Straße drei Buslinien, welche jeweils in einem 30-Minuten-Takt fahren, insgesamt jedoch eine Inanspruchnahme des Busverkehrs in einem 10-Minuten-Takt gewährleisten (insgesamt drei Bushaltestellen).

9.3.3 Straße

Es handelt sich um eine asphaltierte einspurige Gegenverkehrsstraße mit einer erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. An die Straße schließt direkt ein gepflasterter Fußgängerweg an. Lediglich in einem geringen Bereich des zu untersuchenden Bauabschnittes stehen einige wenige Parkbuchten zur Verfügung. Aufgrund dessen dienen hauptsächlich die Seitenstraßen als Parkmöglichkeiten. Im betrachteten Bauabschnitt beträgt die Straßenbreite ca. 4 m pro Fahrbahn zuzüglich jeweils ca. 3 m Fußgängerweg. In der Summe ergibt sich somit ein Abstand von ca. 14 m zwischen den einzelnen Gebäuden.

9.3.4 Bebauung

Die Häuser entlang des betrachteten Abschnitts der Hauptstraße bestehen zum größten Teil aus vier geschossigen Häusern, die Anfang des 19. Jahrhunderts gebaut worden sind. Zwischen den Häusern befinden sich teilweise kleine Durchfahrten oder Wege, die zu den Hinterhöfen führen. Hauptsächlich wird das Erdgeschoss als Verkaufsfläche und die übrigen Geschosse inkl. Dachgeschoss als Wohnfläche genutzt.

9.3.5 Geschäfte

Entlang des betrachteten Bauabschnittes wird die Erdgeschossebene fast ausschließlich als Verkaufsfläche genutzt. Dort sind vermehrt kleine Einzelhändler, welche zum Teil eine große Tradition aufweisen und einzig an diesem Standort angesiedelt sind.

9.4 Entscheidungsprozess in der ursprünglichen Planungsphase

Der Entscheidungsprozess wird anhand der vorliegenden Eckdaten in der Entwurfsphase analysiert. Insgesamt lagen bei der Planung nur Kostenschätzungen vor, die für die Ver-

fahre auswahl genutzt wurden. Die Kostenschätzung der geschlossenen Bauweise basiert auf ein vorliegendes Leistungsverzeichnis, wobei hier zu erwähnen ist, dass die Position der Hausanschlüsse äußerst moderat kalkuliert wurde. Gerade im Vergleich zur offenen Bauweise fallen die Hausanschlusskosten eindeutig höher aus.

Zur Demonstration der Entscheidungsmechanismen wird im weiteren Verlauf ein Leistungsverzeichnis für die offene Bauweise erstellt. Folglich werden nunmehr synthetisierte Faktoren betrachtet, wobei festzuhalten ist, dass sämtliche Einheitspreise sowie Massenermittlungen an das reelle Projekt angelehnt sind.

9.4.1 Planung mit offener Bauweise

9.4.1.1 Allgemeines

Die offene Bauweise ist auch heute noch das überwiegend verwendete Verfahren beim Bau sowie der Erneuerung der Kanalisation wie in den Werken von Stein ausführlich dargestellt. Unter dieser Verfahrensart ist das Verlegen von erdverlegten Leitungen in einer offenen Baugrube zu verstehen. Sie ist charakterisiert durch den Aushub eines Grabens, der Verlegung der Leitung im Schutze eines Verbaus oder einer Böschung und der anschließenden Rückverfüllung. Zudem ist abschließend gegebenenfalls die für die Leitungsverlegung aufgebrochene Verkehrsfläche wieder herzustellen [167] [168].

Aus der offenen Bauweise im Kanalbau ergeben sich einige Vor- und Nachteile [169] [32]. Als Vorteile sind Vergrößerung und Veränderung des Querschnittes und des Rohrmaterials zu nennen. Darüber hinaus zeichnet sich die offene Bauweise dadurch aus, dass diese unabhängig von Werkstoffen, geologischen und hydrologischen Verhältnissen sowie der Trassenführung ausgeführt wird.

Nachteilig erweisen sich bspw. der hohe manuelle Aufwand, die überproportionale Kostensteigerung mit zunehmender Verlegetiefe sowie die Steigerung des Verbrauches an Ressourcen, da das Aushubmaterial meistens nicht wieder eingebaut werden kann. Ebenso entwickeln sich eine Steigerung der Inanspruchnahme von Deponieraum sowie ein erhöhtes Sicherheitsrisiko für Anlieger. Schwierig sind die Bauarbeiten auch dann, wenn eine große Beschädigungsgefahr für kreuzende oder benachbarte Leitungen besteht, wobei im Allgemeinen schwerwiegende Eingriffe in die Substanz des Straßenkörpers, die zu einer vorzeitigen Herabsetzung des Gebrauchswertes und der Nutzungsdauer der Straße führen können, sehr oft die Regel sind. Hinsichtlich des Verkehrsflusses sind ebenfalls Einschränkungen mit gegebenenfalls erforderlicher Verkehrsumleitung zu erwarten, was auch zu einer starken Beeinträchtigung der Ökologie führen kann.

9.4.1.2 Bauablauf für die Baumaßnahme

Für die Baumaßnahme in offener Bauweise wurde eine Bauzeit von zwei Jahren einkalkuliert. Bei der Kanalerneuerung der betreffenden Straße infolge der offenen Bauweise wur-

de ein Trägerverbau (ein aus vertikalen, in Abständen angeordneten Traggliedern, sowie dazwischen liegender horizontaler Ausfachung bestehender Baugrubenverbau) für die Baugrube gewählt. Folgende weitere Baumaßnahmen werden stichpunktartig aufgeführt:

- Unterteilung in sieben, zeitlich aufeinanderfolgende, Bauabschnitte mit einer jeweiligen Länge von ca. 100 m.
- Zum Schutz des Fußgängerverkehrs wurden abschnittsweise einseitig Fußgängertunnel aufgestellt.
- Zur Sicherung der Vorflut mussten nach Abbruch des alten Kanals provisorische PVC-Rohre (DN 500) in der Baugrube verlegt werden.
- Um den Hausbewohnern wieder einen Schmutzwasseranschluss zu gewährleisten, wurden unmittelbar an die oben beschriebene provisorische PVC-Rohrleitung, vorübergehend PVC-Rohre (DN 150) für die Hausanschlüsse verlegt.
- Die Baugrubenbreite war bis zu 5,50 m breit.
- Zur Einsparung an Aushubmassen war eine Abstufung in der Baugrube vorzunehmen.
- Die erforderliche Baugrubenbreite hatte die abschnittsweise Vollsperrung der Straße zur Folge (Sackgasse).
- Der Schmutzwasserkanal wurde aus Steinzeugrohren (DN 200 bis DN 400) hergestellt und in eine Sandschicht eingebettet.
- Um den Fußgängerverkehr ohne große Einschränkungen gewährleisten zu können, waren die Hausanschlussleitungen aus der Baugrube heraus unterhalb des Fußgängerüberweges gebohrt herzustellen.
- Oberhalb des Schmutzwasserkanals wurde der Regenwasserkanal aus Betonrohren (DN 300 bis DN 1000) in einer Betonbettung verlegt.
- Nach der Verlegung des neuen Hauptkanals wurden die provisorischen Leitungen zurückgebaut und die Entwässerung erfolgte ab diesem Zeitpunkt über das neue System.
- Anschließend wurde die Baugrube komplett verfüllt und verdichtet, die Fahrbahndecke (Schottertragschicht, Asphalt) erstellt und an die vorhandenen Bereiche der Straße angeschlossen.
- Eine vollständige Erneuerung der Straße kam wegen finanziellen Einsparungsmaßnahmen nicht in Frage, obwohl dieses geplant ist.
- Der Verbau blieb bis auf die Holzbohlen vollständig im Erdreich (verlorener Verbau).

9.4.1.3 Kosten als Kriterium während der Planungsphase

Im Zuge dieser Arbeit werden die erstellten Leistungsverzeichnisse [165] so umformuliert, dass beide miteinander vergleichbar sind. Nur so ist es möglich, die genauen Kosten der beiden Alternativen miteinander vergleichen zu können. Um einen späteren besseren Vergleich mit dem Bauabschnitt ‚Stollenbau‘ zu ermöglichen, werden die Leistungen für den Regen- und Schmutzwasserkanal sowie die Baustelleneinrichtung nicht in einer Position, sondern in gesonderten Positionen beschrieben. In offener Bauweise wird diese Trennung stets praktiziert, da es für Regen- und Schmutzwasserkanäle unterschiedliche Zulagen seitens der Länderbehörden gibt. In folgender Tabelle 15 sind die Kosten für die offene Bauweise übersichtlich dargestellt.

Leistungsverzeichnis / Positionen Offene Bauweise	
Bezeichnung der Position	Kosten
1. Baustelleneinrichtung	287.220,30 €
2. Offene Bauweise	
2.1 Freimachen der Baufelder	58.232,60 €
2.2 Straßenbau	148.413,76 €
2.3 Kanalbau Regenwasserkanal	1.041.882,11 €
2.4 Kanalbau Schmutzwasserkanal	1.441.988,17 €
2.5 Hausanschlüsse	170.295,49 €
3. Sonstige Arbeiten	
3.1 Markierungsarbeiten	2.126,70 €
3.2 Kampfmittelsicherung	47.925,68 €
4. Beweissicherung	20.592,00 €
5. Stundenlohnarbeiten	10.640,00 €
Summe ohne MwSt.	3.229.316,81 €

Tabelle 15: Gesamtkosten der offenen Bauweise

Um einen besseren Vergleich mit der noch vorzustellenden geschlossenen Bauweise zu erhalten, werden die einzelnen Positionen in Bauleistungen unterteilt. Die Unterteilung erfolgt in folgende Bauleistungsgruppen:

- Baustelleneinrichtung;
- Grundwasserhaltung;
- Verbau;

- Regenwasserkanal;
- Schmutzwasserkanal;
- Schächte;
- Verfüllmaterial;
- Hausanschlüsse;
- Straßenaufbruch und -wiederherstellung;
- Sonstiges.

Die Bauleistung entspricht dabei der ‚Baustelleneinrichtung‘ Position 1 (Baustelleneinrichtung). Die in den Positionen 2.3 (Kanalbau Regenwasserkanal) und 2.4 (Kanalbau Schmutzwasserkanal) vorhandenen Leistungen für den Verbau inklusive Aushub und das Verfüllmaterial werden in den gleichnamigen Bauleistungen zusammengefasst. In den vorgenannten Positionen befinden sich zudem die Leistungen für die Bauleistungen ‚Schächte‘ sowie ‚Grundwassererhaltung‘. Aus den übrigen Leistungen, wie z.B. der provisorischen Wasserüberleitung oder dem Liefern und Verlegen der Rohre, der Positionen 2.3 und 2.4, ergeben sich die jeweiligen Bauleistungen ‚Regenwasserkanal‘ und ‚Schmutzwasserkanal‘. Die Bauleistung ‚Straßenaufbruch und –wiederherstellung‘ setzt sich aus der Position 3.1 (Markierungsarbeiten) sowie aus den Leistungen der Positionen 2.1 (Freimachen des Baufeldes) und der Position 2.2 (Straßenbau) zusammen. Unter der Bauleistung ‚Sonstiges‘ finden die restlichen Leistungen aus den Positionen (2.1 und 2.2), wie z.B. das Herstellen der Querschläge, Berücksichtigung. Zusätzlich werden die Positionen 3.2 (Kampfmittelsichtung), 4. (Beweissicherung) und 5. (Stundenlohnarbeiten) in die Bauleistung mit eingerechnet. Die Bauleistung ‚Hausanschlüsse‘ entspricht der Position 2.5 (Hausanschlüsse). Aus den zusammengefassten Bauleistungen ergeben sich folgende Kosten und Kostenanteile bzgl. der Gesamtsumme (Tabelle 16):

Kosten nach Bauleistungen / Offene Bauweise		
Bauleistungen	Kosten [€]	Anteil [%]
1. Baustelleneinrichtung	287.220,30	8,89
2. Grundwasserhaltung	43.836,00	1,36
3. Verbau und Aushub	1.387.970,16	42,98
4. Regenwasserkanal	259.020,30	8,02
5. Schmutzwasserkanal	382.236,88	11,84
6. Schächte	142.593,87	4,41
7. Verfüllmaterial	200.451,00	6,20
8. Hausanschlüsse	170.295,49	5,27
9. Straßenaufbruch & -wiederherstellung	208.773,06	6,46
10. Sonstiges	146.919,75	4,55
Summe ohne MwSt.	3.229.316,81 €	100

Tabelle 16: Kosten nach Bauleistungen für die offene Bauweise

9.4.2 Planung mit geschlossener Bauweise

9.4.2.1 Allgemeines

Der geschlossenen Bauweise wird heute aufgrund immer neuerer Techniken mehr Beachtung geschenkt als in den Vorjahren, jedoch wird sie weiterhin weitaus weniger verwendet als die offene Bauweise [8]. Ideal eignet sich die geschlossene Bauweise für den Bau unterschiedlicher Kanäle, wobei das größte Charakteristikum die Erstellung der Baugruben bzw. Schächte als Start- und Zielbaugruben bzw. –schächte ist [167].

Der Anwendungsbereich der geschlossenen Bauweise in Form der bergmännischen Stollenbauweise im Kanalbau erstreckt sich insbesondere auf Erneuerungen in nicht begehbaren Bereichen bei sehr großer Tiefenlage sowie bei hoher Verkehrsbeeinträchtigung.

Die geschlossene Bauweise, speziell die Stollenbauweise, hat ebenfalls Vor- und Nachteile [169] [32]. Als Vorteil ist bspw. die geringe Verkehrsbeeinträchtigung zu nennen, so dass kaum Störungen der Anwohner und der Geschäftswelt zu erwarten sind. Lediglich bei der Erstellung der Start- und Zielbaugruben können Lärm- und Emissionsbelastungen störend sein. Dadurch dass zu großen Teilen im Erdreich gearbeitet wird, hat die Bauweise den Vorteil, dass diese weitgehend witterungsunabhängig ist und beim Einsatz in einer Stadt geringe Eingriffe in die Substanz der Straße hat. Betrachtet man den Kostenfaktor, so wird deutlich, dass die Arbeiten größtenteils tiefenunabhängig sind und sogar Altkanäle

und mögliche kontaminierte Bodenbereiche im Auffahrquerschnitt entfernt werden können, wobei auch eine gute Anpassung an sich ändernde Baugrundverhältnisse gewährleistet ist.

Als nachteilig sind Aspekte wie eine sehr arbeits- und zeitaufwendige Methode zu nennen. Dazu kommt ein relativ großer Bodenaushub bezogen auf den Nutzquerschnitt bei Verlegung nichtbegehrter Kanäle. Schwierig wird es, wenn anstehendes Grundwasser vorhanden ist, so dass eine Grundwasserabsenkung oder eine teure Baugrundabdichtung, z.B. Bodenvereisung, erforderlich ist. Erhöhte Setzungsgefahren können darüber hinaus bei unsachgemäßem Abbau der Ortsbrust und beim Einbau des Verzuges bestehen. Insgesamt ist an dieser Stelle festzustellen, dass die angeführten Vor- und Nachteile in starker Abhängigkeit zu den spezifischen Randbedingungen stehen.

9.4.2.2 Bauablauf für die Baumaßnahme

Im Folgenden wird der Bauablauf der Kanalerneuerung mit Hilfe der geschlossenen Bauweise in Form des Stollenbaus, wie tatsächlich auch ausgeführt, kurz dargestellt.

Bei der anfänglichen Planung sollte der vorhandene Mischwasserkanal (gemauertes Eiprofil 750/950 mm) mit dem Stollen überfahren werden. Dadurch wäre der alte Kanal komplett zurück gebaut worden. Aus diesem Grund sollte die Wasserüberleitung mittels ‚Hamburger Heber‘ geplant werden. Beim ‚Hamburger Heber‘ erfolgt die Überleitung des anfallenden Wassers im Kanal mit einem Rohr von dem einen in den nächsten Schacht.

Um den Verkehr auf der Straße nicht zu beeinflussen, wurde eine 7,5 m tiefe Startbaugrube in einer Nebenstraße errichtet. Aus dieser Baugrube wurde ein Querstollen bis in eine Nachbarstraße vorgetrieben, von welcher dann der eigentliche Stollen unterhalb der Hauptstraße beginnen konnte.

Parallel zu diesen Arbeiten wurde eine weitere Baugrube in einer weiteren Nebenstraße mit einem Zugangsstollen in die Hauptstraße hergestellt. Aus diesem Zugangsstollen heraus wird der eigentliche Leitungsstollen aufgefahren. Die Querschnittsgröße der Stollen betragen dabei 2,85 x 2,20 bzw. eine Größe von 2,50 x 2,00 m.

Zu einem späteren Zeitpunkt wurde eine weitere Startbaugrube errichtet (Versorgungsschacht (3)), so dass die Arbeiten aus drei Richtungen verrichtet werden konnten, um so die vorgegebene Bauzeit (2½ Jahre) einzuhalten.

Der bergmännisch aufgefahrne Stollen wurde mittels Stahlbögen mit Holzverzug gesichert, infolge dessen wurden die Holzbretter als vorausseilende Sicherung ausgeführt, dabei wurden erst die oberen 30 cm abgebaut und im Anschluss wird der Holzverzug in den Hohlraum nach geschlagen.

Das vorhandene Kluftwasser wurde durch eine Rinnenkonstruktion in der Sohle des Stollens abgeleitet. Im Abstand von 80 m wurde hierfür Pumpensümpfe errichtet, um so das Wasser aus dem Stollen mittels Tauchpumpe zu befördern.

Die Belüftung im Stollen erfolgte durch Kompressoren, welche jeweils an den Startbaugruben positioniert waren. Hierdurch wurde eine blasende und saugende Belüftung gewährleistet, indem auf diese Art und Weise Frischluft von außen zur Ortsbrust unter Tage geblasen und der entstehende Staub, der durch den Abbau entsteht, abgesaugt werden konnte.

Der Bodenabbau, überwiegend Bodenklasse 6 und 7 nach DIN 18300, wurde mit Hilfe zweier Minibagger durchgeführt. Zur Förderung des Schuttermaterials wurde ein gleisgebundener Betrieb verwendet [54].

Die Hausanschlüsse wurden sowohl für den Schmutz-, als auch für den Regenwasserkanal gebohrt. Nach Beendigung der Bohrarbeiten konnte das abschnittsweise Verlegen des neuen Schmutzwasserkanals (DN 400 Steinzeug) beginnen. Für den Anschluss der Haus- und Straßenanschlüsse an den Hauptsammler wurden Steinzeugabzweigrohre mit einem 45° Winkel verwendet. Nach Beendigung der Verlegung des Schmutzwasserkanals und dessen vollständiger Verdämmung, konnten die Arbeiten für den Regenwasserkanal beginnen. Als Regenwasserrohre wurden GFK-Rohre verwendet, die aufgrund der hydraulischen Berechnung einen Durchmesser von DN 300 und DN 1000 betragen.

Anschließend wurden die schon im Zuge der Bohrung für die Schmutzwasserhausanschlüsse ebenfalls ausgeführten Regenwasserhausanschlüsse durch Connex R-Abzweige mit dem Hauptsammler verbunden. Im Anschluss an die beschriebenen Arbeiten musste die Straße von oben geöffnet werden, um auf die im Zuge der Verlegung der Rohre eingebauten Schachtunterteile, die Kanalschächte aufzusetzen.

Um den Bauablauf zu beschleunigen, wurden an den Stellen, an denen die Möglichkeit besteht, anstatt gemauerter Schächte, wie im Leistungsverzeichnis beschrieben, GFK-Schachtfertigteile bis ca. 1 m unter der Oberkante der Fahrbahn verlegt.

Der übrige Bereich, d.h. bis zu der Oberkante der Fahrbahn, wurde aus Betonfertigteilen hergestellt, da sie im Vergleich zu GFK-Fertigteilen resistenter gegen eine mögliche Beschädigung durch eine zu einem späteren Zeitpunkt geplante Straßenerneuerung sind.

Im Zuge der Baumaßnahme auf der Hauptstraße waren insgesamt neun Baugruben zu errichten (inklusive der Abschnitte, welche in offener Bauweise hergestellt werden konnten). Durch die Baugruben in Höhe der Nebenstraßen konnte der Verkehr aufgrund der vorherrschenden Platzverhältnisse in beide Richtungen aufrecht gehalten werden. Jedoch war es infolge der übrigen sieben Baugruben nur noch möglich eine Fahrspur zur Verfügung zu stellen. Um den Verkehr in beide Richtungen aufrecht zu erhalten, kam deshalb eine Lichtsignalanlage zum Einsatz, die jeweils über eine Dauer von 14 Tagen erforderlich war.

Nach Beendigung der Baumaßnahme wurde der restliche Stollen, wie auch der alte Mischwasserkanal, vollständig mit Dämmmaterial verfüllt. Abschließend erfolgten die Verfüllung der Startbaugruben und die Wiederherstellung der alten Pflaster- bzw. Asphaltdecken.

9.4.2.3 Kosten als Kriterium während der Planungsphase

Die Kosten für die geschlossene Bauweise sind ebenfalls abhängig von den baustellen-spezifischen Randbedingungen. Generell weisen die geschlossenen Bauverfahren, im Gegensatz zur offenen Bauweise, eine geringere Abhängigkeit von der Verlegetiefe auf, da sich nur der Aushub für die Start-, Durch- oder Zielschächte, nicht aber der Aushub über die gesamte Baulänge verändert. Zudem sind diese Bauverfahren bzgl. der Kosten für den Straßenaufbau und -wiederherstellung zumeist von der Verlegelänge unabhängig, da ein Straßenaufbruch einzig im Bereich der Start-, Durch- oder Zielschächte erforderlich ist. Im Folgenden werden die anfallenden direkten Kosten in Form des Stollenbaus mit Hilfe des auftragserteilten Leistungsverzeichnisses aufgezeigt.

Dabei beträgt die gesamte Netto-Bausumme 3.230.588,08 € (Tabelle 17). Die Kosten für die geschlossene Bauweise berechnen sich aus den Kosten der Position 2 (geschlossene Bauweise) zzgl. 60% der Markierungsarbeiten (Pos 3.1.) und 85% der Stundenlohnarbeiten (Pos 4.), da in der Gesamtsumme des Leistungsverzeichnisses Kosten für ein in offener Bauweise zu erstellendes Teilstück enthalten waren, die für diesen Bereich aus der Summe herausgenommen werden müssen.

Leistungsverzeichnis / Positionen Geschlossene Bauweise	
Bezeichnung der Position	Kosten
1. Baustelleneinrichtung	176.481,31 €
2. Geschlossene Bauweise	
2.1 Freimachen der Baufelder	21.668,33 €
2.2 Straßenbau	47.432,42 €
2.3 Kanalbau Regen- und Schmutzwasserkanal	2.792.227,76 €
2.4 Hausanschlüsse	171.767,74 €
3. Sonstige Arbeiten	
3.1 Markierungsarbeiten (60%)	8.090,52 €
4. Stundenlohnarbeiten (85%)	12.920,00 €
Summe ohne MwSt.	3.230.588,08 €

Tabelle 17: Gesamtkosten der geschlossenen Bauweise

Ähnlich wie bereits bei der Kostenaufstellung zur offenen Bauweise werden die anderen Positionen und Kosten bzgl. bestimmter Bauleistungen unterteilt, um einen besseren Vergleich mit der offenen Bauweise zu ermöglichen. Aus den Positionen 2.1 ‚Freimachen des

Baufeldes', 2.2 ‚Straßenbau‘ und 3.1 ‚Markierungsarbeiten‘ werden die relevanten Leistungen und Kosten unter der Bauleistung ‚Straßenaufbruch und –wiederherstellung‘ zusammengefasst. Die anderen Leistungen, die z.B. zur Herstellung von Querschlägen oder Straßenanschlüssen benötigt werden, finden ihre Berücksichtigung in der Bauleistung ‚Sonstiges‘. Unter die Bauleistung ‚Sonstiges‘ werden zusätzlich die Kosten aus Stundenlohnarbeiten (Pos. 4), die bzgl. der geschlossenen Bauweise anfallen, zusammen gefasst.

Als eigene Bauleistung wird die Position ‚Hausanschlüsse‘ (Pos. 2.4) bei der weiteren Betrachtung berücksichtigt. Die zusammengefassten Bauleistungen werden bzgl. ihrer Kosten und prozentualen Kostenanteile hinsichtlich der gesamten Baukosten für die geschlossene Bauweise in Tabelle 18 dargestellt.

Kosten nach Bauleistungen / Geschlossene Bauweise		
Bauleistungen	Kosten [€]	Anteil [%]
1. Baustelleneinrichtung	176.481,31	5,46
2. Grundwasserhaltung	45.610,50	1,41
3. Stollenbau und Startbaugruben	1.965.058,48	60,83
4. Regenwasserkanal	270.172,95	8,36
5. Schmutzwasserkanal	123.964,61	3,84
6. Schächte	242.264,02	7,50
7. Verfüllmaterial	145.157,20	4,49
8. Hausanschlüsse	171.767,74	5,32
9. Straßenaufbruch & -wiederherstellung	77.191,27	2,39
10. Sonstiges	12.920,00	0,40
Summe ohne MwSt.	3.230.588,08 €	100

Tabelle 18: Kosten nach Bauleistungen für die geschlossene Bauweise

9.4.3 Entscheidungsfindung im Zuge der ursprünglichen Planung

Zu Beginn der Planungsphase wurde durch die Projektbeteiligten zunächst die offene Bauweise vorgeschlagen und ausgeschrieben. Der Sondervorschlag einer Bietergemeinschaft präsentierte schließlich die sogenannte Stollenbauweise (geschlossene Bauweise) als einzige Alternative. Dennoch fehlte in der gesamten Untersuchung eine konkrete Gegenüberstellung der beiden Alternativen, zumal nicht bekannt war, welche Alternative insgesamt kostengünstiger ausfallen würde. Eine übersichtliche Projektevaluierung war somit nicht vorhanden, so dass erst im Nachgang der Bewertungsprozess erneut vollzogen wird, um die getroffene Alternativenwahl auch nachträglich noch zu bewerten.

Infolge dessen kam es zu der Überlegung, die Baumaßnahme in Stollenbauweise, anstatt, wie anfänglich geplant, in offener Bauweise durchzuführen. Während der Planungsphase kam man zu dem Entschluss, die Kanalsanierung in dieser Art der Bauausführung durchzuführen, obwohl man bei einer überschlägigen Berechnung, ohne auf die besonderen Schwierigkeiten dieser Baumaßnahme einzugehen, zu dem Ergebnis gekommen war, dass die reine Baumaßnahme teurer ausgefallen wäre.

Vergleicht man beide Leistungsverzeichnisse, so wird deutlich, dass beide Bauverfahren nahezu identische Kosten aufweisen. Wohlgemerkt ist hinzuzufügen, dass die Schwierigkeit bei der geschlossenen Bauweise darin besteht, die Hausanschlüsse technisch einwandfrei zu erstellen, so dass die kalkulierten Hausanschlusskosten der geschlossenen Bauweise eindeutig zu niedrig kalkuliert sind, wenn man diese mit den kalkulierten Hausanschlusskosten der offenen Bauweise vergleicht.

Dennoch wurden hier die Vor- und Nachteile aller anfallenden Randbedingungen nicht in ein Bewertungsverfahren integriert. Es wurden lediglich die Kosten betrachtet bzw. gegenübergestellt, ohne auch nur weitere Faktoren zu berücksichtigen. Setzt man die beiden Kostenfaktoren ins Verhältnis, so erhält man die prozentualen Werte von 49,99% für die geschlossene Bauweise sowie analog dazu 50,01% für die offene Bauweise.

Würde man diese Bewertung hinsichtlich der geforderten Transparenz der Entscheidung hin untersuchen, so würde man feststellen, dass sämtliche Faktoren, bis auf die Kosten, nicht berücksichtigt wurden. Die Wahl der geschlossenen Bauweise kann ohne weiteres nicht nachvollziehbar dargestellt werden, so dass im nächsten Abschnitt gezeigt wird, dass unter Zuhilfenahme des AHP und weiterer projektbezogener Kriterien die Entscheidung deutlicher gestaltet werden kann.

9.5 Test 1 – Nutzung des Analytic Hierarchy Process

Im ersten Test soll nun in Anlehnung an die vorangegangenen Abschnitte die Entscheidung erneut durchgeführt werden. Dabei werden nicht nur die Kosten berücksichtigt, sondern auch weitere projektbezogenen Kriterien, die in Kooperation mit den Projektplanern ermittelt wurden. Der erste Test berücksichtigt zunächst die klassische AHP-Methode, ohne dabei die Faktoren Unsicherheit sowie Unschärfe zu betrachten, welche erst im zweiten Test Berücksichtigung finden.

9.5.1 Projektanalyse in Anlehnung an den AHP

Die Projektanalyse setzt in Phase 1 ein, wobei die Schritte Projektplanung sowie Analyse unscharfer sowie risikobasierter Kriterien entfallen. Im ersten Schritt sind zunächst die maßgeblichen Kriterien herauszuarbeiten. Die Evaluierung möglicher Alternativen kann ebenfalls hier entfallen, da bereits die maßgeblichen Alternativen feststehen.

9.5.1.1 Kriterienentwicklung und Bewertungshierarchie

Die Kriterienentwicklung findet unter Berücksichtigung zweier Aspekte statt: Zum Einen werden die bereits in dieser Arbeit erarbeiteten Kriterien verwendet, zum Anderen müssen die vorliegenden Informationen aus Projektdaten, Interviews, Beobachtungen sowie Unterlagen zwingend genutzt werden, welche anschließend in das Entscheidungsmodell integriert werden. Aufgrund unzureichender Informationen wird in dieser Untersuchung auf das Hauptkriterium *Soziale Faktoren* verzichtet, so dass für eine erste Analyse die Hauptkriterien *Technische Kriterien*, *Ökonomische Kriterien* und *Ökologische Kriterien* genutzt werden. In folgender Abbildung 73 sind die Kriterien hierarchisch dargestellt. Zum besseren Verständnis und für das weitere Vorgehen sind die Kriterien hinsichtlich ihrer Art des Vorliegens, qualitativ bzw. quantitativ, nochmals unterteilt, wobei nur die Kriterien in quantitativer Form vorliegen können, die direkt mit den Alternativen verglichen werden. Quantitative Kriterien sind in der Hierarchie rot hinterlegt. Bei dem quantitativen Kriterium *Initialkosten* handelt es sich um eine monetäre Größe, welche aufgrund der Leistungsverzeichnisse bekannt war. Für diese Arbeit werden die ökonomischen Kriterien um das Kriterium *Mehrkosten durch Risiko* ergänzt. Sollte die Baumaßnahme länger als die festgelegte Bauzeit andauern, so soll pro Arbeitstag eine Strafe von 7.500€ anfallen. Aufgrund des größeren Eingriffs in die direkte Umgebung der Lotter Straße wurde geschätzt, dass die Bauzeit für die offene Bauweise um 15 Tage und für die geschlossene Bauweise um 3 Tage überschritten wird. Somit ergeben sich zusätzliche Kosten in Höhe von 22.500€ (geschlossene Bauweise) sowie 112.500€ (offene Bauweise). An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass es sich hierbei um synthetisierte Zahlen handelt, um die Bewertung hinsichtlich einer Risikobetrachtung zu erweitern.

Das Kriterium *Energieverbrauch* wurde hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs beim Aus- und Einbau des Bodenmaterials untersucht (Berechnung siehe im Anhang). Das Kriterium *Bauzeit* wurde bereits in der ursprünglichen Planung ermittelt, fand jedoch in der durchgeführten Bewertung keine Berücksichtigung.

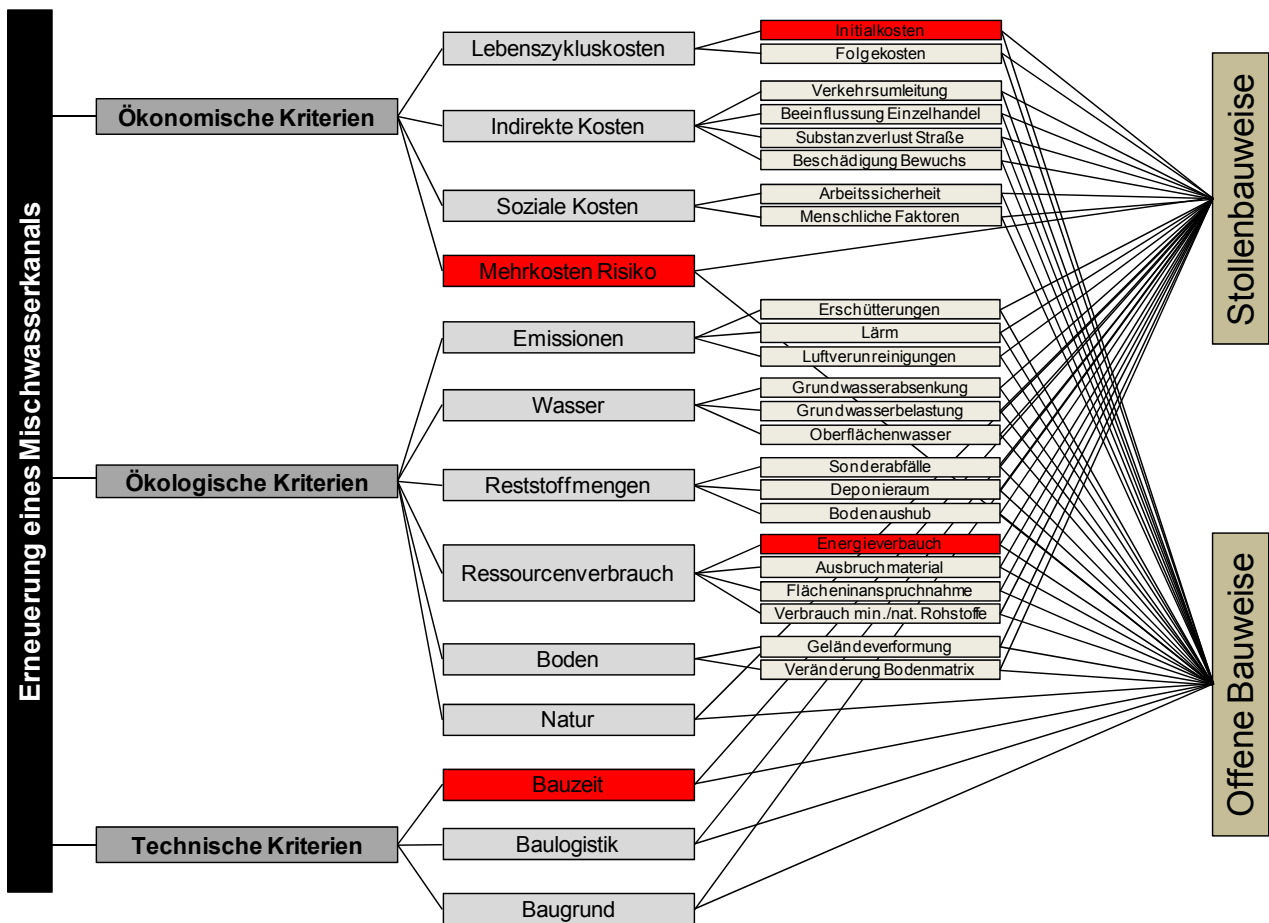


Abbildung 73: Projekthierarchie zum Projekt Lotter Straße

9.5.1.2 Bewertung mit DEMUS²

Die Kriterien sowie Alternativen werden in die Software überführt, so dass die Bewertung durchgeführt werden kann (siehe Projektdatei auf dem beigefügten Datenträger). Ebenso befinden sich die genauen Bewertungsschritte im Anhang, die in diesem Abschnitt nicht weiter vorgestellt werden. Zu erwähnen ist jedoch, dass das Kriterium *Ökonomie* den Projektplanern mit ca. 80% am wichtigsten war. Die beiden übrigen Kriterien wurden mit je ca. 10% bewertet. Diese Bewertungen bleiben auch für den zweiten Test bestehen.

In folgender Tabelle 19 sind darüber hinaus die Einflüsse der wichtigsten Kriterien auf das Gesamtergebnis zu sehen. Die Tabelle verdeutlicht, wie die Entscheider einzelne Kriterien gewichtet haben. Dabei ist zu erkennen, dass die Kriterien *Initialkosten*, *Mehrkosten durch Risiko*, *Folgekosten* und *Bauzeit* insgesamt mit ca. 78% in die Gesamtbewertung eingehen und demnach als sehr wichtig einzustufen sind. Zu beachten ist hierbei, dass die *Folgekosten* aufgrund fehlender Informationen qualitativ bewertet wurden. Ohne dabei auf hinreichende Gründe einzugehen, wurde beschlossen, dass die *Folgekosten* hinsichtlich der offenen Bauweise vorteilhafter sind. Gründe für diese Entscheidung waren, dass bei einer offenen Bauweise Arbeiten wie Hausanschlussarbeiten und die Verdichtung des Bodens genauer und exakter auszuführen sind. Dadurch dass die Baugrube offen vorliegt und dementsprechend ausreichend Platzverhältnisse vorhanden sind, geht die Projektgruppe

davon aus, dass in Zukunft Instandsetzungsmaßnahmen und Reparaturen geringer ausfallen werden, als bei einer Stollenbauweise, bei welcher die Platzverhältnisse beengt sind und somit die Arbeiten nicht exakt ausgeführt werden können.

Gesamteinfluss einzelner Kriterien				
Kriterien 1.Ebene	Kriterien 2.Ebene	Kriterien 3.Ebene	* Einfluss auf Gesamtergebnis in %	Art des Vorliegens
Ökonomische Kriterien; 81,0%	Lebenszykluskosten; 67,3%	Initialkosten; 80,0%	43,6	Quantitativ
	Mehrkosten Risiko; 21,1%		17,1	Quantitativ
	Lebenszykluskosten; 67,3%	Folgekosten; 20,0%	10,9	Qualitativ
Technische Kriterien; 9,7%	Bauzeit; 78,5%		7,6	Quantitativ
Ökologische Kriterien; 9,4%	Emissionen; 46,9%	Luftverunreinigungen; 61,5%	2,7	Qualitativ
Ökonomische Kriterien; 81,0%	Soziale Kosten; 5,9%	Arbeitssicherheit; 50,0%	2,4	Qualitativ
		Menschl. Faktoren; 50,0%	2,4	Qualitativ
Ökologische Kriterien; 9,4%	Ressourcenverbrauch; 24,9%	Energieverbrauch; 65,7%	1,5	Quantitativ
Ökonomische Kriterien; 81,0%	Indirekte Kosten; 5,7%	Verkehrsumleitungen; 25,0%	1,2	Qualitativ
		Beeinflussung Einzelhandel; 25,0%	1,2	Qualitativ
		Substanz Straße; 25,0%	1,2	Qualitativ
		Beschädigung Bewuchs; 25,0%	1,2	Qualitativ
Restliche Kriterien			7,0	Qualitativ
* Multiplikation der Gewichtungen aus Ebene 1 bis Ebene 3				

Tabelle 19: Lokale und globale Gewichtung der einflussreichsten Kriterien

Das Gesamtergebnis zeigt, dass auch im Zuge des ersten Tests die Stollenbauweise zu präferieren wäre (siehe Tabelle 20). Dieses Ergebnis deckt sich mit der vorherigen Entscheidung, die Stollenbauweise zu wählen. Interessant ist dabei die Tatsache, dass durch die detailliertere Betrachtung der Projektuntersuchung, eine noch transparentere Bewertungssituation entstanden ist. Zwar ist die Mehrzahl der Alternativenvergleiche in qualitativer Form erstellt worden, jedoch zeigt sich auch hier, dass zumindest erste Einschätzungen dazu führen, die Transparenz im Zuge der Entscheidung zu erhöhen und weitere Faktoren zu berücksichtigen. Die Tabelle 20 zeigt zum einen das Gesamtergebnis und zum anderen die einzelnen Alternativenvergleiche. Zu sehen ist, dass obwohl fast alle Kriterien für die Stollenbauweise sprechen, das Gesamtergebnis doch relativ nah beieinander liegt.

Alternativenvergleiche			
Kriterien	Bewertung mit AHP-Skala bzw. Daten *	Offene Bauweise [in %]	Stollenbauweise [in %]
Mehrkosten Risiko	Dateneingabe	16,70	83,30
Natur	3	25,00	75,00
Bauzeit	Dateneingabe	55,60	44,40
Baulogistik	1	50,00	50,00
Baugrund	1	50,00	50,00
Initialkosten	Dateneingabe	50,01	49,99
Folgekosten	1	50,00	50,00
Verkehrsumleitung	9	10,00	90,00
Beeinflussung Einzelhandel	4	20,00	80,00
Substanzwertverlust Straße	1	50,00	50,00
Beschädigung Bewuchs	1	50,00	50,00
Arbeitssicherheit	1	50,00	50,00
Menschliche Faktoren	1	50,00	50,00
Erschütterungen	2	33,33	66,67
Lärm	4	20,00	80,00
Luftverunreinigungen	3	25,00	75,00
Grundwasserabsenkung	1	50,00	50,00
Grundwasserbelastung	1	50,00	50,00
Oberflächenwasser	1	50,00	50,00
Sonderabfälle	2	33,33	66,67
Deponieraum	2	33,33	66,67
Bodenaushub	2	33,33	66,67
Energieverbrauch	Dateneingabe	35,80	64,20
Ausbruchmaterial	2	33,33	66,67
Flächeninanspruchnahme	2	33,33	66,67
Verbrauch min./nat. Rohstoffe	1	50,00	50,00
Geländeformung	2	66,67	33,33
Veränderung Bodenmatrix	2	33,33	66,67
Gesamtbewertung nach DEMUS²		42,19	57,81

* **Grüner Wert** = Präferenz ‚Stollenbauweise‘
Roter Wert = Präferenz ‚Offene Bauweise‘
Wert 1 = Keine Präferenz

Tabelle 20: Lokale Gewichtungen der Alternativenvergleiche

Um die Stabilität der gemachten Entscheidung genauer zu überprüfen, wurde in DEMUS² die Funktion der Sensitivitätsanalyse implementiert. Folglich können sämtliche Kriterien hinsichtlich eines möglichen Einflusses auf die Stabilität eines Ergebnisses genauer untersucht werden. Sinnvoll erscheint dies grundsätzlich bei den drei Hauptkriterien. In den folgenden drei Graphen (Abbildungen 74-76) sind die einzelnen Analysen für die Kriterien *Ökonomie*, *Ökologie* und *Technik* dargestellt. Die senkrechte Linie zeigt dabei die durch den Entscheider gemachte Gewichtung hinsichtlich des jeweiligen Kriteriums. Alle drei Hauptkriterien zeigen dabei ein relativ stabiles Ergebnis. Das bedeutet, dass eine minimale Veränderung der Gewichtung einzelner Kriterien augenscheinlich keinen Rangwechsel zwischen den Alternativen erzeugt. Lediglich beim Kriterium *Technik* ist ein Alternativenwechsel zu beobachten, jedoch auch nur dann, wenn das Kriterium mit ca 70% gewichtet werden sollte.

Untersucht man alle weiteren Kriterien (siehe Datei auf dem Datenträger), so fällt auf, dass stets die geschlossene Bauweise die zu präferierende Alternative darstellt. Folglich lässt sich daraus schließen, dass die Stollenbauweise die zu präferierende Alternative ist, jedoch bringt eine vertiefte Analyse die Erkenntnis, dass viele Vergleiche auf Basis unscharfer Informationen erfolgten. Gerade in dieser Situation stellt sich die Frage, ob die Informationen bzw. die Datengrundlagen dafür ausreichen, die Alternativenwahl zu untermauern. Das Ergebnis ist instabil und die qualitativen Paarvergleiche basieren auf jeweils einen einzigen scharfen AHP-Wert, ohne zu wissen, ob dieser Wert tatsächlich in dieser Form auch vergeben werden konnte. Insbesondere ist dies bei den Vergleichen zu sehen, bei welchen nicht eindeutig klar ist, ob die Präferenz für das eine oder andere Attribut sein könnte. Demnach ist auch dieser unscharfe Aspekt zu analysieren und in das Entscheidungsmodell zu implementieren.

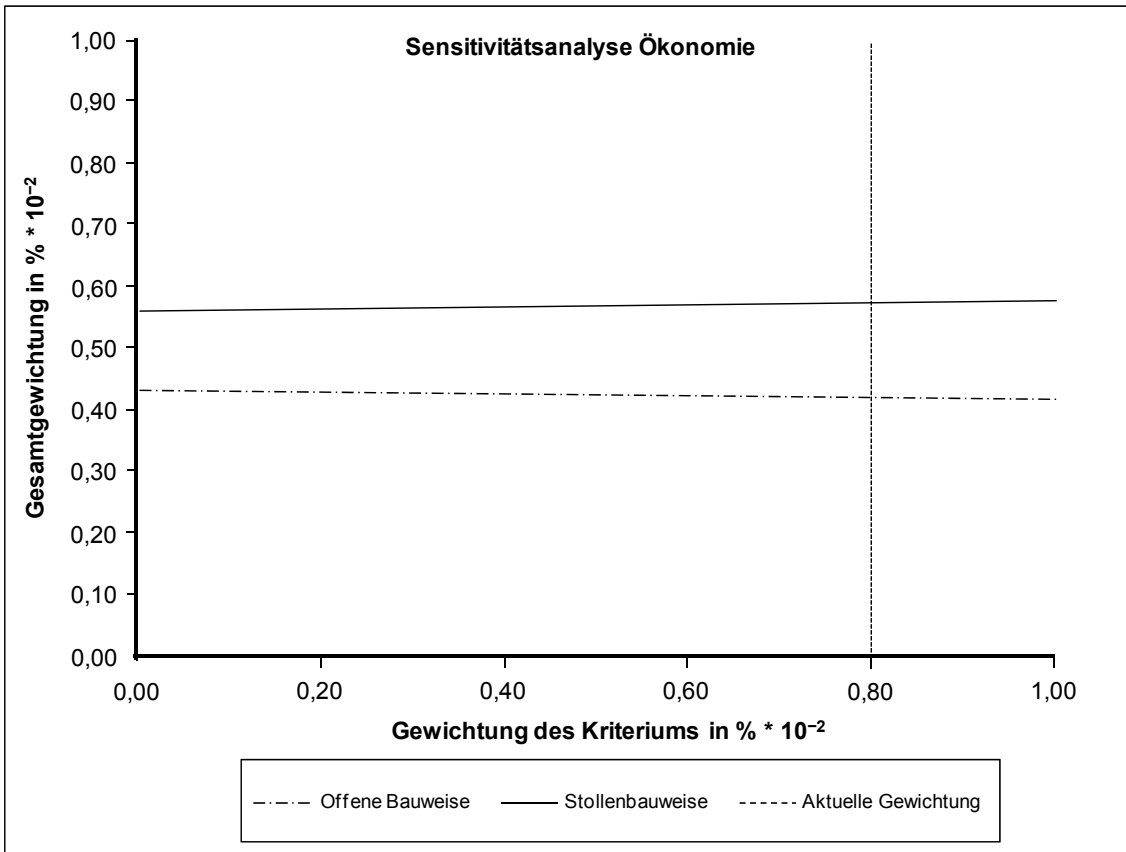


Abbildung 74: Sensitivitätsanalyse des Kriteriums ‚Ökonomie‘

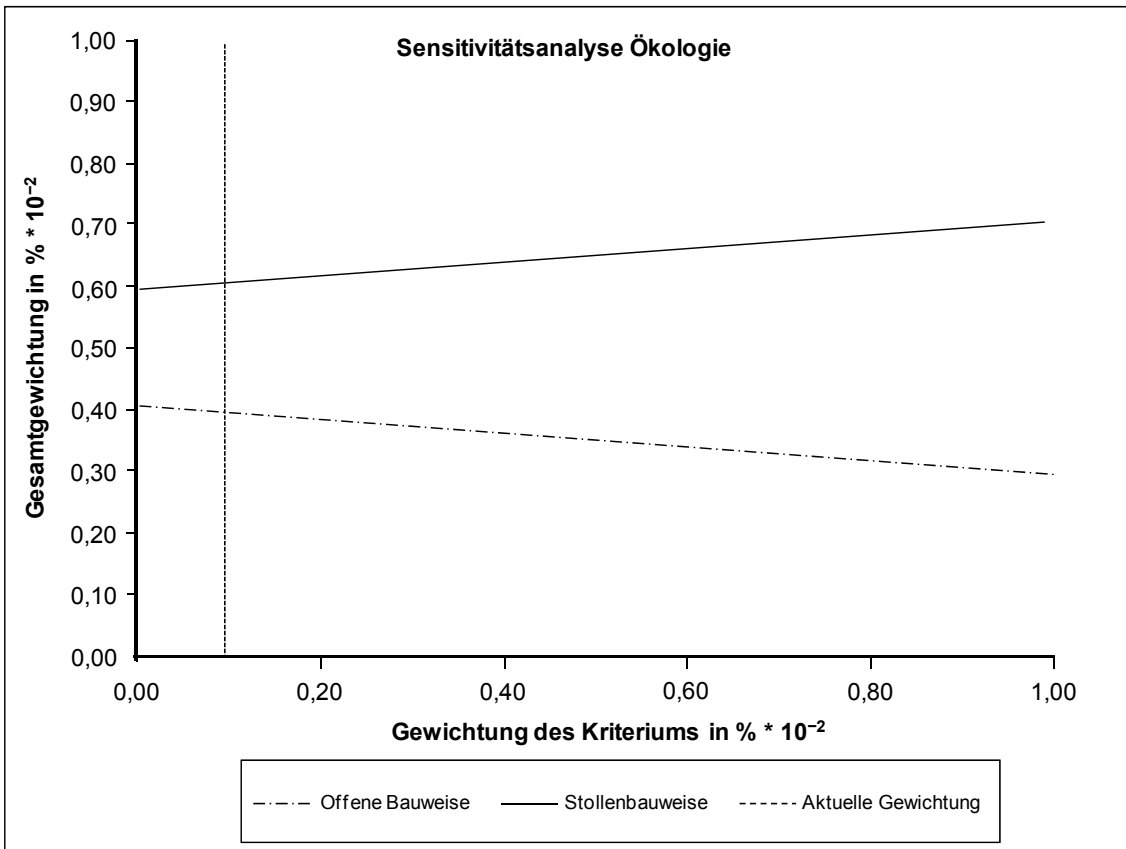


Abbildung 75: Sensitivitätsanalyse des Kriteriums ‚Ökologie‘

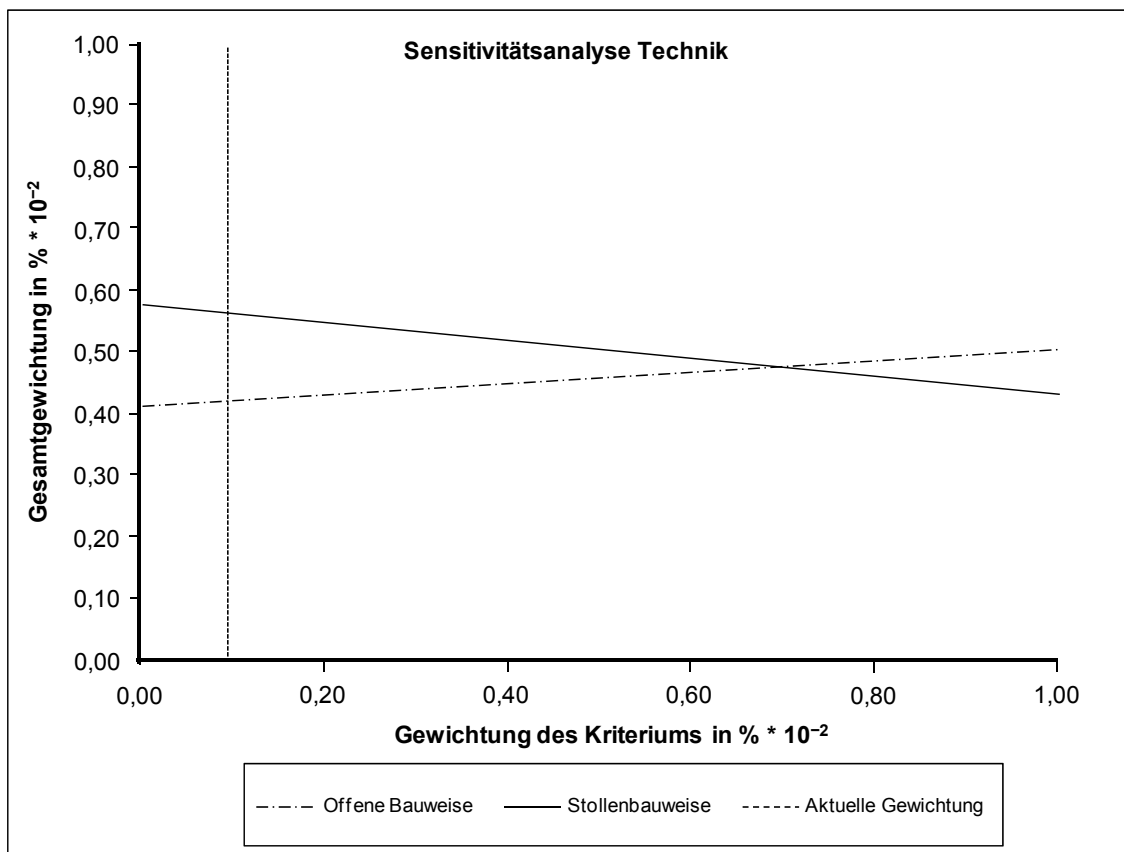


Abbildung 76: Sensitivitätsanalyse des Kriteriums ‚Technik‘

9.5.2 Kritische Betrachtung der Ergebnisse aus Test 1

Die Nutzung des Entscheidungsmodells unter Berücksichtigung des klassischen AHP hat gezeigt, dass eine praktikable und transparente Entscheidungssituation geschaffen wurde. Demnach wurde die zuvor geführte Entscheidungsfindung durch die Nutzung des erweiterten Entscheidungsmodells verifiziert. Hinzu kommt, dass eine breitere Berücksichtigung der Randbedingungen ein noch intensiveres Betrachtungsszenario geschaffen hat, was sich dadurch äußert, dass sämtliche Kriterien/Attribute einer tieferen Analyse unterzogen werden können. Insgesamt betrachtet, erlaubt das Modell eine Bewertung verschiedener Alternativen innerhalb eines Systems, wobei der Entscheider/Planer stets die Möglichkeit hat, Haupt- und Subkriterien nach den Wünschen der Projektgruppe zu gewichten, wobei diese ohne weiteres auch verändert werden können.

Das Gesamtergebnis zeigt in einer vereinfachten Darstellung die Präferenz des Entscheiders. Aufgrund des analytischen Vorgehens ist es einfach, den gesamten Bewertungsprozess zu verstehen und nachzuvollziehen, so dass die Transparenz nicht nur gewährleistet sondern auch erhöht wurde.

Als nachteilig könnte die Tatsache angesehen werden, dass ein Entscheider sich mit der AHP-Methodik auskennen muss. Die Nutzung der 9-Punkte-Skala erfordert nicht nur eine intensive Betrachtung der Randbedingungen, sondern auch ein gutes Handling mit den

einzelnen AHP-Werten. Bereits die Nutzung eines nächsthöheren AHP-Wertes kann in diesem Fall das Ergebnis beeinflussen.

Schließlich lässt sich festhalten, dass das Projekt ohne großen Aufwand in das Entscheidungsmodell überführt werden konnte. Das Modell erlaubt bereits in diesem Test die Verifikation der ursprünglichen Entscheidung, auch unter Berücksichtigung weiterer, für die Entscheidung maßgeblicher Kriterien.

Die Nutzung dieser ersten Stufe des Entscheidungsmodells erlaubt demzufolge eine objektive, erweiterte, intensive und flexible Analyse einer vorliegenden Entscheidungssituation. Aufgrund des prozessualen und hierarchischen Charakters des Entscheidungsmodells ist die Integration weiterer wichtiger Komponenten ohne weiteres möglich. Betrachtet man die Bewertung des ersten Tests, so fällt auf, dass zwar sämtliche Kriterien implementiert wurden, jedoch die Bewertung weitere Aspekte wie Unschärfe und Unsicherheit keine Berücksichtigung findet, um ein noch genaueres Betrachtungsszenario und demnach weitere Analysemöglichkeiten zu schaffen bzw. die richtige Wahl bzgl. der gemachten Entscheidung zu untermauern.

9.6 Test 2 – Nutzung des risikobasierten Fuzzy-Analytic Hierarchy Process

Im zweiten Test soll nun in Anlehnung an den ersten Test die Entscheidung erneut durchgeführt werden mit dem Unterschied, dass unsichere risikobasierte und unscharfe Parameter berücksichtigt werden. Die gesamte Projekthierarchie wird nicht verändert, da sonst die einzelnen Ergebnisse nicht miteinander vergleichbar sind. Die Ergebnisse des ersten Tests haben die Funktionalität des Systems gezeigt, so dass ein Einsatz unter realen Bedingungen ohne weiteres möglich ist. Die Nutzung von qualitativen sowie quantitativen Aspekten in einem Entscheidungsmodell erweist sich als ein großer Vorteil, da sämtliche Gewichtungen gleichzeitig berücksichtigt werden.

Um die Ganzheitlichkeit und Transparenz noch weiter zu erhöhen, ist zunächst das Kriterium bzw. der Aspekt der Risikoanalyse zu implementieren. Typischerweise werden Risikoanalysen in der Bauindustrie nur bedingt durchgeführt, schon gar nicht im Zuge eines Entscheidungsprozesses. Betrachtet man die Vielzahl der verschiedenen Risikoanalysemethoden (siehe Kapitel 7), besteht die Schwierigkeit darin, das Risiko korrekt zu erfassen und in die Entscheidung zu integrieren, so dass zumeist solche Aspekte entweder gar nicht oder nebenbei durchgeführt werden.

Für eine weitere Untersuchung könnte es durchaus möglich sein, ein zusätzliches Hauptkriterium in Form von Risiko zu implementieren, welches in der Entscheidungsfindung bspw. qualitativ beurteilt wird. Die Gefahr besteht jedoch darin, dass durch subjektive Gewichtsverteilungen das Kriterium Risiko in nur einem geringen Maße berücksichtigt wird, so dass das Risiko nicht zufriedenstellend dargestellt wird. Vielmehr ist es wichtig, eine ausführliche Risikoanalyse vor Durchführung des Entscheidungsprozesses vorzunehmen, um daraufhin die Ergebnisse in das Modell einfließen zu lassen.

Wie bereits in Kapitel 7 erwähnt, soll die Risikoanalyse lediglich für den finanziellen Aspekt vorgenommen werden. Gerade weil der finanzielle Aspekt mit großem Abstand das wichtigste Kriterium während der Planungsphase darstellt, ist die quantitative Risikoanalyse in dieser Phase von großem Nutzen.

Der Hauptgrund für die Nutzung der risikobasierten finanziellen Größen ist, zu zeigen, dass mit Hilfe der klassischen AHP-Struktur keine verkomplizierte Entscheidungssituation, sondern eine breitere Analysemöglichkeit geschaffen wird, die den Entscheidern dabei helfen soll, weitere wichtige Aspekte zu fokussieren.

9.6.1 Identifikation der maßgebenden Kriterien

Im Zuge des ersten Tests wurde gezeigt, dass sich der Einfluss der Kriterien *Initialkosten*, *Mehrkosten durch Risiko*, *Folgekosten* sowie *Bauzeit* auf das Gesamtergebnis auf ca. 78% belaufen. Dementsprechend müssen diese Kriterien einer weiteren Betrachtung unterzogen werden, da der erste Test zwar die Bewertung transparenter und nachvollziehbarer gestaltet hat, jedoch bei genauerer Untersuchung das Ergebnis an sich instabil ist. Folglich werden diese drei Kriterien in diesem Abschnitt hinsichtlich Risiko und Unschärfe betrachtet.

9.6.1.1 Folgekosten als unscharfes qualitatives Kriterium

Im Zuge der Planung wurden die *Folgekosten* qualitativ mit dem AHP-Wert ,1' bewertet. Zwar war bekannt, dass eine stärkere Präferenz für die offene Bauweise vorliegt, diese konnte in der klassischen Methode bis zu diesem Zeitpunkt nicht berücksichtigt werden. Die Gründe für den Wert ,1' wurden bereits beschrieben, jedoch stellte sich heraus, dass dies lediglich eine Einschätzung seitens der Entscheider war. Ob die *Folgekosten* tatsächlich für die offene Bauweise sprechen, kann bspw. durch Ermittlung einer ausführlichen Kalkulation unter Berücksichtigung des Ansatzes zur Ermittlung der Lebenszykluskosten nach Vogt geschehen [187]. Somit wäre es in einem weiteren Schritt möglich, die ermittelten Kosten in das Modell zu implementieren. Da diese Kosten nicht berechnet wurden, muss die Unsicherheit bzw. Unschärfe auf eine andere Art berücksichtigt werden, nämlich durch Nutzung der Fuzzyfunktionen. Der zuvor scharfe festgelegte AHP-Wert wird dementsprechend fuzzyfiziert, so dass die Unschärfe hinsichtlich der Folgekosten qualitativ darstellbar ist.

9.6.1.2 Bauzeit als unscharfes quantitatives Kriterium

In der Planungsphase wurde der Aspekt *Bauzeit* zwar als sehr wichtig deklariert, jedoch wurden ausführliche Untersuchungen nicht vorgenommen. Die Bauzeiten beider Alternativen wurden mit 24 Monaten (offene Bauweise) sowie 30 Monaten (geschlossene Bauweise) festgelegt, ohne dabei zu eruieren, wie diese Zahlen überhaupt zustande gekommen sind.

Die einzige wichtige Information dabei war, dass eine Überschreitung der Bauzeit von 30 Monaten zu Vertragsstrafen geführt hätte. Es stellte sich zu Beginn heraus, dass die Arbeiten bei der Stollenbauweise zumindest auch nach 27 Monaten für beendet erklärt werden konnten, je nachdem wie die Vortriebsarbeiten voranschreiten. Demnach waren für die Stollenbauweise die 30 Monate als sehr vorsichtig, die Bauzeit von 24 Monaten bei der offenen Bauweise als sehr optimistisch kalkuliert worden. Aus diesen Informationen lassen sich nun im Nachgang Fuzzy-Funktionen bilden, die in DEMUS² implementiert werden. Wie bereits beschrieben werden im Rahmen dieser Arbeit sämtliche quantitativen unscharfen Daten als Dreiecksfunktionen dargestellt. Für diese Untersuchung werden folgende Funktionen gebildet (Abbildung 77), die anschließend in die Software DEMUS² integriert werden. Hierbei sei angemerkt, dass das Kriterium ‚Bauzeit‘ den Vorteil einer vorzeitigen Beendigung der Baumaßnahme berücksichtigen soll. Sollte eine längere Bauzeit als 30 Monate notwendig sein, so sind Vertragsstrafen zu erwarten. Diese Option findet in der Risikobetrachtung Berücksichtigung und wird in dem vorliegenden Fall nicht weiter behandelt.

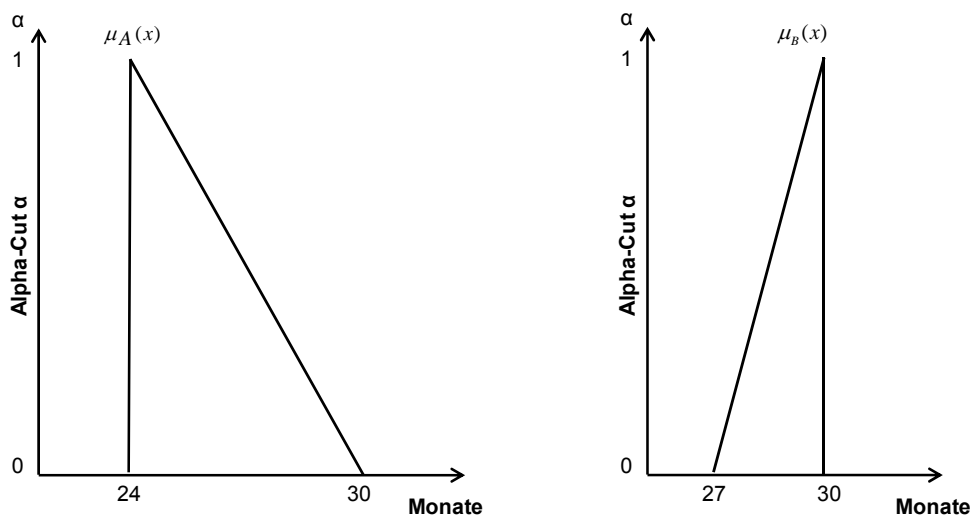


Abbildung 77: Fuzzy-Funktionen; Offene Bauweise (links), Geschlossene Bauweise (rechts)

9.6.1.3 Initialkosten und Mehrkosten aus Risiko als risikobasierte unsichere quantitative Kriterien

Die *Initialkosten* (Einfluss ca. 44% auf das Gesamtergebnis) stellen das mit Abstand wichtigste Kriterium dar. Im Zuge der ursprünglichen Planung lagen zwei Leistungsverzeichnisse vor [165], anhand welcher die Gesamtkosten miteinander verglichen wurden. Gemäß den Ausführungen in Kapitel 7 sind finanzielle Risiken vorab zu identifizieren und in einer Kalkulation zu berücksichtigen, um so Risiken zu steuern und das Projekt nachhaltig abzuwickeln. Problematisch erscheint die Risikobetrachtung für dieses Beispiel deswegen, weil eine solche Risikoanalyse nicht durchgeführt wurde, so dass eine nachträgliche Untersuchung ein schwieriges Unterfangen darstellt.

Betrachtet man dennoch die beiden Leistungsverzeichnisse, so fällt auf, dass zumindest für jeweils zwei maßgebliche Positionen nachträglich eine Risikobetrachtung vorgenommen werden kann. Dies betrifft die Positionen *Trägerverbau* (offene Bauweise) sowie *Stollenverbau aus Stahlbögen mit Holzverzug* (geschlossene Bauweise), da in diesen Positionen die Berücksichtigung des Baustoffes Stahl stattfindet. Darüber hinaus stellt der Bodenaushub bzw. die Bodenverfüllung in beiden Leistungsverzeichnissen ein Risiko hinsichtlich der Mehrmengen dar. Des Weiteren stellt die Bauzeitüberschreitung ein nicht kalkulierbares Risiko dar. Bereits im ersten Test wurde für beide Alternativen eine Bauzeitüberschreitung geschätzt. Dennoch sollte dieser Aspekt aufgrund des vorhandenen Risikos in die Risikosimulation mit berücksichtigt werden. Diese maßgeblichen Positionen werden im Folgenden ausführlich betrachtet.

Risikofaktor Stahlpreis

Der Baustoff Stahl war in der Vergangenheit starken Preisschwankungen unterworfen, so dass ein Einheitspreis für den Baustoff Stahl stets neu ermittelt werden musste. Betrachtet man die Stahlpreisentwicklung in den Jahren 2006 bis 2011 (Abbildung 78) so ist zu erkennen, dass genau zum Zeitpunkt der Erstellung der Leistungsverzeichnisse (Ende 2007) der Stahlpreis bei ca. 700 € pro Tonne lag. Innerhalb eines halben Jahres ist dieser um ca. 55% auf bis zu knapp 1.100 € pro Tonne gestiegen. Folglich müsste der Einheitspreis angepasst werden, um das Risiko der Preisschwankung zu berücksichtigen.

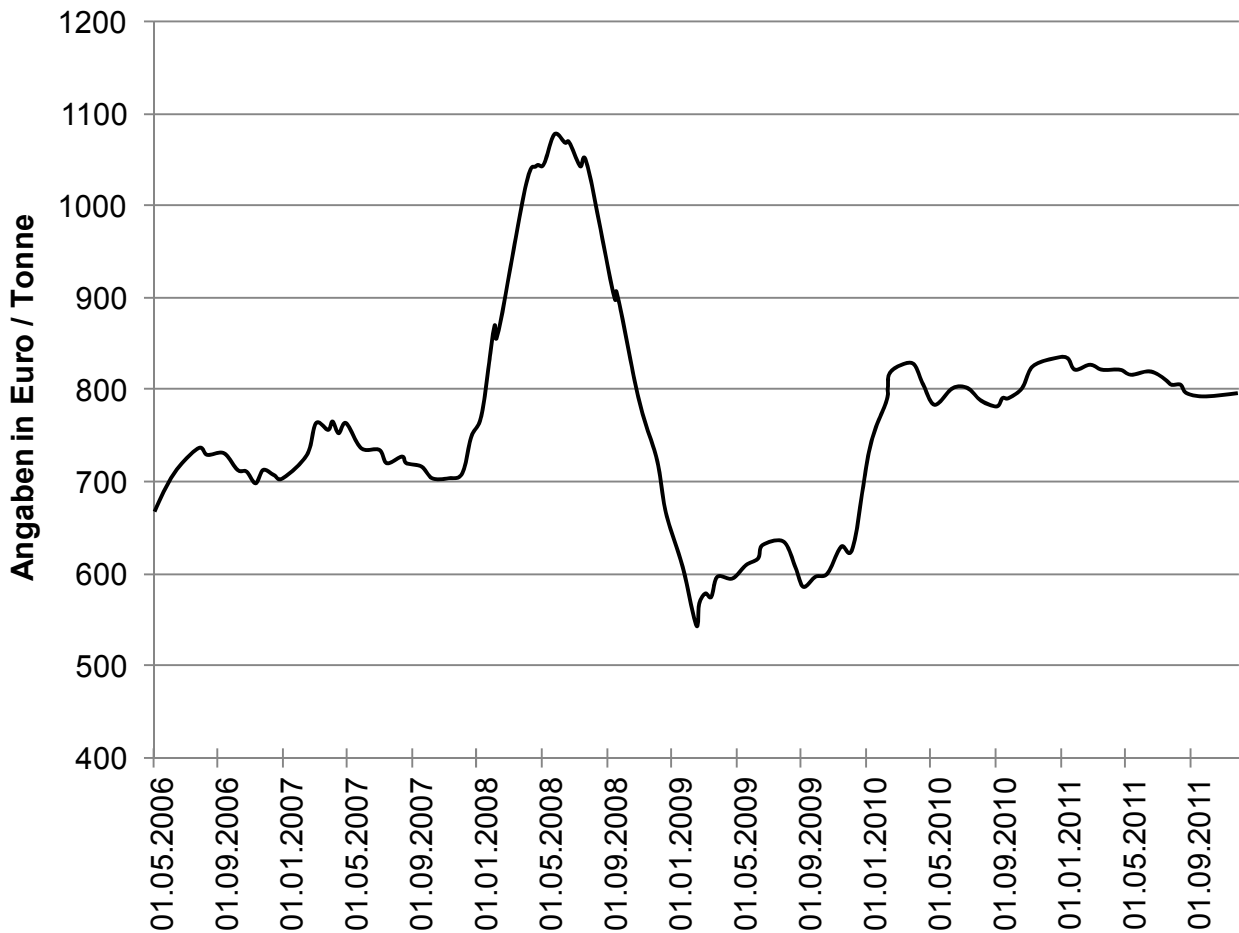


Abbildung 78: Entwicklung des Stahlpreises von 2006 bis 2011, nach [164]

Um die Mengenangaben für den Stahl zu ermitteln sind die Baugruben- sowie Stollenabmessungen gegeben. Für die offene Bauweise wird davon ausgegangen, dass alle zwei Meter ein Stahlträger zu setzen ist, welcher ca. 150 kg pro Meter wiegt. Für die Stollenbauweise ist ebenfalls alle zwei Meter ein Ausbaubogen anzubringen, welcher aufgrund des Querschnitts und der idealeren Lastabtragung ein Gewicht von ca. 75 kg pro Meter aufweist. Insgesamt ergeben sich für die Stollenbauweise 28,5 Tonnen und für die Offene Bauweise ca. 385 Tonnen Stahl, der bei beiden Alternativen im Boden verbleibt. Ein Rückbau der Stahlträger ist nicht vorgesehen, so dass lediglich die Holzausfachung entfernt wird.

Die Leistungsverzeichnisse wurden im Jahr 2007 erstellt, so dass tatsächlich der Preis von 700 € pro Tonne Stahl durchaus realistisch erschien. Da die Planungsphase jedoch länger andauert hat (ca. 7 Monate), hätte der aktuelle Stahlpreis berücksichtigt werden müssen. Folglich ist in der nachträglichen Risikoanalyse der Preis von ca. 1.100 € pro Tonne in den Einheitspreis einzurechnen. Demnach handelt es sich hier um die Nutzung von Schätz-, Maximal- und Minimalwerten, welche idealerweise mit einer Beta-PERT-Verteilung abgebildet und angenommen werden kann (Abbildung 79).

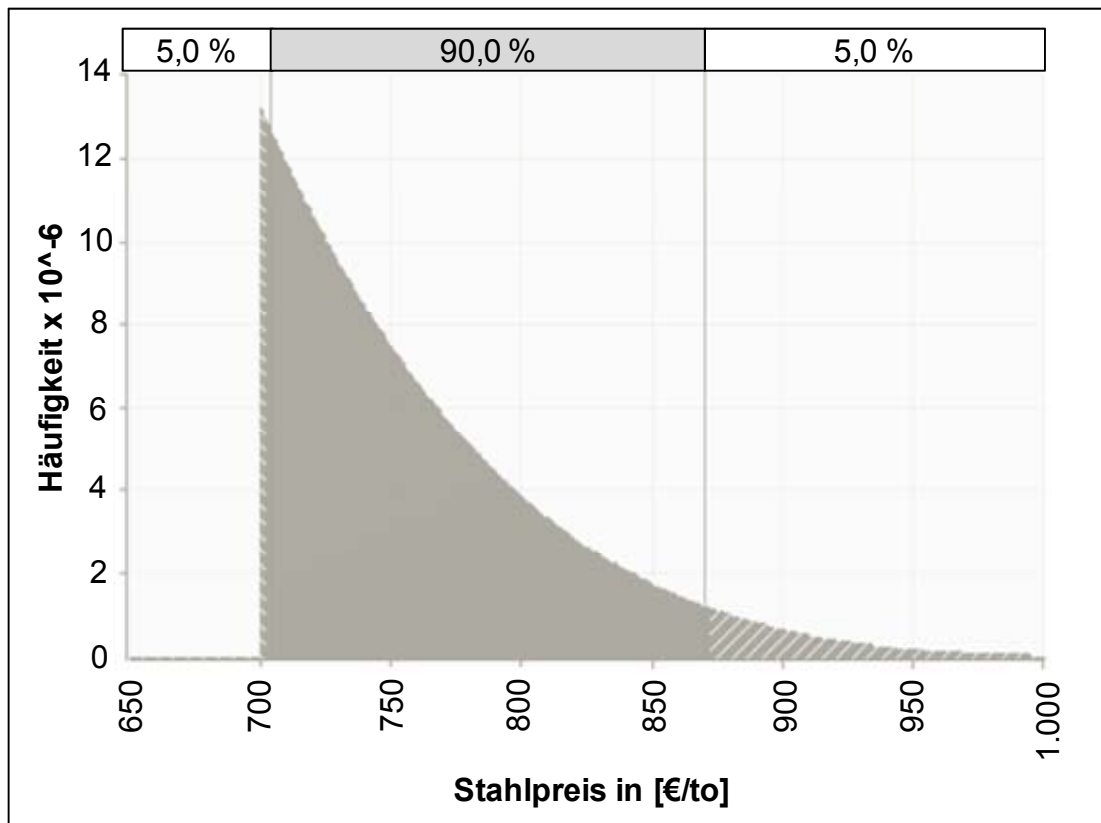


Abbildung 79: Beta-PERT-Verteilung für die Position Stahl

Risikofaktor Mehrmengen Bodenaushub/Bodenverfüllung

In der klassischen Kalkulation stellt die Bestimmung der Bodenmengen ein hohes Risiko dar. Im Vorfeld ist es den Planern grundsätzlich nicht möglich, die Mengen exakt abzuschätzen. Für den vorliegenden Fall wurden beide Leistungsverzeichnisse hinsichtlich der Bodenmengen untersucht. Bereits zu Beginn fällt auf, dass die Mengen bei der offenen Bauweise grundsätzlich aufgrund der Größe und Tiefe der zu planenden Baugrube erheblich größer ausfallen als bei der geschlossenen Bauweise. Unabhängig dieser Tatsache ist die Gefahr einer Unterschreitung der kalkulierten Mengen nicht gegeben, da mit Hilfe der Pläne das Minimum relativ schnell ermittelt werden konnte. Dennoch sind Mehrmengen kein ungewöhnlicher Sachverhalt, zumal nicht bekannt ist, ab wann genau tragfähiger Boden zu erwarten ist. Ist zum Beispiel ein Aushub von nicht tragfähigem Boden mit einer vorläufigen Mengenangabe ausgeschrieben und stellt sich während der Arbeiten heraus, dass ein Mehraushub erforderlich wird, so stellt der Aushub dieser Mehrmenge keine bloße Mengenerhöhung im Sinne des § 2 Nr. 3 Abs. 2 VOB/B dar, sondern eine Leistungsänderung im Sinne der §§ 1 Nr. 3, 2 Nr. 5 VOB/B [54]. Dieses durchaus realistische Risiko ist demnach in ein solches Leistungsverzeichnis zu berücksichtigen.

Als Wahrscheinlichkeitsverteilung wird auch hier eine Beta-PERT-Verteilung gewählt, da ebenfalls mit Minimum-, Maximum- sowie Schätzwerten gerechnet wird. Die einzelnen Positionen sind in den Tabelle 21 bis 23 dargestellt.

Position Offene Bauweise		Einheit	Menge	Minimum	Schätzwert	Maximum	Einheitspreis
	Bodenaushub Klasse 3 bis 5	m³	8.000,00	7.900,00	8.000,00	9.500,00	32,61 €
	Zulage für Bauschutt, Schotter	m³	404,00	390,00	404,00	440,00	17,54 €
	Aushub Klasse 6	m³	3.800,00	3.600,00	3.800,00	4.200,00	7,21 €
	Aushub Klasse 7	m³	1.500,00	1.300,00	1.500,00	1.700,00	28,35 €
	Füllsand	m³	8.000,00	7800,00	8000,00	9500,00	18,39 €

Tabelle 21: Risiko für Mehrmengen Boden, Pos. Kanalbau SW, offene Bauweise

Position Offene Bauweise		Einheit	Menge	Minimum	Schätzwert	Maximum	Einheitspreis
	Bodenaushub Klasse 3 bis 5	m³	4.000,00	3.900,00	4.000,00	5.000,00	32,61 €
	Zulage für Bauschutt, Schotter	m³	235,00	200,00	235,00	270,00	17,54 €
	Aushub Klasse 6	m³	3.800,00	3.600,00	3.800,00	4.200,00	7,21 €
	Aushub Klasse 7	m³	1.500,00	1.300,00	1.500,00	2.000,00	28,35 €
	Füllsand	m³	2.900,00	2800,00	2900,00	4000,00	18,39 €

Tabelle 22: Risiko für Mehrmengen Boden, Pos. Kanalbau RW, offene Bauweise

Position Geschlossene Bauweise		Einheit	Menge	Minimum	Schätzwert	Maximum	Einheitspreis
	Bodenabbau im Stollen	m³	4.040,00	3.900,00	4.040,00	4.400,00	247,15 €
	Zulage Bodenklasse 6	m³	880,00	840,00	880,00	950,00	89,76 €
	Zulage Bodenklasse 7	m³	700,00	670,00	700,00	730,00	179,52 €
	Mehraushub für Ausbrüche	m³	400,00	360,00	400,00	440,00	21,00 €
	Tunnelraumverfüllung	m³	4.040,00	3.900,00	4.040,00	4.400,00	35,93 €

Tabelle 23: Risiko für Mehrmengen Boden, Pos. Kanalbau RW/SW, geschl. Bauweise

Risikofaktor Bauzeitüberschreitung

Wie bereits beschrieben wurden bzgl. der Bauzeitüberschreitung Werte für beide Alternativen geschätzt. Da jedoch für beide Alternativen Erfahrungswerte für die Durchführung der Bauarbeiten vorliegen, können die Schätzwerte um ein Minimum und ein Maximum ergänzt werden. Auch hierbei handelt es sich um die Nutzung von Schätz-, Maximal- und Minimalwerten, welche ebenso mit einer Beta-PERT-Verteilung abgebildet werden können (Tabellen 24 und 25).

Vetragsstrafe	Einheit	Anzahl	Minimum	Schätzwert	Maximum	Einheitspreis
	Tage	15,00	5,00	15,00	20,00	7.500,00 €

Tabelle 24: Risiko für Bauzeitüberschreitung, offene Bauweise

Vetragsstrafe	Einheit	Anzahl	Minimum	Schätzwert	Maximum	Einheitspreis
	Tage	3,00	3,00	3,00	7,00	7.500,00 €

Tabelle 25: Risiko für Bauzeitüberschreitung, geschlossene Bauweise

Ergebnis

Im Idealfall müssten nicht nur der Stahlpreis, die Bodenmehr- und mindermengen sowie die Bauzeitüberschreitung als risikobasierte Positionen betrachtet werden, sondern viele weitere Positionen, da der Einfluss bestimmter Positionen auf die gesamte Kalkulation groß sein kann. Für diese Arbeit wurde ein weiteres Excel-Sheet entwickelt, in welches alle Positionen beider Leistungsverzeichnisse implementiert wurden. Der Anwender hätte nunmehr die Möglichkeit, bestimmten Positionen weitere Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu vergeben. Idealerweise verfügt ein Anwender über Datenbanken vergangener Projekte, mit welchen er bestimmte Positionen besser abschätzen kann. Folglich werden so Risikoszenarien generiert, welche die Unsicherheiten für eine erste Kalkulation repräsentieren. Mit Hilfe dieser Methodik ist es möglich, die Chancen und Risiken frühzeitig aufzudecken, bevor das Projekt überhaupt ausgeführt wird.

Bezugnehmend auf die Datenbanken wäre es bspw. von großem Vorteil, wenn bei einer Kalkulation bereits Erfahrungswerte früherer Projekte mit berücksichtigt werden könnten. Demzufolge hätte man mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsfunktionen verschiedene Szenarien definieren können. Projekte bzw. Ausführungspositionen, welche sich besser als erwartet entwickelt haben, könnte man als optimistische Szenarien bezeichnen. Betrachtet man die Wahrscheinlichkeitsfunktionen, so würde man die Wahrscheinlichkeit innerhalb des Konfidenzintervalls bei 10% setzen. Analog dazu würde man ein erwartetes Szenario bei $p = 50\%$ und ein pessimistisches Szenario bei $p = 90\%$ setzen (siehe Abbildung 80).

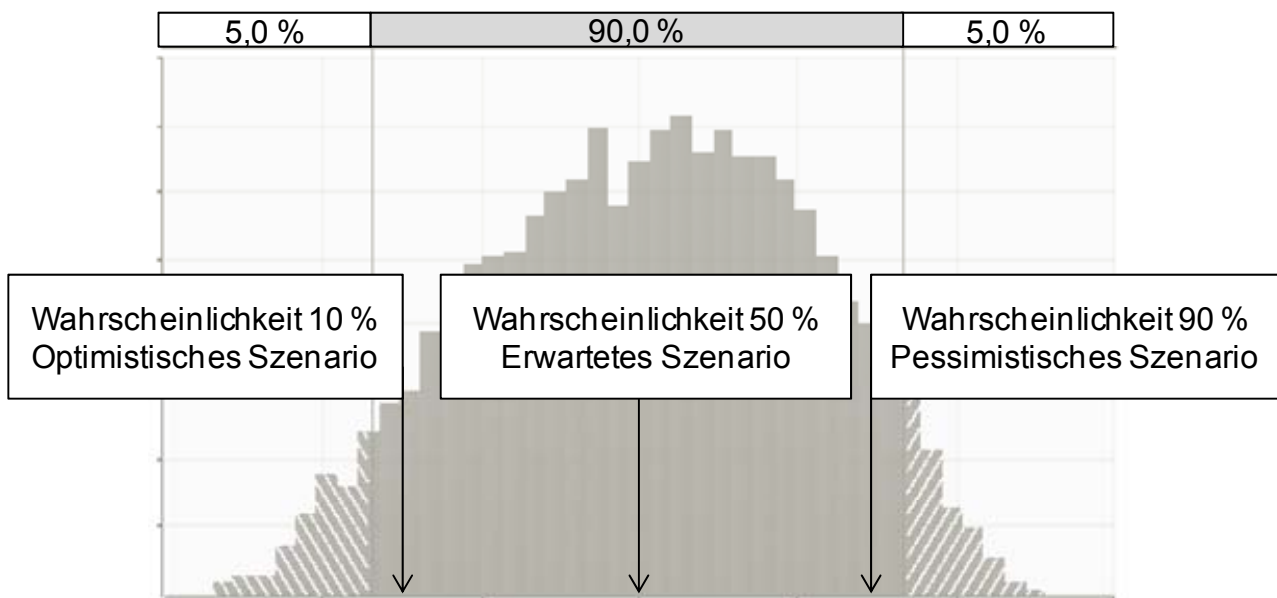


Abbildung 80: Szenarioeinteilung für einzelne Positionen

Analog zu dieser Einteilung lässt sich nun mit dem Programm @Risk eine Monte-Carlo-Simulation für beide Leistungsverzeichnisse durchführen. Das Ergebnis ist in den Abbildung 81 bis 84 dokumentiert. Es ist zu erkennen, dass die kalkulierten Kosten bei der offenen Bauweise definitiv überschritten werden (Eintrittswahrscheinlichkeit $p = 0,20\%$). Dies

ist dem Umstand geschuldet, dass die Kosten für Stahl innerhalb eines halben Jahres stark gestiegen sind. Dennoch sind Unterschiede in beiden Analysen zu erkennen: Betrachtet man die erwarteten Kosten inkl. möglicher Vertragsstrafen ($p=50\%$), so ist festzustellen, dass bei der geschlossenen Bauweise die Mehrkosten um ca. 36.500 € steigen werden, wohingegen die Mehrkosten bei der offenen Bauweise bei mehr als 144.000 € liegen. Würde man das pessimistische Szenario ($p=90\%$) betrachten, würden die Mehrkosten für die offene Bauweise auf mehr als 195.000 € (geschlossene Bauweise ca. 78.000 €) steigen. Bei der offenen Bauweise sind die höheren Mehrkosten deswegen so groß, weil zum einen die Stahlmenge um das ca. 13,5-fache höher ausfällt und demnach der Einfluss des Stahlpreises um ein Vielfaches höher ist als bei der geschlossenen Bauweise, und zum anderen, weil die Wahrscheinlichkeit sehr hoch ist, dass eine Überschreitung der Bauzeit erfolgen wird.

Position	Gesamtbetrag	Tasächliche Wahrscheinlichkeit	Szenario bei 50%
<i>Baustelleneinrichtung</i>	176.481,31 €		
<i>Freimachen des Baufeldes</i>	21.668,33 €		
<i>Kanalbau RW SW</i>	2.792.227,76 €	31,70%	2.800.539,32 €
<i>Straßenbau</i>	47.432,42 €		
<i>Hausanschlüsse</i>	171.767,74 €		
<i>Sonstige Arbeiten</i>	8.090,52 €		
<i>Stundenlohnarbeiten</i>	12.920,00 €		
<i>Vertragsstrafe</i>	22.500,00 €		26.364,37 €

Gesamtsumme ohne kalk. Vertragsstrafe	3.230.588,08 €
Wahrscheinlichkeit	31,70%

Gesamtsumme mit kalk. Vertragsstrafe	3.253.088,08 €
Wahrscheinlichkeit	24,18%

<i>Risikosumme-Szenarien zzgl. Vertragsstrafe</i>	<i>Differenz Risikosumme zu Gesamtsumme</i>
<i>bei 10%</i>	
3.238.053,42 €	7.465,34 €
<i>bei 50%</i>	
3.268.303,70 €	37.715,62 €
<i>bei 90%</i>	
3.308.266,96 €	77.678,88 €

Abbildung 81: Ergebnisse der MCS-Analyse für die geschlossene Bauweise

Position	Gesamtbetrag	Tasächliche Wahrscheinlichkeit	Szenario bei 50%
Baustelleneinrichtung	287.220,30 €		
Offene Bauweise	206.646,36 €		
Kanalbau RW	1.041.882,11 €	4,24%	1.054.803,42 €
Kanalbau SW	1.441.988,17 €	1,52%	1.462.037,88 €
Hausanschlüsse	170.295,49 €		
Sonstige Arbeiten	50.052,38 €		
Beweissicherung	20.592,00 €		
Stundenlohnarbeiten	10.640,00 €		
Vertragsstrafe	112.500,00 €		107.841,77 €

Gesamtsumme <u>ohne</u> kalk. Vertragsstrafe	3.229.316,81 €
Wahrscheinlichkeit	0,21%

Gesamtsumme <u>mit</u> kalk. Vertragsstrafe	3.341.816,81 €
Wahrscheinlichkeit	12,65%

Risikosumme-Szenarien zzgl. Vertragsstrafe	Differenz Risikosumme zu Gesamtsumme
bei 10%	
3.323.312,60 €	93.995,79 €
bei 50%	
3.373.565,23 €	144.248,42 €
bei 90%	
3.423.429,15 €	194.112,34 €

Abbildung 82: Ergebnisse der MCS-Analyse für die offene Bauweise

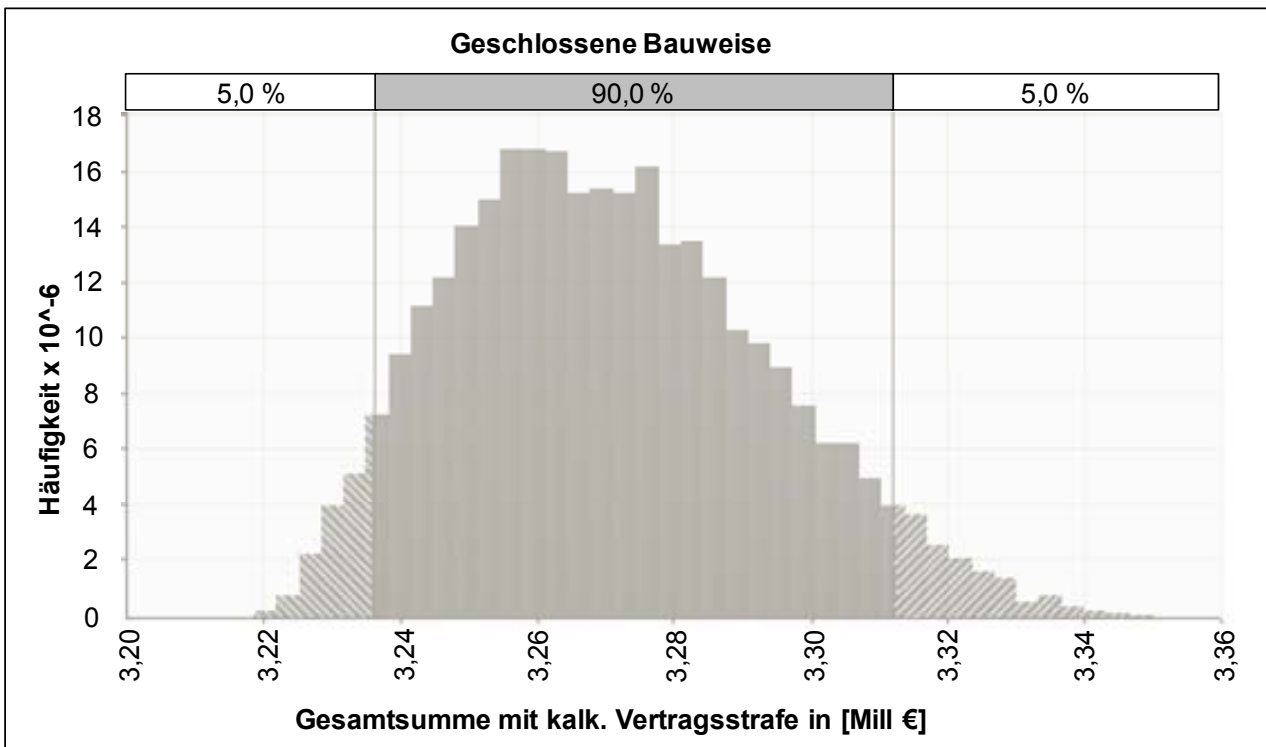


Abbildung 83: Dichtefunktion der Gesamtsumme für die geschlossene Bauweise

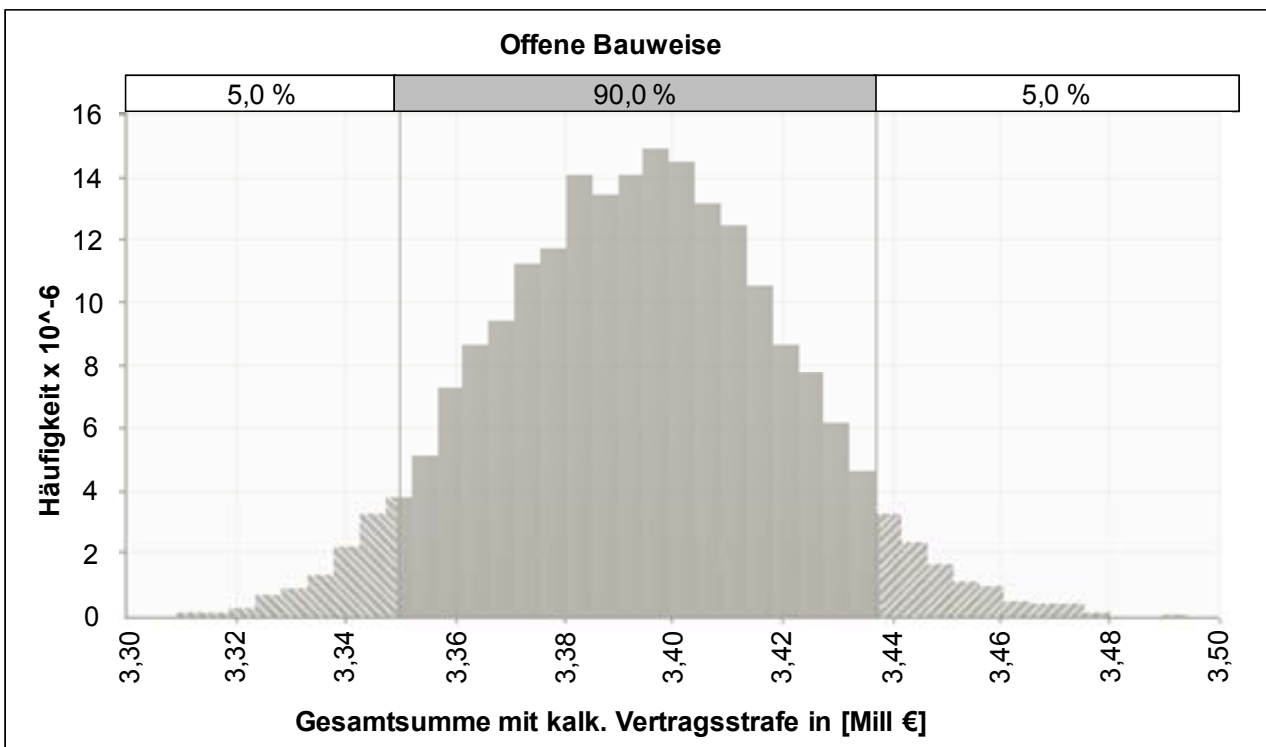


Abbildung 84: Dichtefunktion der Gesamtsumme für die offene Bauweise

Gerade durch die Nutzung einer solchen Risikoanalyse kann ein Entscheider nicht nur mögliche Szenarien genauer evaluieren, sondern vielmehr monetäre Risikobeträge zur ursprünglichen Kalkulation ermitteln. Diese Beträge, welche durch die Berücksichtigung historischer Daten generiert wurden, können die Unsicherheit eines Projektes minimieren. Demnach ist die Durchführung einer Risikoanalyse eine Möglichkeit, Kostenfaktoren in einer Entscheidungssituation unter Zuhilfenahme verschiedener Risikoszenarien breiter

aufzuzeigen. Der Gebrauch von Datenbanken bzw. Statistiken erlaubt eine exaktere Vorhersage der kalkulierten Kosten.

9.6.2 Implementierung der unscharfen und unsicheren Faktoren in das Entscheidungsmodell

Die gemachten Untersuchungen hinsichtlich der drei risikobehafteten und unscharfen Größen werden im nächsten Schritt in DEMUS² integriert. Der Vorteil dabei ist, dass sämtliche Analysen nicht getrennt voneinander betrachtet werden müssen, sondern alle gemeinsam in eine Methodik implementiert werden. Als Vorteil erweist sich an dieser Stelle die bereits erstellte Hierarchie aus der ersten Untersuchung, die auch in dieser Analyse bestehen bleiben muss. Auf eine erneute Darstellung der Kriterien sowie Vergleiche wird hier verzichtet, da alle bestehenden Vergleiche ihre Gültigkeit behalten. Zusätzlich zu der ersten Untersuchung hat der Entscheider die Möglichkeit verschiedene Szenarien in Abhängigkeit des Optimismus-Index sowie dem Alpha-Cut zu untersuchen. So werden Rückschlüsse hinsichtlich der Qualität von Informationen und Entscheiderverhalten möglich. Für die Analyse werden mehrere Szenarien untersucht, indem die maßgeblichen Kriterien sukzessiv nacheinander dazu geschaltet werden.

9.6.2.1 Analyse der risikobasierten Initialkosten zzgl. der Mehrkosten aus Risiko

Im ersten Schritt werden die Daten aus der Risikoanalyse in DEMUS² implementiert. Die Risikoanalyse hat insgesamt gezeigt, dass die offene Bauweise risikoreicher ist als die Stollenbauweise. Für eine erste Analyse werden folgende Szenarien untersucht:

- Offene Bauweise $p = 50\%$; Geschlossene Bauweise $p = 50\%$
- Offene Bauweise $p = 10\%$; Geschlossene Bauweise $p = 90\%$
- Offene Bauweise $p = 90\%$; Geschlossene Bauweise $p = 10\%$

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Kriterien das Gesamtergebnis im Vergleich zum 1. Test beeinflussen. Je nachdem welches Szenario untersucht wird, ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse (Abbildung 85). Geht man davon aus, dass die Kosten erwartet werden ($p = 50\%$), so unterscheidet sich das Ergebnis zum ersten Test minimal voneinander. Gehen die Entscheider davon aus, dass die Kosten bzgl. der offenen Bauweise sehr pessimistisch betrachtet werden ($p = 90\%$; hohes Risiko, dass die Kosten stark überschritten werden), so wird deutlich, dass die geschlossene Bauweise an prozentualem Gewicht dazugewinnt. Für die weiteren Untersuchungen werden nunmehr diese beiden extremalen Szenarien verfolgt, die jeweils das Maximum (OB 90%/GB 10%) sowie das Minimum (OB 10%/GB 90%) darstellen. Zu beachten ist, dass das Ergebnis einen scharfen Wert suggeriert. Die *Initialkosten* wurden als ‚unsicher‘ deklariert, so dass der Sonderfall der fuzzybasierten Bewertung zum Einsatz kam und demnach das Ergebnis in Form

einer Singleton-Funktion berechnet wurde. Für alle λ und α gilt je Untersuchungsszenario ein und dasselbe Ergebnis, wie im nachfolgenden Graphen gezeigt wird.

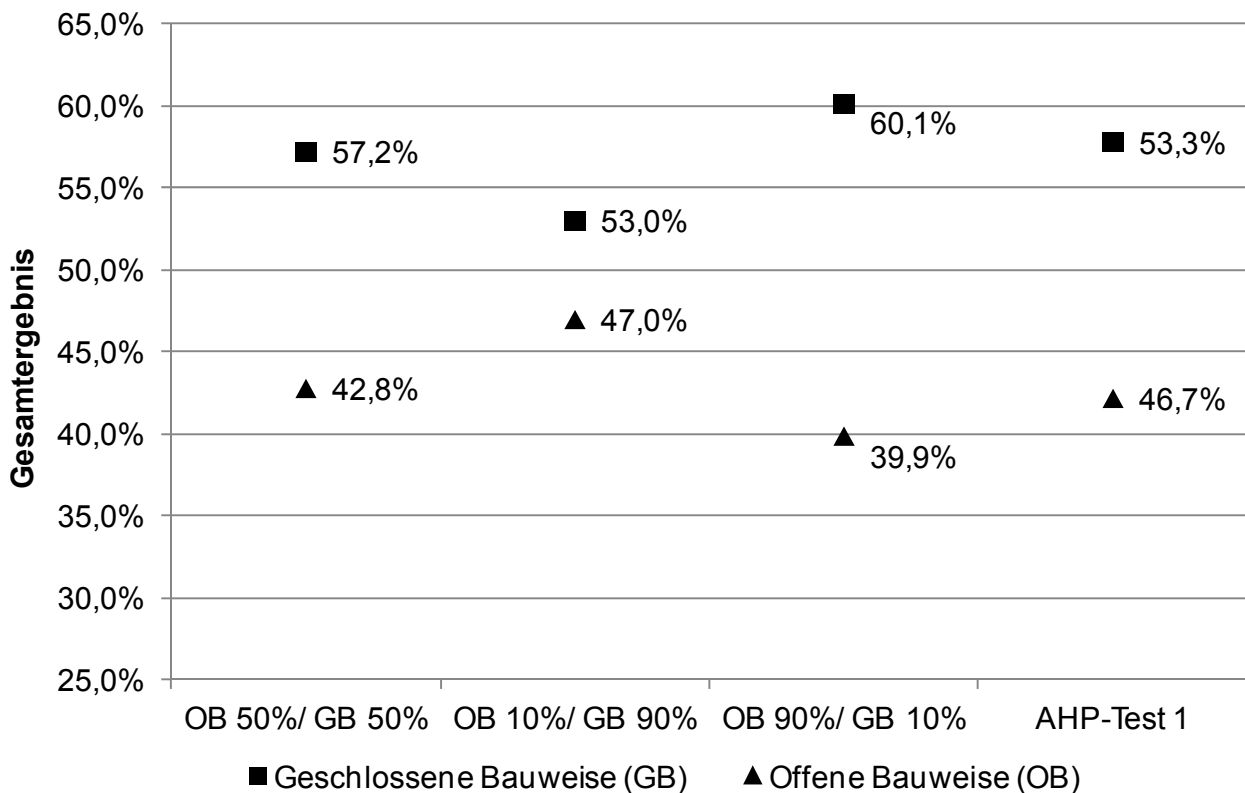


Abbildung 85: Gesamtgewichtung der Alternativen einzelner Szenario-Analysen

9.6.2.2 Analyse der Folgekosten und risikobasierten Initial- und Mehrkosten

Im Rahmen dieser Analyse werden die *Folgekosten* als zusätzliches unscharfes Kriterium betrachtet. Zuvor wurden die *Folgekosten* für beide Alternativen mit dem AHP-Wert ‚1‘ bewertet, wobei hinzuzufügen ist, dass dieser Wert nun fuzzyfiziert wird. Mit Hilfe des Optimismus-Index wird die Präferenz für die eine oder andere Alternative festgelegt. Der Alpha-Cut beschreibt hierbei die Qualität der Information. Für den vorliegenden Fall bedeutet das, dass bei einem Alpha-Cut $\alpha = 1,0$ die größtmögliche Qualität an Information vorhanden ist, so dass die vorherige Einschätzung der Projektbeteiligten (AHP-Wert ‚1‘) voll zutrifft. Ein Optimismus-Index von $\lambda = 0,0$ bedeutet, dass die Stollenbauweise, ein Index von $\lambda = 1,0$ die offene Bauweise präferiert wird. Betrachtet man das Szenario ‚OB 90%/GB 10%‘ so ergibt sich für die unterschiedlichen Fuzzy-Intervalle das Ergebnis wie in folgender Abbildung 86 gezeigt. Je nachdem ob die Offene Bauweise oder Stollenbauweise präferiert wird, ist der Lösungsraum deutlich weiter gefasst als in der alleinigen Analyse der Kosten im Zuge des 1. Tests. Die Analyse für das kleinere Fuzzy-Intervall zeigt, dass das Ergebnis für die offene Bauweise bei einem Alpha-Cut von $\alpha = 0,0$ zwischen 37,5% und 41,3% liegt, jedoch zu keinem Zeitpunkt ein Rangwechsel entstehen kann. Das Ergebnis des größeren Fuzzy-Intervalls (Abbildung 87) weist marginale Änderungen bzgl. des Lösungsraumes auf (offene Bauweise zwischen 36,0% und 42%).

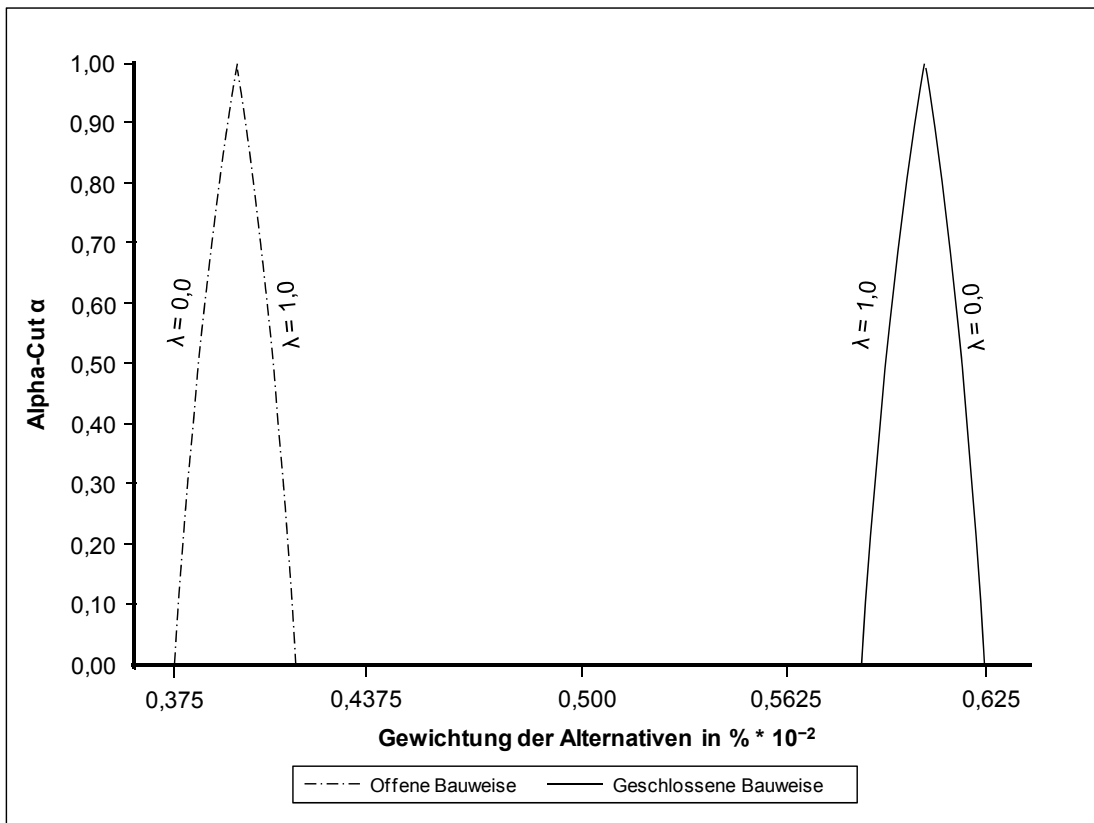


Abbildung 86: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; Kostenkriterien für das Szenario ‚OB 90%/GB 10%‘ (Fuzzy-Intervall ± 1)

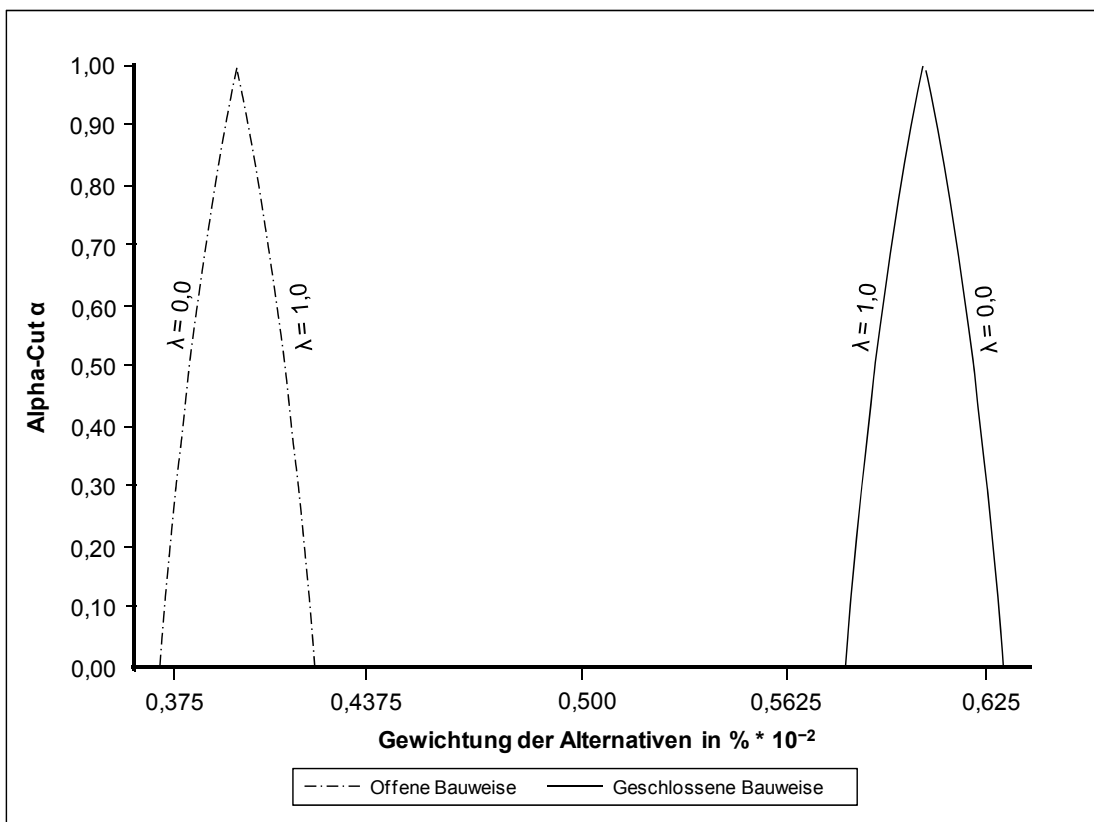


Abbildung 87: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; Kostenkriterien für das Szenario ‚OB 90%/GB 10%‘ (Fuzzy-Intervall ± 2)

Wird das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ untersucht, so fällt auf, dass für das kleine Fuzzy-Intervall das Gesamtergebnis für die offene Bauweise zwischen 45,1% und 48,8% liegt (Abbildung 88). Bei der Analyse mit dem größeren Intervall ist ebenfalls kein Rangwechsel zu erwarten, wobei die Ergebnisse insgesamt deutlich enger beieinander liegen (Abbildung 89).

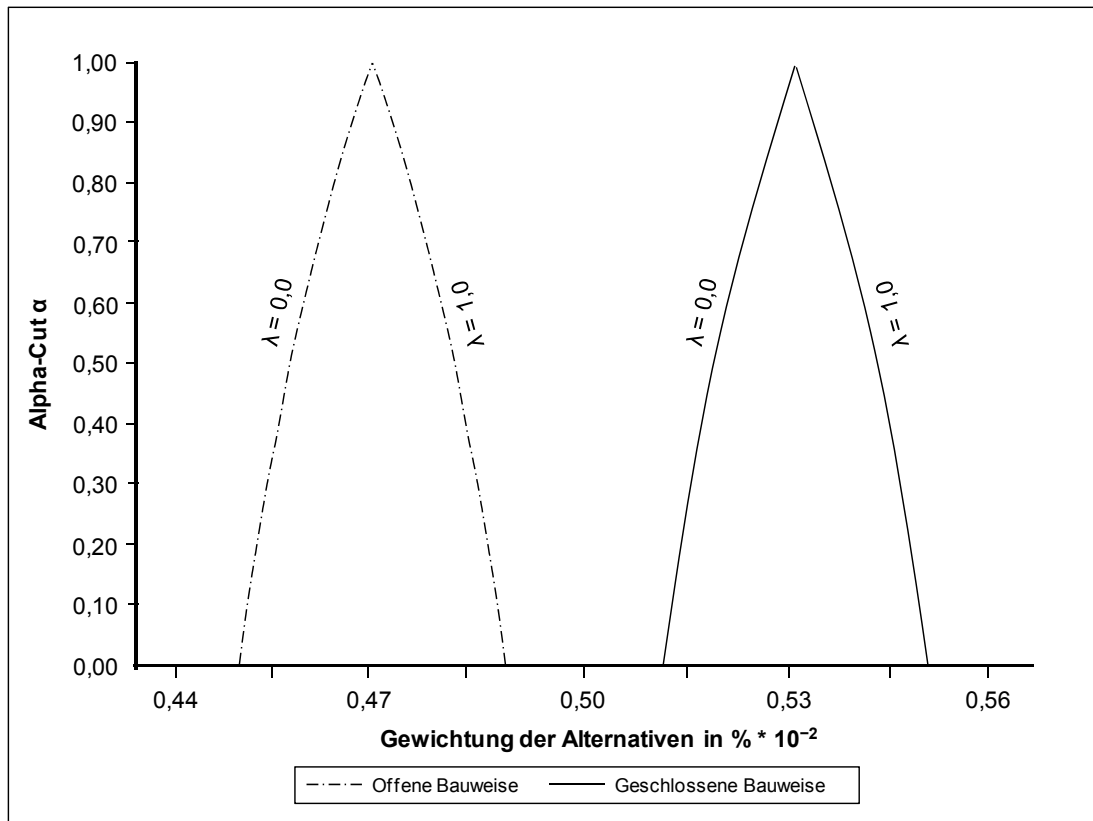


Abbildung 88: Fuzzifizierte Gesamtgewichtung; Kostenkriterien für das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 1)

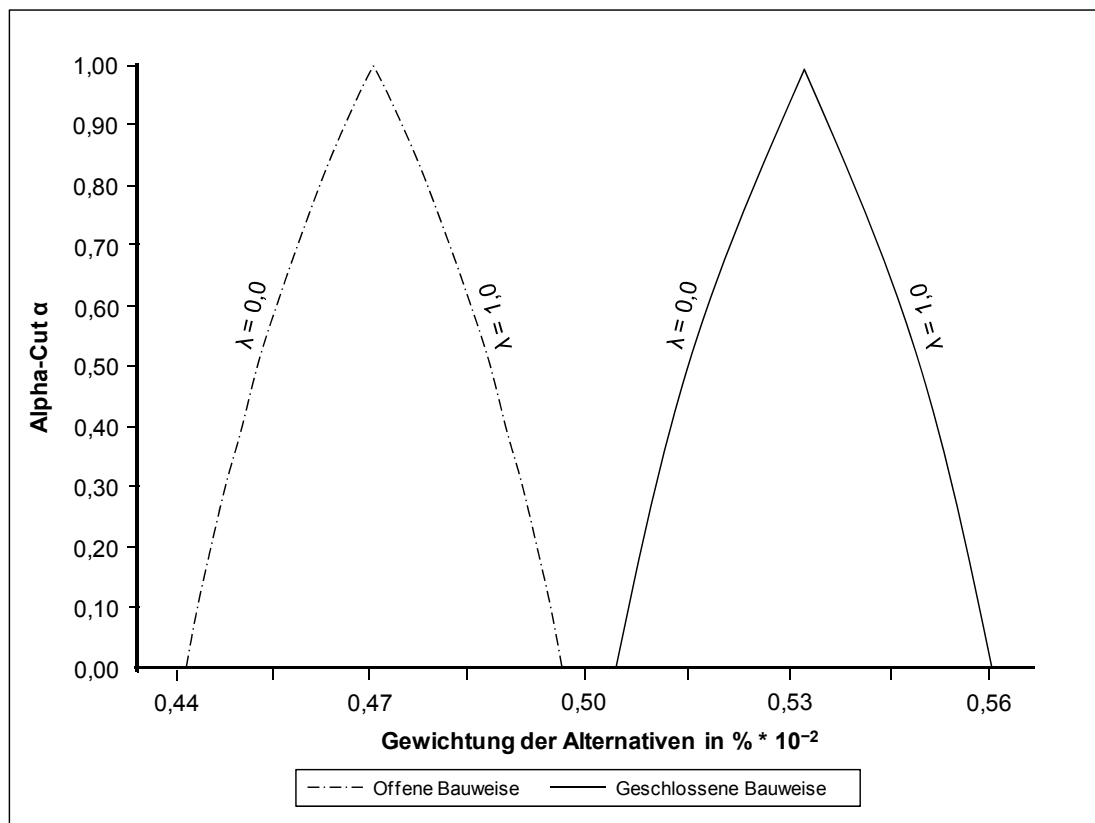


Abbildung 89: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; Kostenkriterien für das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 2)

Interessant erweist sich dennoch das Fuzzy-Intervall ± 2 , in welchem der AHP-Wert ,1‘ für beide Alternativen maximal den Wert ,3‘ annehmen kann. Bis zu diesem Wert ist kein Rangwechsel, wie in der Abbildung zu sehen, zu erwarten. Würde man in einer weiteren Analyse der *Folgekosten* manuell den Wert auf ,4‘ setzen, so erhält man erstmalig einen Rangwechsel. Unter diesen Voraussetzungen wäre erstmalig die offene Bauweise die zu präferierende Alternative (50,3%). Rechnet man den Wert ,4‘ in einen numerischen Wert um, d.h. in eine prozentuale Gewichtung, so ergeben sich die Gewichte von 80% bzw. 20%. Der Vorteil der AHP-Methodik liegt bekanntermaßen darin, dass qualitative und quantitative Aspekte gleichzeitig berücksichtigt werden. Für quantitative Aspekte werden die Daten zu Verhältniszahlen berechnet, was schließlich ein normiertes Ergebnis liefert.

Aus dieser Analyse ist nun ersichtlich geworden, dass die *Folgekosten* bei einem Verhältnis von ca. 80% zu 20% zu einem Rangwechsel führen werden, wenn die Qualität der Informationen diesbezüglich äußerst gering ist. Diese wichtige Erkenntnis können Entscheider nun für eine erneute Analyse nutzen, indem bspw. in einem weiteren Schritt Folgekosten zumindest realistisch abgeschätzt werden. Setzt man die ermittelten Kosten dann in ein Verhältnis und erhält eine Gewichtung kleiner 80% (offene Bauweise), so kann davon ausgegangen werden, dass die Stollenbauweise die bevorzugte Alternative ist. Wichtig dabei ist die Tatsache, dass bei einer Kalkulation nunmehr die Qualität der Informationen eindeutig erhöht wird, so dass die Wahl einer Alternative exakter festgestellt wird.

9.6.2.3 Analyse der Folgekosten, risikobasierten Initial- und Mehrkosten und Bauzeit

Der dritte Schritt dieser Untersuchung beinhaltet die Implementierung des unscharfen Kriteriums *Bauzeit*. Dazu wurden, wie bereits beschrieben, zwei Fuzzy-Funktionen gebildet. Im Prinzip stellt die Betrachtung der extremalen Werte (hier 24 Monate offene Bauweise, 30 Monate geschlossene Bauweise) bereits das ungünstigste Ergebnis dar (lokales Gewicht: 55,56% für offene Bauweise; 44,44% für geschlossene Bauweise). Würde man mit den Fuzzy-Funktionen weiterrechnen, so wird das lokale Ergebnis zu Gunsten der geschlossenen Bauweise tendieren, was bedeutet, dass die zuvor festgelegten Monate das Maximum des lokalen Gewichtsvektors bedeuten. Sollte die Baumaßnahme tatsächlich die 24 Monate (offene Bauweise) überschreiten bzw. die 30 Monate unterschreiten, so spricht das Gesamtergebnis wieder für die geschlossene Bauweise, wobei die vorher aufgeführten Folgekosten nunmehr keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. An dieser Stelle ist nun zu überprüfen, ob das Kriterium *Bauzeit* tatsächlich eine wichtige Bedeutung für die Entscheider hat. Mit Hilfe der Fuzzy-Funktionen lässt sich exakt ableiten, dass eine lokale Gewichtung von jeweils 50% durchaus erreicht werden kann, wenn für beide Bauzeiten jeweils 30 Monate gelten. Das Kriterium hat insgesamt dennoch keinen nennenswerten Einfluss auf das Gesamtergebnis. Die Analyse zeigt, dass die geschlossene Bauweise weiterhin minimal präferiert wird, wenn die vorher gemachten Analysen unter Einbezug der *risikobasierten Kosten* sowie der *Folgekosten* einberechnet werden.

9.6.2.4 Zusätzliche Betrachtung qualitativer unscharfer Kriterienvergleiche

In einem letzten Schritt wird die gesamte Bewertung nochmals fuzzyfiziert. Der erste Schritt besteht darin, die vorherigen Annahmen beizubehalten, wobei im Hinblick auf die *Folgekosten* jeweils die extremalen Bewertungen einberechnet werden. Darauf aufbauend werden zunächst alle Kriterienvergleiche der ersten und zweiten Ebene fuzzyfiziert, wobei für alle Vergleiche stets ein gleichbleibender Optimismus-Index gewählt wird. Das bedeutet, dass alle Kriterienvergleiche hinsichtlich eines pessimistischen, moderaten und optimistischen Entscheiders untersucht werden. In den Abbildungen 90 und 91 sind die beiden Ergebnisse für die unterschiedlichen Intervalle dargestellt, wobei für die *Folgekosten* zunächst die geschlossene Bauweise voll präferiert wird ($\lambda=0,0$). Dabei fällt auf, dass zu keinem Zeitpunkt ein Alternativenwechsel zu erwarten ist. Die Untersuchung zeigt hier weiterhin, dass die Qualität der Informationen sowie das Entscheidungsverhalten keinen Einfluss auf das Ergebnis haben.

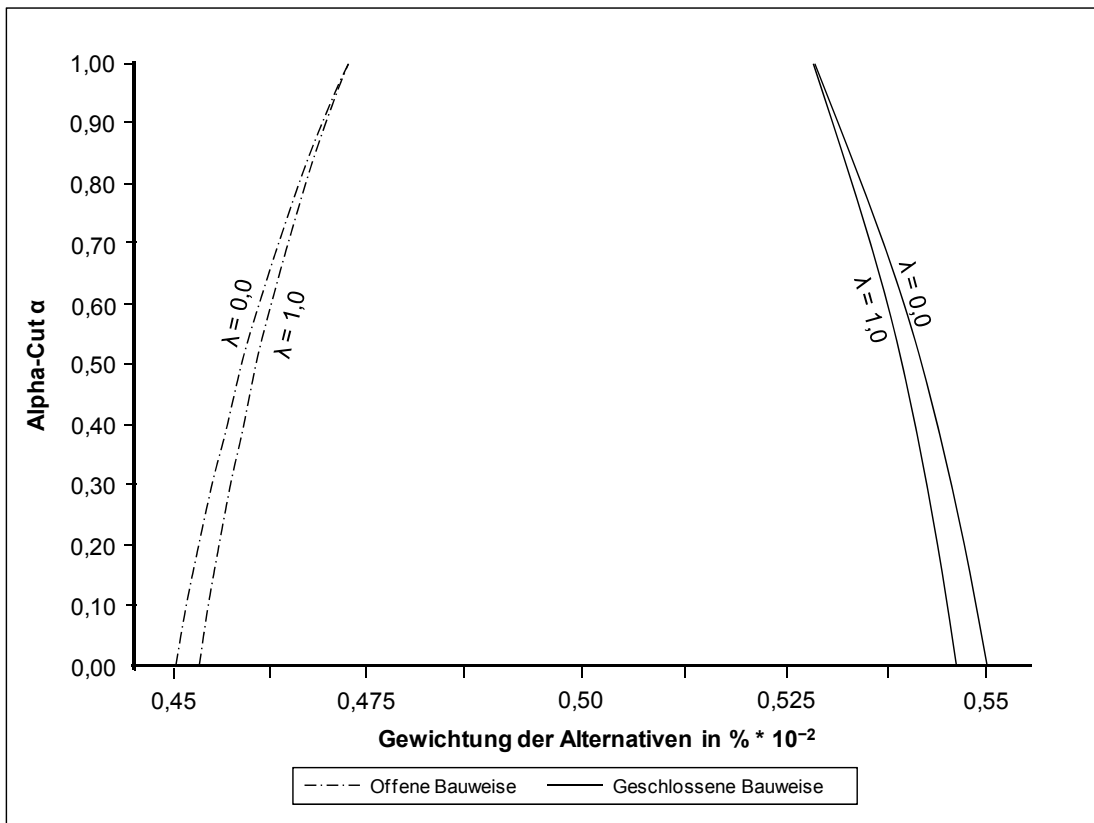


Abbildung 90: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; qualitative unscharfe Kriterienvergleiche für das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 1 ; Präferenz GB)

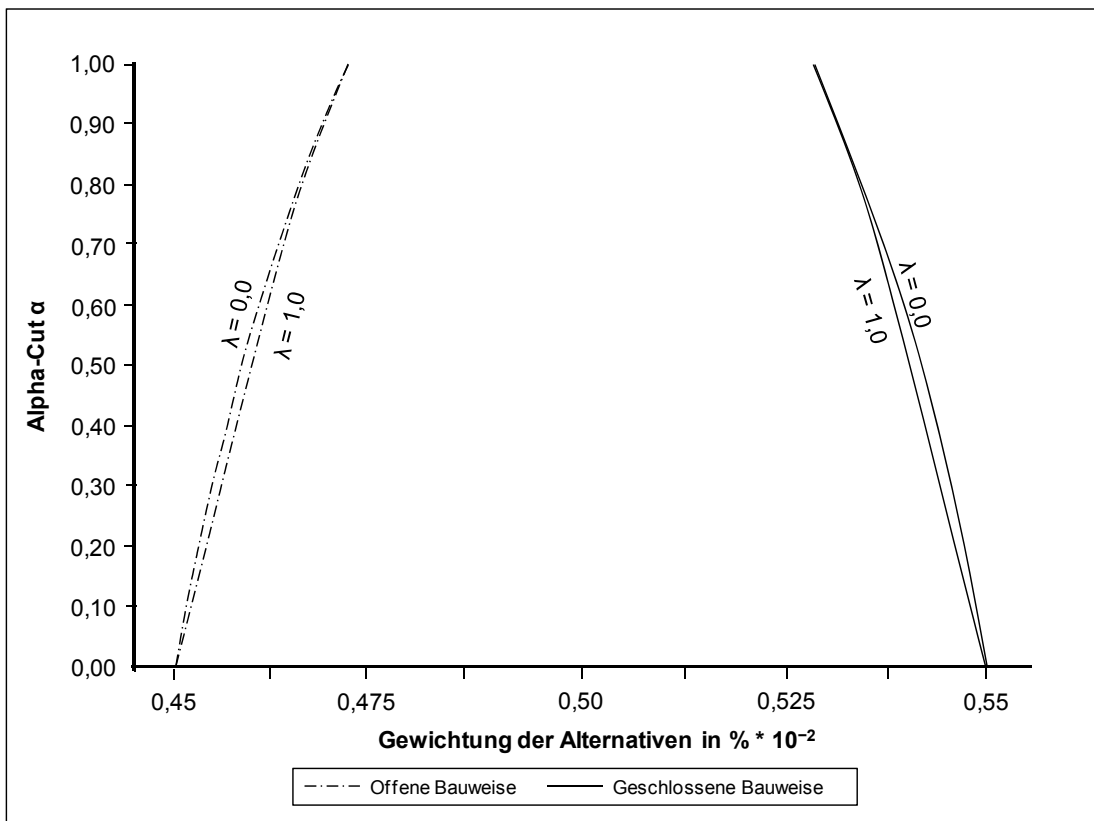


Abbildung 91: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; qualitative unscharfe Kriterienvergleiche für das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 2 ; Präferenz GB)

In den Abbildungen 92 und 93 sind wiederum die beiden Ergebnisse für beide Intervalle mit dem Unterschied dargestellt, dass für die Folgekosten nunmehr die offene Bauweise voll präferiert wird ($\lambda=1,0$). Für das untersuchte Intervall ± 2 fällt auf, dass erneut kein Rangwechsel zu erkennen ist.

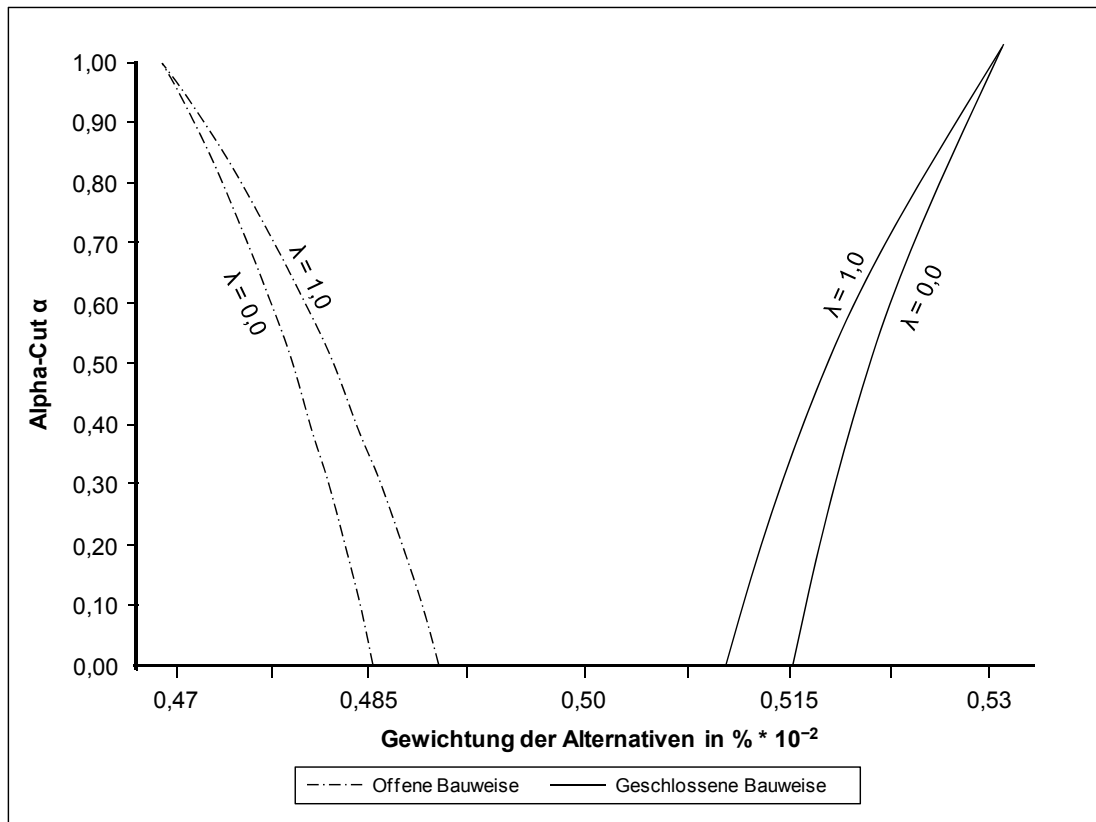


Abbildung 92: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; qualitative unscharfe Kriterienvergleiche für das Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 1 ; Präferenz OB)

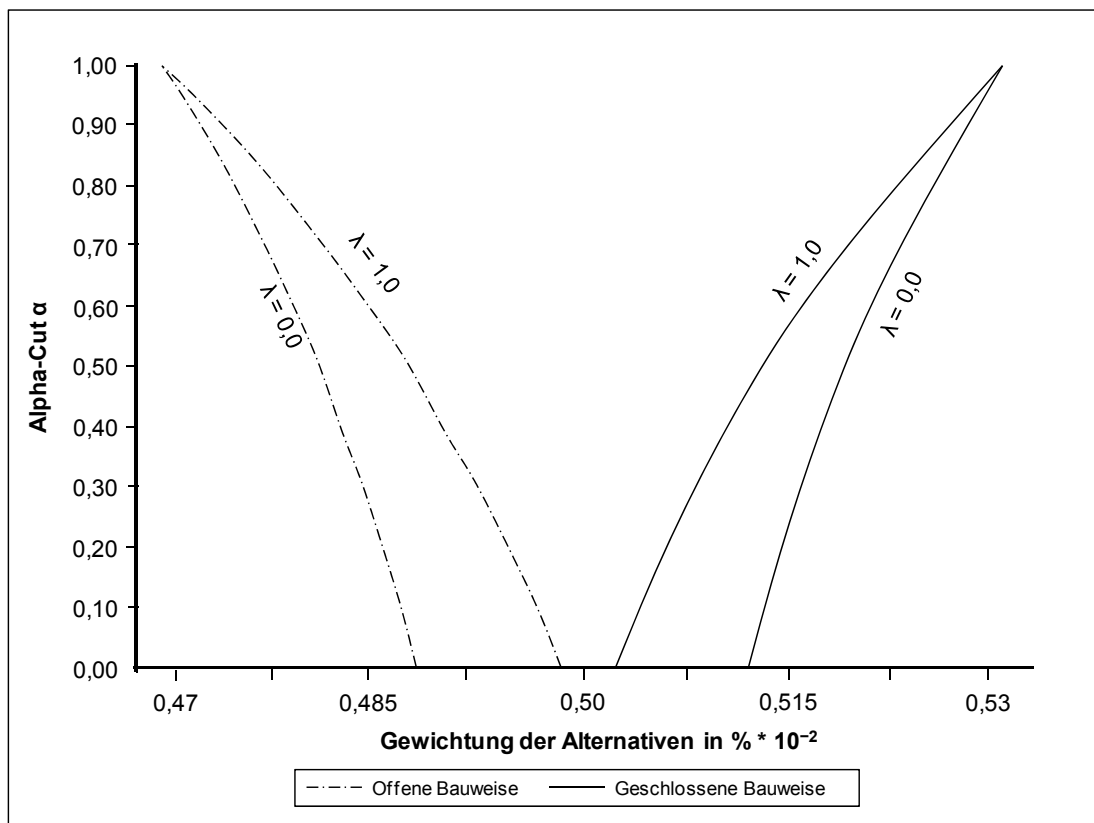


Abbildung 93: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; qualitative unscharfe Kriterienvergleiche
Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 2 ; Präferenz OB)

Allerdings deckt sich dieses Ergebnis mit demjenigen aus Abschnitt 9.6.2.2. Lediglich verursachen die fuzzyfizierten Kriterienvergleiche eine breitere Streuung, ohne einen nennenswerten Vorteil bieten zu können.

Die dritte Untersuchung schließt mit der zusätzliche Fuzzyfizierung der Kriterien der dritten Ebene ab. Hier zeigt sich, dass das Kriterium *Lebenszykluskosten* einen erheblichen Einfluss auf die Entscheidung hat. Es stellt sich heraus, dass das Intervall ± 1 erneut keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat, so dass nur die Ergebnisse mit dem Intervall ± 2 gezeigt werden. Abbildung 94 beinhaltet dabei alle fuzzyfizierten Kriterienvergleiche der ersten, zweiten und dritten Ebene. Insgesamt wird deutlich, dass eine Analyse mit dem Fuzzy-Intervall ± 2 zu einer Veränderung des Alternativenrankings führt, wenn für die *Folgekosten* die offene Bauweise präferiert wird (ab einem $\lambda=0,85$). Auch im Rahmen dieser Analyse lässt sich festhalten, dass der Einfluss der bis dato nicht ermittelten *Folgekosten* einen erheblichen Einfluss auf die Wahl der Alternativen haben kann, so dass zumindest weitere Untersuchungen angestellt werden sollten.

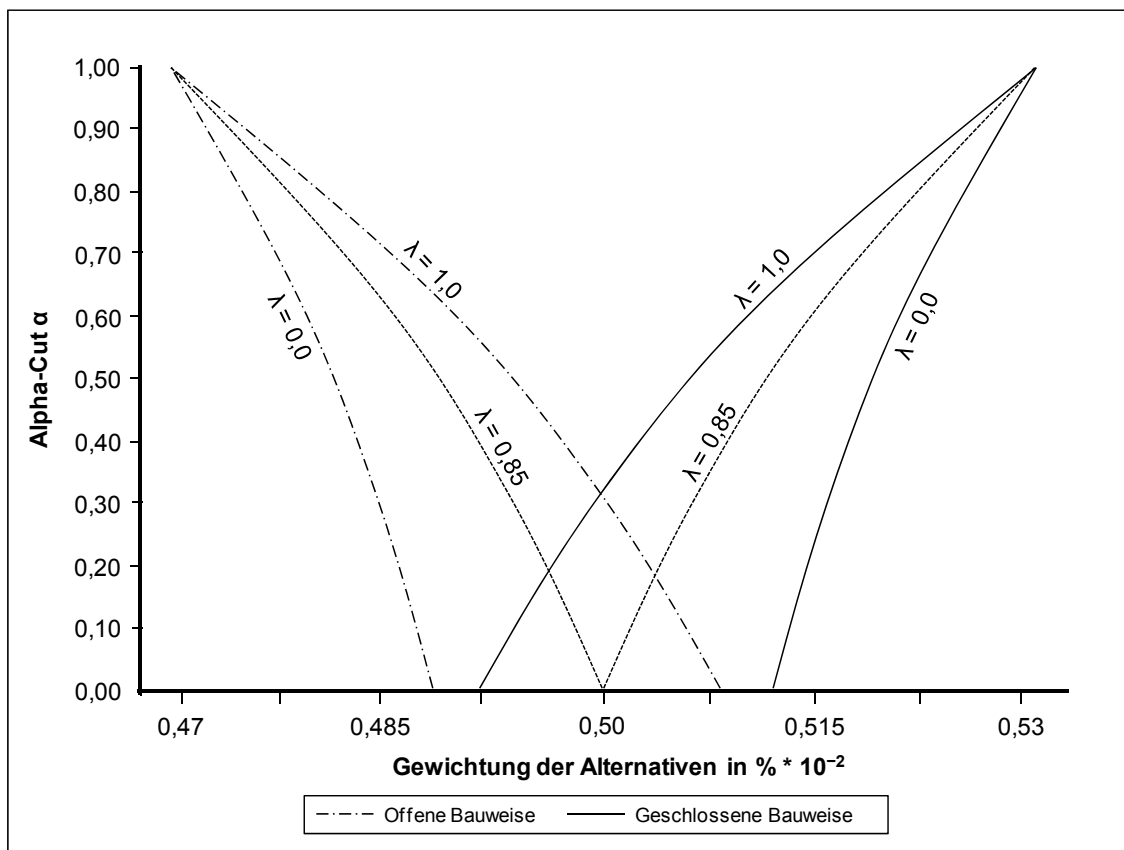


Abbildung 94: Fuzzyfizierte Gesamtgewichtung; qualitative unscharfe Kriterienvergleiche aller Ebenen, Szenario ‚OB 10%/GB 90%‘ (Fuzzy-Intervall ± 2 ; Präferenz OB)

9.7 Kritische Betrachtung der Entscheidungsanalyse

In diesem Abschnitt wird die gesamte Entscheidung hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Planungsphase und somit für die beteiligten Entscheider kritisch hinterfragt. Dabei spielt nicht nur der Entscheidungsprozess an sich eine Rolle, sondern auch die Integration der unscharfen und unsicheren Faktoren in das Entscheidungsmodell. Zusätzlich sind die notwendige Transparenz der Entscheidung sowie die Grenzen der Interpretation der Ergebnisse zu erörtern, wobei die Einflüsse der Entscheider auf die Alternativenauswahl ebenso berücksichtigt werden sollten wie die Frage, ob solch ein Entscheidungsmodell grundsätzlich den Entscheidungsprozess unterstützen kann.

Ebenso ergeben sich gerade im Zuge der Planung unterirdischer Infrastruktur Probleme hinsichtlich einer Akzeptanz des Projektes. Zusätzlich sind also Aspekte wie Selbstorganisation und Konfliktregelung zu nennen, die in diesem Kontext noch erörtert werden. Folglich ist die Zufriedenheit aller am Projekt beteiligter Gruppen von der Berücksichtigung dieser Probleme abhängig.

9.7.1 Interpretation der Ergebnisse aus beiden Untersuchungen

Insgesamt hat die Analyse gezeigt, dass unter Zuhilfenahme des Entscheidungsmodells und mit Hilfe der Software DEMUS² eine konkrete Entscheidungssituation generiert wurde. Kriterien und Alternativen lassen sich in das Modell implementieren und detailliert bewerten. Ein Entscheider hat darüber hinaus die Möglichkeit Aspekte wie Unsicherheit und Unschärfe zu berücksichtigen, so dass der Entscheidungsprozess umfassender dargestellt werden kann. Dazu helfen nicht nur die Berücksichtigung solcher Methoden wie die Monte-Carlo-Simulation bei risikobasierten Kalkulationen, sondern auch die genaue Analyse des Einflusses einzelner Kriterien auf die Alternativenauswahl mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen.

Die Nutzung von unscharfen und unsicheren Analysemethoden ermöglichen dem Entscheider neue Möglichkeiten zur Erfassung wichtiger Aspekte wie dem Entscheiderverhalten, der Informationsqualität und dem kalkulatorischen Risiko. Als weiteren Vorteil erweist sich die Berücksichtigung kalkulatorischer Risiken. Die kalkulierte Summe erhält nicht nur einen prozentualen Aufschlag, sondern der Entscheider hat die Möglichkeit alle bedeutsamen Risiko-Szenarien zu untersuchen. Damit dieses Ergebnis nachvollziehbar und korrekt ermittelt wird, sollten zuvor Datenbanken über Informationen früherer Bauprojekte erstellt werden.

Die Analyse des Entscheidungsprozesses hat gezeigt, dass das Kriterium ‚Folgekosten‘ einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Insbesondere wird der Einfluss dann deutlich, wenn das größere Fuzzy-Intervall zur Analyse herangezogen wird. Es lässt sich festhalten, wie wichtig die Festlegung eines Fuzzy-Intervalls sein kann, insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass die Fuzzyifizierung in Verbindung mit Entscheiderverhalten und Informationsqualität gebracht wird.

Mit Hilfe dieser zusätzlichen Aspekte ist es möglich, auf spezielle Sachverhalte einzugehen, die in einer gängigen AHP-Analyse nicht ohne weiteres sichtbar gewesen wären. Folglich lassen sich weitere Kriterien genauer untersuchen, die einen Einfluss auf die Wahl der Alternative haben. Diese Erkenntnis hat den Vorteil, dass weitere Untersuchungen vorgenommen werden, bevor eine Alternative festgelegt wird. Somit erhöht dieses Vorgehen nicht nur die Transparenz des Entscheidungsprozesses, sondern sorgt dafür, dass die neuen, im Hinblick auf die Untersuchungen des 1. Tests exakteren Ergebnisse als weitere Diskussionsgrundlage für die Entscheidungsträger dienen.

9.7.2 Präzisierung des Entscheidungsprozesses

Ein Vorteil der vorliegenden Entscheidungsmethodik ist nicht nur die geschaffene Übersichtlichkeit, sondern vielmehr die frühe Aufdeckung vorhandener Defizite während der Entscheidungsfindung. Folglich ist ein solches standardisiertes Verfahren idealerweise

dafür geeignet, Präferenzen besser darzustellen und zu integrieren, so dass jeder Entscheider seine Interessen zur Geltung bringen kann.

Bereits bei der Darstellung des gesamten Planungsprozesses (Kapitel 2) wurde deutlich, dass eine exakte Informationsbasis grundsätzlich von Bedeutung ist. Neben diesen Informationen sind auch die unterschiedlichen Präferenzen der einzelnen Entscheider für die Wahl eines Bauverfahrens von Bedeutung. Die verschiedenen Ziele der einzelnen Entscheidergruppen sollten demzufolge bereits in einer frühen Phase bekannt sein.

Zusätzlich ist der Informationsgrad über das Projekt für die Integration der Daten in das Entscheidungsmodell von großer Relevanz. Zwar eignet sich das hier genutzte AHP-Verfahren für die Analyse solcher Situationen, jedoch ist im klassischen AHP eine Nutzung unscharfer und unsicherer Aspekte ohne weiteres zunächst nicht möglich. Die Grundform des AHP hat jedoch im Hinblick auf die Analyse einer komplexen Entscheidung bei der Formalisierung und Nutzung einer hierarchischen Struktur eindeutig ihre Stärke.

Die Analyse des Praxisbeispiels hat gezeigt, wie wichtig der Informationsstand in der frühen Planungsphase sein kann. Gerade durch die endgültige Festlegung des Bauverfahrens werden weitere Prozesse in Gang gesetzt, die sich erst im späteren Verlauf auswirken (Folgekosten, Sicherheit während der Bauphase, Einflüsse auf die Ökologie usw.). Demnach liegt der Fokus auf administrativer Ebene bei der Umsetzung des Projektziels *„Wahl des besten Bauverfahrens, welches nachhaltig die wenigsten Probleme hinsichtlich der Umwelt, den Projektpartnern und der Wirtschaftlichkeit aufweist“*. Um dieses Ziel bereits in der Planungsphase zu realisieren, ist die Entscheidungssituation mit Hilfe des hier vorgestellten Entscheidungsmodells zu strukturieren. Auf diese Art und Weise werden Defizite aufgezeigt, so dass gezielte Datenerhebungen den Entscheidungsprozess genauer gestalten. Das Beispiel hat auch hier gezeigt, wie wichtig Daten in einer frühen Entscheidungsphase sind, um so das Ergebnis zu untermauern und das langfristige Projektziel auch nachhaltig zu gewährleisten. Gerade die Daten, aber auch das Zusammenarbeiten der Entscheidergruppen bringen wesentliche Erkenntnisse für die Ausgestaltung der Modellstruktur. Folglich lassen sich so Einflussgrößen erkennen, steuern und in das Entscheidungsmodell integrieren.

9.7.3 Transparenz des Entscheidungsprozesses

Der Planungsprozess für unterirdische Infrastruktur erweist sich deswegen als problematisch, da dieser aus vielen einzelnen Verfahrensschritten besteht. Eine Methodik zur transparenten und nachvollziehbaren Bewertung der gesammelten Informationen zu einem Entscheidungsergebnis, wurde bis heute nicht vollständig erarbeitet. Die gewünschte Transparenz lässt sich nur mit der richtigen Wahl eines entscheidungstheoretischen Verfahrens erreichen. Die Wahl fiel in dieser Arbeit auf den AHP, welcher um die Aspekte Unschärfe und Unsicherheit ergänzt wurde. Durch die zusätzliche Programmierung eines Software-Tools ist eine einfache Darstellung der Bewertung gegeben. Als vorteilhaft er-

weist sich auch der Aspekt, dass das Entscheidungsmodell hinsichtlich ändernder Gegebenheiten ohne größere Mühen angepasst werden kann.

Die Darstellung der Präferenzen ist ebenfalls positiv zu benennen, welche durch die Vergabe der Bewertungszahlen oder auch der Daten transparent bleibt. Selbst nachträgliche Untersuchungen decken schnell auf, wie ein Entscheider hinsichtlich seiner Präferenz bewertet hat. Eine Verschleierung von gezielt subjektiv durchgeführten Bewertungen lässt sich vermeiden, so dass das Ergebnis immer begründet werden kann. Die verschiedenen Entscheidergruppen und Personen können auf diese Art die Präferenzsetzungen im Modell nachvollziehen. Gerade auch im Hinblick auf die heutigen Probleme beim Bau unterirdischer Infrastrukturprojekte stellt sich für multikriterielle Probleme die Forderung nach einem klar strukturierten und verständlichen Verfahren, was mit dem AHP gegeben ist.

Wichtig hierbei ist die Nutzung von verständlichen Kriterien, die jede Projektgruppe im Zuge von Workshops erarbeiten kann. Unvorteilhaft ist es, wenn das Modell aus einer Vielzahl von Kriterien besteht, da dieser Umstand die Transparenz negativ beeinflusst, zumal viele Kriterien wenig bis kaum Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Betrachtet man das Anwendungsbeispiel wird dieser Umstand hier ganz deutlich: Die vier wichtigsten Kriterien (Initialkosten, Mehrkosten aus Risiko, Folgekosten und Bauzeit) haben auf das Gesamtergebnis einen Einfluss von knapp 80%, wohingegen z.B. das Kriterium Energieverbrauch einen Einfluss von nur 1,5 % hat (Tabelle 19). Es stellt sich die Frage, ab wann Kriterien keine Berücksichtigung mehr finden und eventuell mit anderen Kriterien zusammengefasst werden sollten. Folglich trägt eine angemessene Reduktion der Kriterien mehr zu einer Transparenz bei, als ein komplexes und mit unzähligen Kriterien behaftetes Verfahren. Aus Gründen der kognitiven Leistungsfähigkeit der einzelnen am Planungsprozess beteiligten Projektgruppen sollte ein Verfahren hinsichtlich der Komplexität vereinfacht werden. Somit ist eine Überschaubarkeit gegeben, was zu einer Erhöhung der Transparenz führt. Zwar kann ein solches Verfahren niemals die Optimallösung bringen, jedoch kann eine solche Methode für eine Diskussionsgrundlage hilfreich sein, um in weiteren Schritten die bestmögliche Lösung zu finden.

Letztlich bietet nicht nur die Nutzung eines entscheidungstheoretischen Verfahrens die geforderte Transparenz, sondern auch die Teilnahme der Projektbeteiligten an dem Entscheidungsprozess. Die Nutzung eines multikriteriellen Entscheidungsverfahrens, die Integration von Meinungen und Interessen im Zuge von Workshops sowie die konkrete Anzahl wichtiger Kriterien führen zu einem Entscheidungsprozess, welcher transparente und für alle Projektbeteiligte akzeptierte Ergebnisse liefert.

9.7.4 Übertragbarkeit der Methodik

Bereits in den ersten Abschnitten dieser Arbeit wurde beschrieben, dass es eine Reihe von verschiedenen Verfahren gibt, die im Zuge des Entscheidungsprozesses angewendet werden, jedoch die Zusammenführung der Informationen in einer autarken Bewertung

nicht möglich ist. Vielmehr existieren Gutachten, Kalkulationen, Umweltstudien etc., die einzeln für sich stehen und getrennt voneinander betrachtet werden, so dass eine gewisse Eindimensionalität besteht. Das Ergebnis zeigt, dass Einzellösungen präsentiert werden, die jedoch für sich alleine stehen und fachfremde Aspekte zu keiner Zeit berücksichtigen. Im Zuge der Planungsphase stehen bspw. ökonomische und ökologische Verfahren für sich alleine. Eine Verknüpfung der vorliegenden Ergebnisse wird nicht durchgeführt. Interessanter wird dieser Aspekt bei der Berücksichtigung sozialer Randbedingungen, für welche derzeit keine Bewertungsverfahren existieren. Demnach eignen sich die klassischen ökonomischen Instrumente nicht für eine integrative Betrachtung entscheidungsrelevanter Aspekte.

Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit die Thematik der Entscheidungstheorie aufgegriffen, um ein an die Problemstellung orientiertes Verfahren zu wählen. Die Lösung sollte nicht die Verknüpfung einzelner Teildisziplinen sein, sondern die vorliegenden Informationen aus den Teildisziplinen in einer multikriteriellen Bewertung positionieren. Folglich können auf diesem Wege mehrere Zielkriterien erfasst werden, vor allem dann, wenn eine ausreichende Informationsbasis vorliegt. Als großer Vorteil hierbei ist die Erhaltung der Zielstruktur, welche für das gesamte Projekt gilt und nicht nur für einzelne Teildisziplinen.

Nicht nur, dass wesentliche Aspekte ganzheitlich bewertet werden, sondern auch die Berücksichtigung weiterer Ziele, wie die Reduktion der Unschärfe und Unsicherheit in Bewertungen, hat gezeigt, dass die Wahl des AHP richtig war. Das Anwendungsbeispiel hat diese Wahl eindeutig bestätigt, da das Verfahren transparente Lösungswege aufgezeigt hat. Zwar sind die Präferenzen der Entscheider nachwievor von großer Bedeutung, dennoch liefert das Bewerten der Aspekte Entscheidungsempfehlungen, die den integrativen Kontext unterirdischer Infrastruktur berücksichtigen. Dadurch dass die Nutzung unsicherer und unscharfer Sachverhalte ermöglicht wurde, ist eine Abbildung der Wertrelationen noch exakter an den Bedürfnissen der Projektbeteiligten möglich.

Schließlich stellt sich die Frage, ob ein solches Entscheidungsmodell auf Folgeprojekte übertragen werden kann. Dies kann nur dann bejaht werden, wenn alle Bedürfnisse der Projektbeteiligten der Entscheidungssituation angepasst bzw. sämtliche Informationen in das Modell integriert werden. Sollten Projekte unterirdischer Infrastruktur gleiche bzw. ähnliche Zielsetzungen haben, so lässt sich das Modell, wie hier vorgestellt, ohne weiteres nutzen, wobei verschiedene Kriterien entfernt oder auch ergänzt werden können.

Das hier vorgestellte Entscheidungsmodell eignet sich demnach zur Entscheidungsunterstützung unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer, technischer und soziokultureller Aspekte. Durch die Analyse verschiedener Alternativen und Nutzung eines Kriterienkatalogs kann eine Akzeptanz der durchgeführten Entscheidung erreicht werden, wenn sämtliche Aspekte wie Interessen der Projektbeteiligten sowie unscharfe und unsichere Daten Berücksichtigung finden.

Aus diesen Ergebnissen leiten sich nunmehr Folgerungen für den Planungsprozess unterirdischer Infrastruktur ab. Im Hinblick auf das hier vorgestellte Anwendungsbeispiel lässt sich zunächst zusammenfassen, dass das Modell ein Alternativenranking als Ergebnis vorweist, welches die Präferenz der Entscheider widerspiegelt. Dazu ist das Modell in der administrativen Ebene hinsichtlich der Planungsschritte anzupassen bzw. zu erweitern, da innerhalb der Planungsstufen Wechselwirkungen zu erwarten sind. Weiterhin muss der Informationsbedarf dahingehend strukturiert werden, dass sämtliche Aspekte ausreichend beschrieben werden können, so dass Präferenzen klar sind und die Bewertungen innerhalb des Modells ohne Komplikationen durchgeführt werden. Auf diese Art werden Informationen aus der Politik, den Umweltgruppen, der Öffentlichkeit und den Bauherren gebündelt und in das Modell integriert.

9.8 Fazit zur Nutzung von DEMUS

Die Anwendung des Entscheidungsmodells hat gezeigt, dass ein Einsatz für die Auswahl von Alternativen aus einem diskreten Lösungsraum heraus sinnvoll und geeignet ist. Im Zuge der beiden Tests wurde dargelegt, dass die Berücksichtigung der Unschärfe und Unsicherheit zu differenzierten Ergebnissen geführt hat. Zum einen hat ein Entscheider nunmehr die Gelegenheit über den Alpha Cut die Qualität der Informationen festzulegen. Auf diese Weise lassen sich einflussreiche Kriterien besser darstellen und herausarbeiten. In Abhängigkeit der Qualität der Informationen können mögliche Rangwechsel entdeckt werden. Aus diesem Grund sind anschließend solche Kriterien einer erneuten Analyse zu unterziehen, bspw. indem man weitere Informationen zu den betreffenden Aspekten zusammenträgt.

Ebenso ist die integrierte Risikoanalyse auf Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation ebenfalls von Vorteil. Dadurch dass in Abhängigkeit der Erfahrungswerte und stochastischen Größen unterschiedliche Risiko-Szenarien berechnet werden können, ergeben sich hinsichtlich des Gesamtergebnisses weitere Analysemöglichkeiten. Risiken können auf diese Weise nicht nur in die Methodik integriert werden, sondern in einem weiteren Schritt auch behandelt und minimiert werden. Insbesondere eignet sich eine Risikobehandlung genau dann, wenn mehrere Alternativen prozentual sehr nah liegen und Rangwechsel durchaus vorkommen könnten.

Die Fuzzyifizierung des AHP-Wertes '1' stellt ebenfalls eine weitere Option zur Gewährleistung eines stabilen Ergebnisses dar. Dadurch dass ein Entscheider durchaus eine Präferenz für eine Alternative haben könnte, jedoch sich nicht mit einem Wert direkt festlegen will, eignet sich diese Option für indifferente Kriterien. Dadurch dass das Modell in pessimistische, moderate und optimistische Entscheiderperspektiven unterscheidet, kann die Fuzzyifizierung des Wertes '1' sinnvoll sein. Je nachdem welche Perspektive ein Entscheider einnimmt, können gleichzeitig mehrere Alternativen untersucht werden, ohne den Wert '1' zu verändern. Im Anwendungsbeispiel zeigte sich bei der Fuzzyifizierung der 1. und 2. Ebene (Intervall ± 2) ein Rangwechsel. Für die Alternativenauswahl bedeutet das, dass

eine Bewertung der Kriterien in der 1. und 2. Ebene bei relativ schlechter Informationsqualität zu einem Rangwechsel führen kann. Demzufolge ist in der Entscheidungsfindung sicherzustellen, dass die Kriterien der 1. und 2. Ebene vollständig und in Abstimmung mit allen Entscheidern bewertet wurden.

Das Entscheidungsmodell ist darüber hinaus deswegen vorteilhaft, weil die verschiedenen Sachverhalte zunächst zusammengetragen und im Anschluss unter Berücksichtigung der gezeigten Aspekte wie Unschärfe und Unsicherheit bewertet werden. Gerade durch die zusätzliche Berücksichtigung von Unschärfe und Unsicherheit werden detailliertere Ergebnisse erwartet, so dass eine höhere Interpretierbarkeit dieser Ergebnisse ermöglicht wird, wie es auch das Anwendungsbeispiel gezeigt hat. Zwar ist das Vorhandensein von Informationen und Entscheiderverhalten von großer Bedeutung, dennoch eröffnet dieser Umstand erweiterte Ansätze für die Entwicklung unterirdischer Infrastrukturmaßnahmen vor allem dann, wenn sich Projekte noch in der Planungsphase befinden.

Die notwendigen Informationen lassen sich bspw. durch Erfahrungswerte aller Projektbeteiligten und Informationen aus Gutachten und Studien ermitteln und zusammentragen. Durch die Implementierung einer separaten Risikoanalyse steht dem Entscheidungsträger eine zusätzliche Bewertungsmethodik zur Verfügung, so dass anschließend diese Ergebnisse in ein Entscheidungsmodell integriert werden. Grundsätzlich ist es möglich, sämtliche zur Verfügung stehenden Daten in das Modell zu integrieren, so dass eine gleichzeitige Bewertung dieser Daten durchgeführt werden kann. Mit Hilfe des AHP ist die Integration qualitativer und quantitativer Kriterien ohne weiteres möglich, so dass ein Gesamtergebnis generiert wird, welches unter Berücksichtigung der einzelnen Gewichtungen die Präferenz für eine Alternative ausdrückt. Zwar erweist es sich als schwierig, für qualitative Paarvergleiche stets die 9-Punkte-Skala zu nutzen, da Entscheider relativ schnell inkonsistente Ergebnisse erhalten können. Dieses Problem lässt sich jedoch in dem Modell mit der Berechnung der consistency ratio lösen, so dass ein Entscheider zu jeder Zeit weiß, dass Bewertungen fehlerhaft sein können. Nachteilig dabei ist die Suche nach dem genauen Fehler. Aus diesem Grund wurde in dem Tool eine Methodik implementiert, die dem Entscheider voll konsistente Lösungen vorschlägt.

Eine weitere Option stellt die Direkteingabe von Gewichtungen dar. Auf diesem Wege umgeht der Entscheider die AHP-Skala und erhält voll konsistente Ergebnisse. Nachteilig dabei ist jedoch die fehlende Fuzzyfizierung der gemachten Eingaben, da feste scharfe Werte vergeben wurden. Eine Fuzzyfizierung kann nur für die AHP-Werte erfolgen. Folglich ist eine Direkteingabe zu vermeiden, da sonst weitere Analysen erst gar nicht möglich sind.

Bezugnehmend auf die hier erstmalig gleichzeitige Berücksichtigung unscharfer und risikobasierter Methoden im Rahmen des AHP wurde gezeigt, dass das Entscheidungsmodell durchaus für den Einsatz im Zuge der Planung unterirdischer Infrastruktur geeignet ist. Das Ergebnis belegt, dass zumindest die vorherige Entscheidung die richtige war, so dass die Methodik valide Ergebnisse liefern kann. Insbesondere ist es als ein Vorteil zu sehen,

dass sich durch die Erweiterung weitere Analysemöglichkeiten ergeben. Zwar ist das Potential durchaus erkennbar, dennoch sollten weitere Infrastrukturprojekte mit Hilfe dieser Methodik untersucht werden, um langfristig die Methodik selbst für komplexe Projekte zu kalibrieren. Idealerweise können so im Nachgang verschiedene Kriterienkataloge entwickelt werden, die für bestimmte Arten von Projekten immer wieder verwendet werden können.

Eine parallel stattfindende kalkulatorische Risikoanalyse führt desweiteren zu einer noch exakteren Ergebnisdarstellung als bei einer alleinigen Nutzung des AHP. Risiken können ohne größeren Aufwand erfasst und bewertet werden. Vorteilhaft ist in diesem Zusammenhang die Integration jeder Wahrscheinlichkeit in das Entscheidungsmodell. Somit hat ein Entscheider das Mittel, verschiedene Szenarien zu untersuchen. Die Risikowerte werden schließlich direkt in das Modell integriert und zu Verhältniszahlen berechnet.

Durch die Nutzung der Unschärfe lassen sich weiterhin unklare Informationen besser darstellen. Der Lösungsraum der Alternativen ist breiter ausgelegt, so dass eine ausführlichere Diskussionsgrundlage geschaffen wird. Selbst bei schlechter Informationsgrundlage können die Ergebnisse exakt ermittelt werden. Folglich ist mit dieser Analyse die Möglichkeit gegeben, zu überprüfen, ob durch die geringe Qualität der Informationen eventuelle Rangwechsel zu erwarten sind. Sind solche Wechsel zu erwarten, ist es wichtig, die Bewertung um weitere Informationen zu erweitern. Es wäre schließlich zu überprüfen, ob dieser Rangwechsel weiterhin bestehen bleibt oder ein stabiles Ergebnis zu erwarten ist.

Die Ergebnisse haben insgesamt gezeigt, dass der langfristige Aufbau von Datenbanken sinnvoll ist, um aussagekräftige und transparente Ergebnisse zu liefern. Zusätzlich sind diese Datenbanken mit den Methoden der Risikoanalyse und Unschärfetrachtung zu kombinieren. Die wesentlichen Schlussfolgerungen werden wie folgt zusammengefasst:

Ein wichtiger Hauptbestandteil dieser Arbeit ist die Akzeptanz der gemachten Entscheidung bei Projektbeteiligten inklusive der Öffentlichkeit. Gerade kostenintensive und auf die Ökologie und Öffentlichkeit auswirkende unterirdische Infrastrukturprojekte werden zu meist kontrovers diskutiert, so dass Meinungen und Präferenzen aller Projektbeteiligten in die Entscheidungsmethodik integriert werden sollten.

Das Strukturieren der gesamten Entscheidungssituation führt zu einer klaren Priorisierung aller Kriterien und Alternativen.

Die Entscheidungsmethodik hat die Möglichkeit, ganzheitlichen Aspekte wie technische, ökonomische, ökologische und sozio-kulturelle Bereiche gleichzeitig zu berücksichtigen, welche bei der Größe solcher Projekte grundsätzlich auftreten.

Entscheiderperspektiven können über Ziele und Präferenzen direkt in das Entscheidungsmodell integriert werden.

Die Qualität der Informationen im Zuge der Projektevaluierung kann ebenfalls im Modell erfasst werden.

Die Übertragung der Methodik auf andere Projekte unterirdischer Infrastruktur ist durchaus möglich. Durch eine weitere Anwendung lassen sich so langfristig Datenbanken und Kriterienkataloge schaffen, die den Aufwand zur Nutzung der Methodik minimieren.

Die Wahl des AHP bringt den Vorteil, dass ein unterirdisches Infrastrukturprojekt in seine gesamten Bestandteile hierarchisch gegliedert werden kann. Auf diese Weise haben Entscheider die Möglichkeit, verschiedene Szenarien zu bewerten und hinsichtlich einer Verfahrensauswahl zu entscheiden. Folglich werden administrative, projektspezifische und wirtschaftliche Ziele exakter erreicht. Das Gesamtergebnis stellt schließlich ein Ergebnis dar, welches durch alle Projektbeteiligten erreicht wurde

Als problematisch hat sich bisher die fehlende Transparenz ergeben, die im Laufe des Planungsprozesses zwangsläufig aufgrund fehlender Bewertungsmethoden auftritt. Infolgedessen ist es für ein Projekt wichtig, auch nach dem Bau der Infrastruktur die Bewertung nachzuvollziehen. Zwar bringt ein Bewertungsverfahren niemals eine absolut richtige Lösung bzw. birgt die subjektive Komponente stets die Gefahr, die Ergebnisse in eine Richtung zu lenken, jedoch tragen solche Verfahren dazu bei, solche Einflüsse zu minimieren, indem die Meinungen der Projektbeteiligten, die Qualität der Informationen, das Entscheiderverhalten und die Risikofaktoren zusätzlich berücksichtigt werden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Die ganzheitliche Betrachtung eines Bauwerks über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg, unter Berücksichtigung aller Phasen, von der Planung über Bau und Nutzung bis hin zum Abbruch oder zum Verlust des Bauwerks, ist für Betreiber und Planer von großer Bedeutung, da eine solche Betrachtungsweise das zu wählende Bauverfahren nachhaltig beeinflussen kann. Ein derartiges Vorgehen stellt für die Auftraggeber von Infrastrukturmaßnahmen eine schwierige Aufgabe in der Planungsphase dar, vor allem dann, wenn mehrere, gleichwertig erscheinende Bauverfahren miteinander konkurrieren. Grund hierfür ist die Vielfältigkeit der einzelnen Bauverfahren und das heterogene Zusammenspiel von Bau- bzw. Verfahrensweise sowie ihrem Einfluss auf die Ökologie, das soziale Zusammenleben und auf die Kosten. Als problematisch erweist sich zudem, dass Planungsentscheidungen nachträglich aufgrund fehlender Bewertungsverfahren nicht mehr geprüft werden können. Die Forderung nach einer Transparenz der Bewertung ist folglich ein Ziel aller am Entscheidungsprozess beteiligten Gruppen. Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Erarbeitung eines transparenten Bewertungsverfahrens für genau diese Problematik bei der Entscheidungsfindung des bestmöglichen Bauverfahrens.

Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel 2 der derzeit gültige Planungsprozess für unterirdische Infrastruktur aufgezeigt. Dabei werden die einzelnen Verfahrensebenen, Planungsstufen sowie deren Entscheidungsinhalte beim Bau eines unterirdischen Infrastrukturprojektes beschrieben und mit dem Ziel kritisch hinterfragt, den derzeitigen Planungsablauf mit Hilfe entscheidungstheoretischer Grundlagen effektiver zu gestalten.

In Kapitel 3 wird zunächst der Frage nachgegangen, wie überhaupt eine Entscheidung im Allgemeinen zustande kommt. Es werden die theoretischen Grundlagen der Entscheidungstheorie aufgezeigt, um eine Basis für die Entscheidungsproblematik zu schaffen, wobei u.a. dargelegt wird, dass eine Entscheidung unter Sicherheit bzw. Unsicherheit und Ungewissheit getroffen werden kann. Die Eingrenzung der einzelnen Entscheidungsmodelle führt dazu, dass eine bestimmte Art von Entscheidungsmethoden für die weitere Betrachtung von Bedeutung ist. Dabei handelt es sich hier speziell um die multikriteriellen Entscheidungsverfahren. Das Analysieren des Entscheidungsprozesses hat gezeigt, dass multikriterielle Entscheidungsverfahren für die Problematik dieser Arbeit heranzuziehen sind.

Folglich werden in Kapitel 4 die multikriteriellen Entscheidungsverfahren, welche sich in multiattributive sowie multiobjektive Verfahren aufteilen lassen, näher untersucht und hinsichtlich einer Adaptierbarkeit für ein Bewertungsverfahren unterirdischer Infrastruktur analysiert. Nach dem Abwägen aller Vor- und Nachteile fällt die Wahl auf den Analytic Hierarchy Process (AHP), ein multiattributives Verfahren, was den großen Vorteil auf-

weist, qualitative und quantitative Projektkriterien zur Erstellung einer Bewertungshierarchie nutzen zu können.

In Kapitel 5 wird der AHP ausführlich vorgestellt und hinsichtlich des mathematischen Vorgehens beschrieben. Die gleichzeitige Nutzung qualitativer und quantitativer Kriterien erweist sich als eine besondere Stärke des Verfahrens, so dass sowohl vorhandene Daten als auch qualitative Einschätzungen (unter Zugrundelegung der 9-Werte-Skala) genutzt werden können. Die Ausführungen zeigen dennoch, dass Aspekte wie Unsicherheit und Unschärfe, welche zwangsläufig im Zuge von Entscheidungen auftreten und eine gewisse Intransparenz und Subjektivität hervorrufen, im AHP kaum berücksichtigt werden. Zwar erweist sich der prozessuale Charakter sowie die hierarchische Strukturierung zur Verringerung der Subjektivität bzw. Erhöhung der Transparenz als Vorteil, jedoch sind die direkten Bewertungen stets von Daten und Einschätzungen abhängig, die oftmals Unsicherheiten und Unschärfen ausgesetzt sind.

Aufgrund der fehlenden Berücksichtigung der Unschärfe und Unsicherheit wird in Kapitel 6 zunächst die Fuzzy-Theorie vorgestellt, welche durch Lotfi Zadeh genau für derartige Unschärfetrachtungen entwickelt wurde. Im Rahmen dieses Abschnittes wird gezeigt, auf welche Art eine Unschärfe bei Bewertungen auftreten kann. Dazu wird die Unschärfe bzgl. Zahlen und Mengen vorgestellt und mathematisch ausführlich beschrieben. Da im AHP feste Zahlen und Daten genutzt werden, ist eine Erweiterung der Datenanalyse von Vorteil, so dass solche Aspekte mit Hilfe der Fuzzy-Theorie ausgedrückt werden. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird dazu die qualitative und quantitative Bewertung mit Hilfe eines Fuzzy-AHP-Ansatzes modifiziert, indem die Qualität der Informationen sowie die Entscheidungseinstellung mit in die Bewertung einfließt. Für die klassische AHP-Skala werden feste trianguläre Fuzzy-Funktionen gebildet, welche für jeweils einen konkreten AHP-Wert stehen. Analog dazu können für quantitative Daten vom Entscheider freie trianguläre Fuzzy-Funktionen gebildet werden, so dass unscharfe Daten genauer abgebildet werden.

Der Aspekt der Unsicherheit wird in Kapitel 7 aufgegriffen, wobei zunächst die einzelnen Unterschiede hinsichtlich dieser Unsicherheit aufgezeigt werden. Dazu wird unter anderem der Begriff Risiko eingeführt und im Hinblick auf die unterschiedliche Art des Auftretens untersucht. Dabei wird festgelegt, dass im Rahmen dieser Arbeit nur der Aspekt des finanziellen bzw. kalkulatorischen Risikos im Zuge von Kostenkalkulationen berücksichtigt werden soll. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden unterschiedliche risikoanalytische Methoden vorgestellt. Die Monte-Carlo-Simulation wird als quantitative Risikoanalysemethode ausgewählt und für das Entscheidungsmodell genutzt. Diese Methode eignet sich besonders bei kalkulatorischen Fragestellungen vor allem dann, wenn Kalkulationen aus vergangenen Projekten in Form von Datenbanken vorliegen, die für eine aktuelle Kostenberechnung herangezogen werden können. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Darstellung des Endergebnisses, welches in Form von Dichtefunktionen vorliegt. Der

Entscheider kann dadurch verschiedene Szenarien untersuchen und diejenigen auswählen, die für die Bewertung wichtig sind. Diese Kalkulationen können somit direkt in das Entscheidungsmodell integriert werden.

Die theoretischen Grundlagen der verschiedenen Theorien werden anschließend im achten Kapitel zum Entscheidungsmodell für unterirdische Infrastruktur vereint. Dazu wird das Bewertungsmodell DEMUS (Decision Management for Underground Infrastructure) ausführlich vorgestellt und in einzelne Phasen unterteilt. Wichtigster Baustein dieses Modells ist die Datentypanalyse, in welche die verschiedenen Kriterien hinsichtlich Unschärfe und Unsicherheit sortiert werden, da jedes Kriterium eine unterschiedliche mathematische Berechnung erfordert. Das Modell basiert insgesamt auf den bereits vorgestellten Fuzzy-Ansatz, so dass auch scharfe (risikobasierte) Werte stets fuzzyfiziert werden müssen. Diese Werte werden allerdings als ein Sonderfall der Fuzzyfizierung betrachtet, weil diese in Form von Singleton-Fuzzy-Funktionen dargestellt werden müssen. Eine Integration in das Fuzzy-Modell ist anschließend möglich. Weiterhin wird in diesem Abschnitt die Software DEMUS² vorgestellt, mit welcher die Integration der vorgestellten Methoden überhaupt erst möglich ist. Mit Hilfe von DEMUS² hat der Entscheider die Möglichkeit, Kriterien zu bewerten, Risiken in Form von Intervallen oder aus Monte-Carlo-Berechnungen zu integrieren, Fuzzy-Funktionen für Daten zu bilden sowie klassische scharfe Daten zu nutzen. Dies hat den Vorteil, die Transparenz zu erhöhen, die Subjektivität zu verringern und mehrere Methoden und Aspekte zu einem ganzheitlichen Bewertungsmodell zu führen.

Das Modell sowie die Software werden im neunten Kapitel erstmalig auf ein Praxisprojekt angewendet. Dabei handelt es sich um ein innerstädtisches Leitungsbauprojekt in Osnabrück, welches bereits im Jahr 2007 in geschlossener Bauweise durchgeführt wurde. In diesem Kapitel wird zunächst der bereits abgeschlossene Entscheidungsprozess analysiert und hinsichtlich der aufgetretenen Defizite untersucht. In einem weiteren Schritt wird das gesamte Projekt unter Berücksichtigung des Entscheidungsmodells erneut bewertet, wobei nunmehr feste Bewertungskriterien erarbeitet werden, die bereits im vorherigen Abschnitt vorgestellt wurden. Ziel ist es, eine Bewertungshierarchie zu erarbeiten, die das gesamte Projekt transparent darstellt. In einem ersten Test wird die Bewertung mit dem klassischen AHP ohne eine Beachtung unscharfer und unsicherer Methoden ausgeführt. Hinzuzufügen ist, dass bei der ursprünglichen Bewertung lediglich zwei Kostenkalkulationen für die geschlossene und offene Bauweise vorlagen, die nahezu identische Kosten aufgewiesen haben. Das Ergebnis des ersten Tests zeigt, dass eine Präferenz für die geschlossene Bauweise vorliegt, so dass die ursprüngliche Entscheidung die richtige war.

Der zweite Test berücksichtigt nunmehr unscharfe und unsichere risikobasierte Aspekte, wobei hier die Bauzeit und Folgekosten als unscharfe und die Initialkosten sowie Mehrkosten aus einer Bauzeitüberschreitung als unsichere Kriterien definiert wurden. Dazu

werden für das Kriterium ‚Bauzeit‘ zunächst Fuzzy-Funktionen gebildet Für die Kriterien ‚Initialkosten‘ und ‚Mehrkosten‘ wird eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Das Kriterium ‚Folgekosten‘ wird durch eine qualitative Fuzzy-Funktion ausgedrückt. Diese Ergebnisse werden dann in die Software integriert, so dass die Gesamtbewertung erneut durchgeführt wird. Der Unterschied zum ersten Test besteht nunmehr darin, dass weitere Analysemöglichkeiten umsetzbar sind. Insbesondere ist ein Vorteil darin zu sehen, dass die Ergebnisse in Abhängigkeit der Qualität der Informationen sowie der Entscheiderperspektive ausgedrückt werden, was wiederum zu weiteren Rückschlüssen hinsichtlich der Bewertung führt. Bspw. wird auf diesem Weg gezeigt, dass bestimmte Kriterien einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben, weil diese Kriterien qualitativ, also mit Hilfe der AHP-Skala, bewertet wurden.

Die Analyse zeigt somit, dass sensitiven Kriterien herausgelöst- und intensiver betrachtet werden, indem bspw. die Qualität der Informationen erhöht wird und konkrete Daten evaluiert werden. Das Entscheidungsmodell hat insgesamt gezeigt, dass eine ganzheitliche und transparente Betrachtung mehrerer Alternativen durchaus möglich ist.

10.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Entscheidungsmodell für unterirdische Infrastruktur entwickelt, welches erstmalig an ein unterirdisches Infrastrukturprojekt angewendet wurde. Zwar konnte im Anwendungskapitel eine Entscheidungssituation nachträglich mit Hilfe von DEMUS² evaluiert werden, so dass die ursprüngliche Entscheidung bestätigt und ein valides Ergebnis geliefert wurde, jedoch stellt sich die Frage, wie das Entscheidungsmodell im Zuge eines noch in der Planungsphase befindlichen aktuellen Projektes eingesetzt werden könnte. Folglich muss nicht nur das Modell sondern auch die Software für in der Planung befindlichen Bauprojekte eingesetzt werden, um nicht nur die Akzeptanz der Methodik zu erhöhen, sondern auch die Validierung der Ergebnisse zu verbessern, da zurzeit keinerlei Erfahrung in der Nutzung einer solchen Software existiert.

Eine weitere Untersuchung sollte hinsichtlich der Bewertung qualitativer und quantitativer Aspekte vollzogen werden. Viele der Vergleiche werden in dieser Arbeit nur auf qualitativem Wege unter Nutzung der AHP-Skala durchgeführt. Zur Reduktion des qualitativen Anteils sind anhand noch zu erstellender Kriterienkataloge Datenbanken aufzubauen. Diese sollten im Idealfall Daten aus bereits abgeschlossenen Projekten beinhalten. Bspw. können so bestimmte Kriterien genauer definiert und beschrieben werden, insbesondere wenn Kriterien wie Kosten eine Rolle spielen, die ohnehin bestimmten finanziellen Risiken unterliegen. Auf diesem Wege ist es den Entscheidern möglich, Erfahrungen aus vergangenen Bauprojekten mit in eine aktuelle Entscheidung zu integrieren. Ebenso können bereits abgeschlossene Bauprojekte dahingehend untersucht werden, ob bestimmte Sachverhalte für eine Entscheidung immer wieder auftreten. Mit der Zeit lassen sich bestimmte Kriterien in einen Kriterienkatalog zusammenfassen, welcher für zukünftige Projekte herangezogen werden könnte. Ein solcher Katalog führt dazu, dass die Ak-

zeptanz dieser Methodik erhöht wird, da bestimmte Prozesse auf diesem Wege automatisiert werden.

Die Thematik in dieser Arbeit war an die Fragestellung geknüpft, welches Bauverfahren für ein unterirdisches Infrastrukturprojekt am besten geeignet ist, wobei die Wahl des Bauverfahrens bereits im Zuge der frühen Planungsphase getroffen werden sollte, um die Akzeptanz des Projektes frühzeitig zu erhöhen. Dabei werden ökologische, ökonomische, technische und sozio-kulturelle Aspekte berücksichtigt, um die Ganzheitlichkeit der Bewertung zu gewährleisten. Dennoch können in zukünftiger Forschungsarbeit insbesondere in diesem Bereich weitere Untersuchungen angestrebt werden. Beispielsweise ist das Modell durch eine Lebenszykluskostenbetrachtung zu erweitern, so dass Folgekosten in der Planungsentscheidung eine stärkere Berücksichtigung finden. Betrachtet man dabei den Lebenszyklus eines unterirdischen Bauwerks genauer, so fällt auf, dass durchaus weitere Aspekte in den Entscheidungsprozess aufgenommen werden können. Das zu wählende Bauverfahren hat insgesamt Auswirkungen auf die Gestaltung des Querschnitts des endgültigen Bauwerks. Je nachdem mit welchem Bauverfahren das Bauwerk hergestellt wird, muss bspw. die Ausstattung einer Tunnelröhre auf eine andere Art erfolgen [68]. Genau diese Ausstattung hat wiederum Auswirkungen auf das Nutzerverhalten während der Betriebsphase, bspw. wenn es in Tunneln zu Unfällen mit Brandkatastrophen kommt. Um den Personenschaden zu minimieren, sind weitere Ausstattungsmerkmale festzulegen, die durchaus bereits über die kalkulierten Kosten für die Ausstattung des Bauwerks liegen. In Abhängigkeit des geforderten Nutzerrisikos ist demzufolge die Ausstattung eines Tunnelbauwerks zu planen. Aus diesem Grunde spielt die Bestimmung des Nutzerrisikos in der Planungsphase ebenfalls eine entscheidende Rolle, da je nachdem wie das Nutzerrisiko bestimmt wird, die Ausstattung eines Tunnelbauwerks erfolgt. Man erkennt hier eine Wechselwirkung zwischen Nutzerrisiko und monetären Bereichen im Zuge der frühen Planungsphase. Hiernach sollten in einem nächsten Schritt genau diese Wechselbeziehungen herausgearbeitet werden, so dass eine Berücksichtigung des Nutzerrisikos in das Entscheidungsmodell erfolgen kann.

Analog dazu verhält sich während der Betriebsphase auch das Bauwerksrisiko, welches die Gefahr des Ausfalls eines Bauwerks im Zuge einer Brandkatastrophe oder terroristischen Aktes beschreibt. Auch hier sind nicht nur die Ausstattung des Bauwerks von Bedeutung sondern ebenfalls einzelne Bauelemente bzw. Baustoffe, die zu einer Erhöhung (oder Reduktion) der Bauwerkssicherheit führen. Somit hat das Bauwerksrisiko einen direkten Einfluss auf die Lebenszykluskostenbetrachtung, so dass dieser Aspekt mit in die Planungsphase integriert werden sollte. Schließlich würde das Entscheidungsmodell nicht nur klassische Kriterien wie Technik, Ökonomie, Ökologie und sozio-kulturelle Aspekte verfolgen, sondern um weitere Faktoren wie Nutzer- und Bauwerksrisiko ergänzt, was sicherlich zu einer Erhöhung der Akzeptanz des Projektes führen würde. Es wäre zu prüfen, wie solche Risiken, welche zumeist durch F-N-Diagramme dargestellt werden, in

ein solches Modell implementiert werden könnten. Erste Arbeiten von Vollmann et al. haben gezeigt, dass das Risiko mit Hilfe des klassischen AHP im Hinblick auf mehrere Ausstattungsvarianten bewertet werden konnte. Dieser Ansatz sollte weiter verfolgt und in das Entscheidungsmodell integriert werden [198].

Ein weiterer wichtiger Punkt für zukünftige Forschungsarbeit ist die genauere Untersuchung der maßgebenden Kriterien. In dieser Arbeit werden zunächst Kriterien gesammelt und in Anlehnung an den AHP hierarchisch gegliedert. Dies ist zwar ein erster Schritt, um den Entscheidungsprozess transparenter zu gestalten. Die Frage sei jedoch erlaubt, ob die unterschiedlichen Kriterien in Wechselwirkung zueinander stehen, zumal viele Kriterien sich gegenseitig beeinflussen können, was sicherlich zu einer Veränderung des Entscheidungsprozesses führen könnte. Zukünftig können dabei zwei mögliche Szenarien untersucht werden, die die vorliegende Methodik erweitern könnten. In einem ersten Schritt ist zu prüfen, ob Bewertungsverfahren existieren, die eine solche gegenseitige Beeinflussung aufgreifen und in den Bewertungsalgorithmus berücksichtigen. Saaty stellte bereits erste Arbeiten dazu vor, indem er den aktuellen AHP zum Analytic Network Process (ANP) erweiterte. Der mathematische Hintergrund dieses Verfahrens ist jedoch deutlich aufwendiger als zum klassischen AHP und stellt neue Herausforderungen hinsichtlich des Entscheiders dar. Somit ist zu prüfen, ob eine solche Methodik sinnvoll einsetzbar ist.

In einer zweiten Untersuchung könnte eine vorgeschaltete Sensitivitätsanalyse weitere Erkenntnisse über die Zusammensetzung und Wechselbeziehungen der Kriterien aufzeigen. Bspw. sei hier die Sensitivitätsanalyse nach Vester genannt [195] [196]. Mit Hilfe dieser Sensitivitätsanalyse sollen Einflussvariablen, das Wirkungsgefüge und die Beeinflussung eines Systems analysiert werden, um maßgebende Kriterien herauszuarbeiten, die einen hohen Einfluss auf dieses System haben. Vester verfolgt in seiner Methode das vernetzte Denken, welches unsichtbare Einflüsse sichtbar macht, Strukturen und Zusammenhänge einzelner Kriterien visualisiert, Wechselwirkungen und Eigendynamiken von Systemen erfasst, Probleme aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet und die Einflussfaktoren auf relevante Faktoren reduziert. Im Vorfeld ließe sich also ein System generieren, welches einen ganzheitlichen Ansatz verfolgt, was wiederum die Akzeptanz eines Projektes positiv bedingen würde.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Alfen, H. W.; Riemann, A.: *Lebenszyklusorientiertes Risikomanagement für PPP Projekte im öffentlichen Hochbau* Bauhaus-Universität Weimar. Weimar: Verlag der Bauhaus-Universität Weimar, 2010
- [2] Al-Subhi Al-Harbi, K.M.: *Application of the AHP in project management*. In: International Journal of Project Management 19, 2001, S. 19-27
- [3] Bamberg, G.; Coenenberg, A.: *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*, WiSo Kurzlehrbücher Reihe Betriebswirtschaft, 11. Auflage, Verlag Vahlen, 2002
- [4] Bandemer H.; Gottwald S.: *Einführung in Fuzzy- Methoden*. Berlin: Akademie-Verlag, 1993
- [5] Bard, J. F.; Sousk, S. F.: *A Trade Analysis for Rough Terrain Cargo Handlers Using The AHP: An Example of Group Decision Making*. In: IEEE Transactions on Engineering Management, 37, 3, 1993, S. 222-228
- [6] Bartnick, J.: *Bewertung und Kompromißbildung: Eine Weiterentwicklung der Nutzwertanalyse mit Beispielen aus der Raumplanung*. Band 59 der Schriften zur öffentlichen Verwaltung und öffentlichen Wirtschaft, Hrsg. v. P. Eichhorn, Hrsg. P. Friedrich, Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden, 1983
- [7] Barzilai, J.; Lootsma, F.A.: *Power Relations and Group Aggregation in the Multiplicative AHP and SMART*. In: Journal of Multicriteria Decision Analysis 6, 1997, S. 155-165
- [8] Bayer, H.-J.: *HDD-Praxis Handbuch*. Essen, Vulkan-Verlag, 2005
- [9] Bechmann, A.: *Das Praxis-Defizit der Umweltverträglichkeitsprüfung. Struktur, Ausmaß, Ursachen, Folgen. Die UVP in Deutschland, Band I*. Verlag Edition Zukunft, Barsinghausen, 2003
- [10] Bechmann, A.: *Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung*. Beiträge zur Wirtschaftspolitik 29, Bern: Verlag Paul Haupt, 1978
- [11] Bevilacqua, C.; D'Amore, A.; Polonara, F.: *A Mult-Criteria Decision Approach to Choosing The Optimal Blanching-Freezing System*. In: Journal of Food Engineering, 63, 2004, S. 253-263
- [12] Bhushan, N.; Rai, K.: *Strategic Decision Making – Applying the Analytic Hierarchy Process*, Bangalore, India, 2004
- [13] Biewer, B.: *Fuzzy-Methoden: praxisrelevante Rechenmodelle und Fuzzy-Programmiersprachen*. Springer-Verlag, Berlin, 1997.

-
- [14] Blohm, H.; Lüder, K.: *Investition*. Vahlen-Verlag, München, 1991
- [15] BLS Alp Transit AG: *ATG-Handbuch*, Thun, 2000
- [16] Böhme, G.: *Fuzzy-Logik*. Springer Verlag, Berlin, 1993
- [17] Bosch, H.: *Entscheidung und Unschärfe: Eine entscheidungstheoretische Analyse der Fuzzy-Set-Theorie*, Vol. 47, Eul, Bergisch Gladbach, 1993
- [18] Bottero, M.; Peila, D.: *The use of the Analytic Hierarchy Process for the comparison between microtunnelling and trench excavation*. In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 20, 2005, S. 501–513
- [19] Brans, J.P.; Vincke, P.: *A preference ranking organisation method : The PROMETHEE method for MCDM*. In: *Management Science* No. 31, Issue 6, 1985, S. 647-656.
- [20] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*. 5. Auflage, Frankfurt a. M.: Verlag Harri Deutsch, 2001
- [21] Bruhnke, K.-H.; Kübler, R.: *Der Lebenszyklus einer Immobilie*. In: *LACER*; Band 7, 2002, S. 497-504
- [22] Buckley, J. J.: *Fuzzy Hierarchical Analysis*. In: *Fuzzy Sets and Systems*, 17, 1985, S. 233-247
- [23] Buckley, J. J.: *Ranking Alternatives Using Fuzzy Members*. In: *Fuzzy Sets and Systems*, 15, 1985, S. 21-31
- [24] Bundesanstalt für Straßenwesen: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)*, Teil 5 Tunnelbau. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag, 2007
- [25] Bundesministerium der Justiz: *Bundesfernstraßengesetz (FStrG)*. Quelle: <http://www.gesetze-im-internet.de/fstrg/BJNR009030953.html>, letzte Änderung vom 31. Juli 2009, abgerufen am 13. August 2012
- [26] Bundesministerium der Justiz: *Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)*. Quelle: http://www.gesetze-im-internet.de/bnatschg_2009/index.html, letzte Änderung vom 06. Februar 2012, abgerufen am 15. August 2012
- [27] Bundesministerium der Justiz: *Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)*. Quelle: <http://www.gesetze-im-internet.de/uvpg/BJNR102050990.html>, letzte Änderung vom 17. August 2012, abgerufen am 01. September 2012
- [28] Bundesministerium der Justiz: *Raumordnungsgesetz (ROG)*. Quelle: http://www.gesetze-im-internet.de/rog_2008/index.html, letzte Änderung vom 31. Juli 2009, abgerufen am 13. August 2012

- [29] Bundesministerium der Justiz: *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab)*. Quelle: http://www.gesetze-im-internet.de/strabbo_1987, letzte Änderung vom 8. November 2007, abgerufen am 13. August 2012
- [30] Bundesministerium der Justiz: *Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG)*. Quelle: <http://www.gesetze-im-internet.de/vwvfg/index.html>, letzte Änderung vom 14. August 2009, abgerufen am 23. Juli 2012
- [31] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. *Handbuch für eine gute Bürgerbeteiligung – Planung von Großvorhaben im Verkehrssektor*
- [32] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Arbeitshilfen Abwasser*. Stand 20.10.2006, A-6.2.4.23 u. A-6.2.4.26; <http://www.arbeitshilfen-abwasser.de/html/index.html>
- [33] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen: *Allgemeines Rundschreiben Straßenbau 25/1998: Leitfaden für die Planungsentscheidung Einschnitt oder Tunnel*. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag, 1988
- [34] Bundesregierung: *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI)*. In: Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 53. Bonn: Bundesanzeiger Verlag, 2009, S. 2732-2809
- [35] Cadez, I.: *Risikowertanalyse als Entscheidungshilfe zur Wahl des optimalen Bauvertrags*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [36] Chan, F. T.S.; Niraj K.: *Global Supplier Development Considering Risk Factors Using Fuzzy Extended AHP Based Approach*. In: *Omega*, 35, 2007, S. 417-431
- [37] Chang, D.-Y.: *Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP*. In: *European Journal of Operational Research* Volume 95, Issue 3, 1996, S. 649–655
- [38] Chang, S.L.; Wang, R.-C.; Wang, S.-Y.: *Applying fuzzy linguistic quantifier to select supply chain partners at different phases of product life cycle*. In: *International Journal of Production Economics*, Volume 100, Issue 2, April 2006, S. 348–359
- [39] Chapman, C.B.; Cooper, D.F.: *Risk analysis: testing some prejudices*. In: *European Journal Operational Research* 14(3), 1983, S. 238-247
- [40] Chen, C.-S.; Liu, Y.-C.: *A methodology for evaluation and classification of rock mass quality on tunnel engineering*. In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 22, 2007, S. 377–387

-
- [41] Cheng, C.H., Mon D.L.: *Evaluating Weapon System by Analytical Hierarchy Process based on fuzzy scales*. In: *Fuzzy Sets And Systems*, 63, 1994, S. 1-10
- [42] Cheng, C.-H., Yang, K.-L., Hwang, C.-L.: *Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight*. In: *European Journal of Operational Research*, 116 (2), 1999, S. 423–435
- [43] Cheng, C.-H.: *Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function*. In: *European Journal of Operational Research*, 96 (2), 1997, S. 343–350
- [44] Comploj, P.: *Entscheidungen in der Bayes-Statistik und Sequentialanalyse bei unscharfer Information: am Beispiel unscharfer Stichproben von poissonverteilten stochastischen Größen und unscharfer A-posteriori-Gamma-Verteilungen*. Leopold-Franzens-Universität, Medizinische Universität, Management Center Innsbruck, 2006
- [45] Corsten, H.; Corsten, H.; Sartor, C.: *Operations Research: Eine problemorientierte Einführung*. Vahlen, München, 2005
- [46] Dekan des Fachbereichs 10 – Bauwesen an der Universität Essen: *Seminarband zum 2. Essener Baupraxis-Seminar*. Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen 87, Universität Essen, November 2000
- [47] Demmler, M.: *Risikomanagement im internationalen Tunnelbau*. In: *BauPortal* 12/2009, 2009, S. 698-704
- [48] Deng, H.: *Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison*. In: *International Journal of Approximate Reasoning*, 21 (3), 1999, S. 215–231
- [49] Deutsche Bahn AG: *Richtlinie 853 – Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten*. Frankfurt am Main, 2008
- [50] Dey, P. K.: *Project Risk Management: A Combined Analytic Hierarchy Process and Decision Tree Approach*. In: *Cost Engineering* Vol. 44/No. 3, 2002, S. 13-26
- [51] DIN 276-1: *Kosten im Bauwesen – Teil 1: Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2008
- [52] DIN 18205: *Bedarfsplanung im Bauwesen*. Berlin: Beuth Verlag, April 1996
- [53] DIN 18300: *VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Erdarbeiten*. Berlin: Beuth Verlag, 2006
- [54] DIN 18960: *Nutzungskosten im Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag, Februar 2008

-
- [55] DIN 69901:2009-01. *Projektmanagement - Projektmanagementsysteme*. Berlin: Beuth Verlag, Januar 2009
- [56] Dinkelbach, W.; Kleine, A.: *Entscheidungslehre, Elemente einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungslehre*. Berlin, 1992
- [57] Döbbelin, U.: *Entwicklung und Anwendung eines wissensbasierten Systems zur Vermeidung von Bauschäden in der Geotechnik*. Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover
- [58] Domschke, W.; Drexl, A.: *Einführung in Operations Research*. 7. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer, 2005
- [59] Dörsam P.: *Grundlagen der Entscheidungstheorie - anschaulich dargestellt*. 5. Auflage, Pd-Verlag, 2007
- [60] Dyer, J.S.: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys International Series*. In: *Operations Research & Management Science*, Volume 78, IV, 2005, S. 265-292
- [61] Dyer, J.S.; Wendell, R.E.: *A Critique of the Analytic Hierarchy Process*. Working Paper 84/85-4-24, Department of Management, The University of Texas at Austin, 1985
- [62] Eisenführ, F.; Weber, M.: *Rationales Entscheiden*. 3. Aufl., Berlin: Springer, 1996
- [63] Faber, M.H.: *Risk and Safety in Engineering*. Vorlesungsmaterial Lecture 1 bis 13, Danish Technical University, Department of Civil Engineering, Dänemark, 2009
- [64] Fikar, M.: *Risikomanagement im Marketing*. Lang Verlag, Frankfurt am Main, 2003
- [65] Forschergruppe Ingenieurbauten - Wege zu einer Ganzheitlichen Betrachtung: *Ingenieurbauten: Wege zu einer ganzheitlichen Betrachtung; Abschlussbericht der DFG-Forschergruppe FOGIB an der Universität Stuttgart. Band 1 - 3*. Stuttgart: Universität, Institut für Konstruktion und Entwurf II, 1997
- [66] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Merkblatt zur Umweltverträglichkeitsstudie in der Straßenplanung*. FGSV-Verlag Köln, 2002
- [67] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinie für die Anlage von Straßen - Teil: Landschaftspflege*. FGSV-Verlag Köln, 1996
- [68] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)*. Köln, 2006

- [69] Geise K.; Leuchter S.; Müller V.; Schmitz D.; Poschmann G.: *Tutorial zur Einführung in die präskriptive Entscheidungstheorie*. Das Zentrum Mensch-Maschine-Systeme (ZMMS) an der Technischen Universität, (<http://www.zmms.tu-berlin.de/lehre/tutorial>), Berlin, 1997
- [70] Geldermann, J.: *Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung*. In: Fortschritt-Berichte VDI 16 Nr. 105, Düsseldorf, 1999
- [71] Glasserman, P.: *Monte Carlo Methods in Financial Engineering: Applications of Mathematics, Stochastic Modelling and Applied Probability*. Springer-Verlag, New York, 2004.
- [72] Golden, B.L.; Wasil, E.A.; Harker, P.T.: *The Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies*. Springer-Verlag, New York, 1989
- [73] Grauel, A.: *Fuzzy-Logik: Einführung in die Grundlagen mit Anwendungen*. BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim-Leipzig-Wien-Zürich, 199
- [74] Haller, M.: *Risiko-Management – Eckpunkte eines integrierten Konzepts*. In: Jacob, H. (Hrsg.): *Risiko-Management*, Gabler, Wiesbaden, 1986
- [75] Hammersley, J.; Handscomb, D.: *Monte Carlo Methods*. Methuen young books, 1964
- [76] Harker, P.T.; Vargas, L.G.: *The Theory of Ratio Scale Estimation: Saaty's Analytical Hierarchy Process*. In: *Management Science* 33, 1987, S.1383-1403
- [77] Hauptmanns, U.; Werner, W.: *Engineering Risks. Evaluation and Valuation*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1991
- [78] Heinrich, G.: *Grundlagen der Mathematik, der Statistik und des Operations Research für Wirtschaftswissenschaftler*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006
- [79] Hengartner, W.; Theodorescu, R.: *Einführung in die Monte-Carlo-Methode*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin, 1978
- [80] Hertz, D.B.: *Risk Analysis in Capital Investment*. *Harvard Business Review*, Nr. 1, 1964
- [81] Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen, Stabstelle Presse- und Öffentlichkeitsarbeit: *Wirtschaftlicher Aspekte bei Tunnelbauwerken in frühen Planungsphasen*. Bericht. <http://www.ag-huenfeld.justiz.hessen.de> Wiesbader 2005
- [82] Hwang, C.-L.; Yoon, K.: *Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications*. Springer, New York, 1981

- [83] Isaksson, T.: *Model for estimation of time and cost base on risk evaluation applied on tunnel projects*. Dissertation, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002.
- [84] Iwe, H.: *Einführung in die Fuzzy-Technologie*. 2000
- [85] Juraforum. <http://www.juraforum.de/lexikon/planfeststellungsverfahren>. Abgerufen am 20. Dezember 2012
- [86] Kalos, M.; Whitlock, P.: *Monte Carlo Methods*. Wiley-VCH, 2008
- [87] Kamarianakis, S.; Adden, H.; Thewes, M.: *Einsatz eines Decision Analysis Modells zur Unterstützung des Planungsprozesses für den Bau unterirdischer Infrastrukturen*. In: Messe Berlin GmbH (Hrsg.): Katalog zur Wasser Berlin International 2013 vom 23.– 26.4.2013, No Dig Berlin 2013, Essen: Neureuther Fair Media GmbH, S. 157
- [88] Kamenetzky, R. D.: *The Relationship Between the Analytic Hierarchy Process and the Additive Value Function*. In: Decision Science, Vol. 13, 1982, S. 702-713
- [89] Kangari, R.; Riggs, L.S.: *Construction Risk assessment by linguistics*. IEEE Trans. Eng. Manag., Vol. 36 No. 2, 1989, S. 126-131
- [90] Kaufmann, A., Gupta, M.M.: *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*. Amsterdam, 1991
- [91] Keeney, R.L.: *Value-focused thinking. A path to creative decision-making*. Cambridge, London. Harvard University Press. 1992, S. 416-423
- [92] Keiner, E.: *Stichwort: Unsicherheit – Ungewissheit – Entscheidungen*. In: Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, Jg. 8, Heft 2, 2005, S. 155-172
- [93] Keitsch, D.: *Risikomanagement*. Schäffer-Poeschel Verlag. 2007
- [94] Klein, M.: *Valuation is fuzzy - Integration qualitativer Risiken ins stochastische Bewertungsmodell mit Hilfe der Fuzzy-Set Theorie*. Working Papers in Accounting Valuation Auditing Nr. 2010-8
- [95] Knetsch, T.: *Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Dissertation, 2003
- [96] Knight, F. H.: *Risk, Uncertainty, and Profit*. Boston, MA: Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Company, 1921
- [97] Kohlas, J.: *Monte Carlo Simulation im Operations Research*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1972
- [98] Körkemeyer, P.: *Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedener Herstellme-*

- thoden im Kanalbau am Beispiel einer ausgeführten Baustelle in Osnabrück unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte. Fakultät für Bau- und Umwelt-ingenieurwissenschaften. Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb. Nicht veröffentlicht, 2007.
- [99] Kovári, K.: *Analyse und Handhabung von Risiken im Tunnelbau am Beispiel Zimmerbergtunnel*. Dokumentation SIA D 0169. Sonderdruck, 2001
- [100] Kuo, R. J., Chi, S. C., Kao, S. S.: *A Decision Support System for Selecting Convenience Store Location Through Integration of Fuzzy AHP and Artificial Neural Network*. In: Computers in Industry, Volume 47, Issue 2, 2000, S. 199-214
- [101] Laarhoven, P. J. M.; Pedrycz, W.: *A Fuzzy Extension of Saaty's Priority Theory*. In: Fuzzy Sets and Systems, 11, 1983, S. 229-241
- [102] Lai, Y.-T.; Wang, W.-C.; Wang, H.-H.: *AHP- and simulation-based budget determination procedure for public building construction projects*. In: Automation in Construction 17, 2008, S. 623-632
- [103] Laux, H.: *Entscheidungstheorie*. 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [104] Leibundgut, E.: *Risk Management System – Risikofrüherkennung*. URL: http://www.rmrisk.ch/49291/pdf_files/rmsimagebroschuere.pdf, 30. Mai 2007
- [105] Leung, L. C., Chao, D.: *On Consistency and Ranking of Alternatives in Fuzzy AHP*. In: European Journal of Operational Research, 124, 2000, S. 102-113
- [106] Lootsma, F. A.: *Fuzzy logic for planning and decision making*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/London. 1997
- [107] Maidl, B.: *Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus. Band 1: Konstruktionen und Verfahren*. Verlag Glückauf Essen, 2004
- [108] Maier, K. M.: *Risikomanagement im Immobilienwesen - Leitfaden für Theorie und Praxis*. Knapp, 1999
- [109] Manz, K., Dahmen: *Entscheidungstheorie*. Kompaktstudium Wirtschaftswissenschaften, Verlag Franz Vahlen GmbH, 2000
- [110] Maria-Sanchez, P.: *Neuronal risk assessment system for construction projects*. Dresden : Renningen Expert-Verl., 2005
- [111] Meinen, H.: *Quantitatives Risikomanagement im Bauunternehmen*. VDI Verlag, Düsseldorf, 2005.
- [112] Meixner, O.; Haas R.: *Computergestützte Entscheidungsfindung. Expert Choice und AHP -innovative Werkzeuge zur Lösung komplexer Probleme*.

- Redline Wirtschaft, Frankfurt/Wien, 2002
- [113] Meyer, R.: *Entscheidungstheorie*. Springer Verlag, Berlin, 1999
- [114] Moffett, A; Sarkar, S.: *Incorporating multiple criteria into the design of conservation area networks: a minireview with recommendations*. www.Blackwellpublishing.com/ddi. [Online] 2006. [Zitat vom: 14. August 2007.] http://uts.cc.utexas.edu/~consbio/Cons/Minireview_2006.pdf
- [115] Mustafa M.A.; Al-Bahar, J.F.: *Project Risk Analytic Assessment Using the Hierarchy Process*. In: IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 38, Nr. 1, 1991, S. 46-52
- [116] Mousseau, V.; Dias, L.: *Valued outranking relations in ELECTRE providing manageable disaggregation procedures*. In: European Journal of Operational Research 156, Amsterdam, 2004
- [117] Munda, G.: *Multicriteria Evaluation in a Fuzzy Environment: Theory and Applications in Ecological Economics*. - Physika-Verlag, Heidelberg, 1995
- [118] Mußhoff, O.; Hirschauer, N.: *Modernes Agrarmanagement - Betriebswirtschaftliche Analyse- und Planungsverfahren*. Verlag Franz Vahlen München, 2010
- [119] Nauck, D.; Kruse, R.: *Fuzzy-Systeme und Neuro-Fuzzy-Systeme*. In: Biethahn, J.; Hönerloh, A.; Kuhl, J.; Leisewitz, M.-C.; Nissen, V.; Tietze, M.: *Betriebswirtschaftliche Anwendungen des Soft Computing*. Vieweg-Verlag Braunschweig/Wiesbaden, 1998. S. 35-54
- [120] Nellessen, P.: *Vortriebssynchrone Prognose der Setzungen bei Flüssigkeitschildvortrieben auf Basis der Auswertung der Betriebsdaten mit Hilfe eines Neuro-Fuzzy-Systems*. Universität Bochum Dissertation, Cuvillier Verlag Göttingen, 2005
- [121] Nemuth, T.: *Risiko Risikomanagement bei internationalen Bauprojekten*. Expert, Renningen, 2006
- [122] Neumer, J.: *Neue Forschungsansätze im Umgang mit Unsicherheit und Ungewissheit in Arbeit und Organisation*. RWTH AACHEN, 2009
- [123] Ngoc, Q.; Straube, C.: *Bewertungsmodelle für die Entscheidung von Anwendungssystemen*. Leipzig. 2007
- [124] Nieder, G: *Fuzzy-Logic - eine Möglichkeit zur Automatisierung der Richtungssteuerung im unterirdischen Rohrvortrieb*. In: TIS, Band (1995), Nr.2, S.11-16
- [125] Ossadnik, W.: *Mehrzielorientiertes strategisches Controlling: methodische Grundlagen und Fallstudien zum führungsunterstützenden Einsatz des Analy-*

- tischen Hierarchie-Prozesses*. Heidelberg, 1998.
- [126] Ossadnik, W.; Maus, S.: *AHP als Instrument des strategischen Controlling*. Ingolstadt, 1993
- [127] Ott, N.: *Unsicherheit, Unschärfe und rationales Entscheiden*. Physica-Verlag Heidelberg, 2001
- [128] Patton, C. V.; Sawicki, D. S.: *Basic methods of policy analysis and planning*. 2nd edition., Prentice Hall (Englewood Cliffs, NJ), New Jersey, 1993
- [129] Poisel, R.; Tentschert, E.; Bach D.; Zettler A.: *Gebirgsklassifizierung und Regelung von TBM mittels Fuzzy-Logik*. In: *Feldbau*, 17(1999), Nr.5, S. 486-492
- [130] Poisel, R.; Zettler A.; Bach D.; Lakovits D; Kastner W.: *Rock Mass Rating based on Tunnel Boring Machine Data*. In: *Felsbau*, 17 (1999), Nr.3, S.168-174
- [131] Project Management Institute: *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. Vierte Ausgabe, Newton Square, 2008
- [132] Proporowitz, A.: *Baubetrieb – Bauverfahren*. 1. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2008
- [133] Reichling, P.: *Risikomanagement und Rating – Grundlagen, Konzepte, Fallstudien*. Gabler, Wiesbaden, 2003
- [134] Reinberg, S.; Bröthaler, J.: *Integration von Fuzzy-Methoden in Bewertungsverfahren*. In: Schrenk (Hrsg); *Computergestützte Raumplanung – Beiträge zum Symposium CORP97*; Selbstverlag des Instituts für EDV-gestützte Methoden in Architektur und Raumplanung der TU-Wien, 1997, S.51-63.
- [135] Ritter, E.: *Methode und Instrumente räumlicher Planung*. Akademie für Raumforschung und Landesplanung; Verlag: ARL, Hannover, 1998
- [136] Romeike, F.; Finke, R.: *Erfolgsfaktor Risikomanagement*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2003
- [137] Rommelfanger H. J.: *Die Eignung von Fuzzy-Modellen zur Lösung realer Entscheidungsprobleme*. GI Jahrestagung 2002, S. 685-697
- [138] Rommelfanger, H. J.; Eickmeier, S.H.: *Entscheidungstheorie. Klassische Konzepte und Fuzzy Erweiterungen*. Springer, 2001
- [139] Rungger, M.: *Anwendung und Nutzen von Risikoanalysen bei Großprojekten*, Diplomarbeit, Universität Innsbruck, 2010
- [140] Rürup, B.; Hansmeyer, K.-H.: *Staatwirtschaftliche Planungsinstrumente*. 7. Kapitel: Nutzwertanalyse, S. 132-140, wisu-texte, 3. Aufl., Werner, Düsseldorf,

- 1984.
- [141] Saaty, T. L.: *Axiomatic Foundation of the Analytical Hierarchy Process*. In: Management Science 32, Pittsburgh, 1986, S. 841-855
- [142] Saaty, T. L.: *Decision Making for Leaders*. 3. Aufl., RWS Publications, Pittsburgh, 2001
- [143] Saaty, T. L.: *The Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications, Pittsburgh, 1980
- [144] Saaty, T.L.: *Rank Generation, Preservation, and Reversal in the Analytic Hierarchy Decision Process*. In: Decision Science, Vol. 18, 1997, S. 157-177
- [145] Salski, A.: *Fuzzy-Methoden in der ökologischen Modellierung und Datenanalyse. Werkzeuge für die Modellierung und Simulation im Umweltbereich*. Koblenz, 1999, S. 103-114
- [146] Sander, P.: *PROBABILISTISCHE RISIKO-ANALYSE FÜR BAUPROJEKTE - Entwicklung eines branchenorientierten softwaregestützten Risiko-Analyse-Systems*. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fak für Bau, Dissertation, 2012
- [147] Sandoval-Wong, J.A.: *Development of a risk based decision analysis system for project management in construction projects*. Institut für Baubetrieb, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2012
- [148] Sanjiv G.; Makarand H.: *Decision aids for the selection of installation technology for underground municipal infrastructure systems*. In: Trenchless Technol. Rex, Vol. 15, No. 1, 2000, S. 1-11
- [149] Savage, L.J.: *The Foundations of Statistics*. Wiley, New York, 1954
- [150] Schäfer H.-B., Ott C.: *Lehrbuch der ökonomischen Analyse des Zivilrechts*. 4. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, 2005
- [151] Scheifele, D. R.: *Bauprojekttablauf, Schriftenreihe der Gesellschaft für Projektmanagement*. Köln: Verlag TUeV Rheinland, 1991
- [152] Schimank, U.: *Die Entscheidungsgesellschaft. Komplexität und Rationalität der Moderne*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2005
- [153] Schmidt, K.M.: http://www.experimentalforschung.vwl.uni-muenchen.de/lehre/veranstaltungsarchiv/mikro1/mikro1-4_09ss_not.pdf. 2009
- [154] Schneeweiß, C.: *Planung 1. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen*. Berlin/ Heidelberg, Springer-Verlag, 1991.
- [155] Schneider, E.; Mathoi, T.: *Kostenplanung in Ingenieurtief- und Tunnelbau*. Publikation. Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, Fa-

- kultät der Bauingenieurwesen, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2 FELSBAU 24. Stand 2006)
- [156] Schneider, J.: *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen: Grundwissen für Ingenieure*. 2. überarbeitete Auflage. Zürich: Teubner Verlag, 1995
- [157] Schnorrenberg, U.; Goebels, G.: *Risikomanagement in Projekten*. Friedrich Vieweg&Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Braunschweig, Berlin, 1997
- [158] Schoner, B.; Wedley, W.C.; Choo, E.U.: *A Rejoinder to FOI-man on AHP, with Emphasis on the Requirements of Composite Ratio Scales*. In: Decision Science, Vol. 23, 1992, S. 509-517
- [159] Schubert E.: *Die Erfassbarkeit des Risikos der Bauunternehmung bei Angebot und Abwicklung einer Baumaßnahme*. Werner-Verlag, Düsseldorf 1971
- [160] Schulte, C.: *Lexikon des Controlling*. 1. Auflage. München: Oldenbourg Verlag, 1996
- [161] Schumann, J.; Meyer, U.; Ströbele, W.: *Grundzüge der mikroökonomischen Theorie*, Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, New York, 8. Auflage, 2007
- [162] Schwarz, J.; Sandoval-Wong, J. A.: *Risikomanagement im Tunnelbau*. Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft Nr. 50, Berlin 2010, S. 33-48
- [163] Sobol, I.: *Die Monte-Carlo-Methode*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin, 1983
- [164] Stahlbroker.de. Quelle: <http://stahlbroker.de/2011/02/entwicklung-des-stahlpreises-von-2006-bis-2011>, abgerufen am 15. November 2012
- [165] Stadt Osnabrück: *Leistungsverzeichnisse offene und geschlossene Bauweise*. Ausdruck von März 2007
- [166] Stam A; Sun, M.; Haines, M.: *Artificial neural network representations for hierarchical preference structures*. In: Computers & Operations Research, 23(12), 1996, S. 1191-1201
- [167] Stein, D.: *Der begehbare Leitungsgang*. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2002
- [168] Stein, D.: *Grabenloser Leitungsbau*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2003
- [169] Stein, D.: *Instandhaltung von Kanalisation*. Verlag Ernst & Sohn, 3. Auflage, Berlin 1999
- [170] Stokey E.; Zeckhauser R.: *A Primer for Policy Analysis*. W. W. Norton & Company, 1978
- [171] Strasser, G.: *Nutzwertanalyse*. In: Methoden der empirischen Regionalfor-

- schung, 1. Teil, Veröffentlichungen der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Band 87, Jänecke, Hannover, 1973
- [172] Szyperski, N.; Winand, U.: *Entscheidungstheorie. Eine Einführung unter besonderer Berücksichtigung spieltheoretischer Konzepte*. C. E. Poeschel, Stuttgart, 1974
- [173] Taylor, B.W.: *Introduction to Management Science*. Pearson Education Inc., New Jersey, 2004
- [174] Thewes, M.; Kamarianakis, S.: *Decision analysis for underground infrastructure using uncertain data and fuzzy scales*. In: Proceedings of the 39th ITA World Tunnel Congress, Geneva, Switzerland, 31. Mai – 7. Juni 2013, Underground – the way to the future, London: Taylor&Francis/Balkema, S. 21.
- [175] Thewes, M.; Kamarianakis, S.: *Eine multikriterielle Bewertungsmethode für die Analyse unterirdischer Infrastruktur*. 30. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft, 06.09.2012, Ruhr-Universität Bochum
- [176] Thewes, M.; Kamarianakis, S.: *Multi-criteria decision making of construction methods using the Analytical Hierarchy Process based on fuzzy scales*. Proceedings of the 13th World Conference of the Associated research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS), Singapore, 7-9 November 2012, Advances in Underground Space Development, Research Publishing, Singapur S. 279
- [177] Thewes, M.; Kamarianakis, S.: *Praktische Anwendung einer multikriteriellen Bewertung unterirdischer Infrastruktur*. 13. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium, 17. u. 18.10.2012, Maternus-Haus Köln, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, 2012
- [178] Thewes, M.; Heimbecher, F.; Vollmann, G.: *Facility management methods for an improved serviceability of traffic tunnels and their application to tunnel drainage problems*. Proceedings of the 33rd ITA World Tunnel Congress, Prague, 2007, Underground Space - the 4th Dimension of Metropolises, Taylor&Francis, pp. 1759-1764.
- [179] Thewes, M.; Kamarianakis, S.; Bielecki, R.: *Analyse zur ökologischen und ökonomischen Bewertung offener und geschlossener Bauverfahren zur Herstellung unterirdischer Infrastrukturmaßnahmen – Phase II*. Endbericht der Kooperationspartner Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum, GSTT Beratungsservice GmbH, Berlin. Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, 2011
- [180] Thewes, M., Kamarianakis, S., Bielecki, R.: *Analyse zur ökologischen und ökonomischen Bewertung offener und geschlossener Bauweisen zur Herstel-*

- lung unterirdischer Infrastrukturmaßnahmen*. In: Tagungsband zum 25. Oldenburger Rohrleitungsforum, IRO Band 35, 10.-11. Feb. 2011, S. 372-386, Essen, 2011
- [181] Thewes, M.; Kamarianakis, S.; Bielecki, R.: *Bewertung von offenen und geschlossenen Bauweisen – Eine Analyse unter Berücksichtigung multikriterieller Entscheidungsverfahren*. In: bi UmweltBau, Ausgabe Nr.3, Juni 2011, S. 40-49, Kiel, 2011
- [182] Thewes, M., Kamarianakis, S., Bielecki, R.: *Decision Making for Underground Infrastructure*. Proceedings 29th International No Dig Berlin, 03.-05. Mai 2011, Berlin, 2011
- [183] Thewes, M.; Kamarianakis, S.; Bielecki, R.: *DEMUS – Eine softwaregestützte Analyse für ganzheitliche Bewertungen unterirdischer Infrastruktur*. In: Tagungsband zum 26. Oldenburger Rohrleitungsforum, IRO Band 37, Feb. 2012, S. 350-368, Essen, 2012
- [184] Thewes, M., Kamarianakis, S., Bielecki, R.: *Eine softwaregestützte Analyse für ganzheitliche Bewertungen von offenen und geschlossenen Bauweisen unterirdischer Infrastrukturprojekte – Teil 1: Theoretische Grundlagen multikriterieller Bewertungsverfahren*. In: GSTT Informationen 25-1, 2011
- [185] Thewes, M., Kamarianakis, S., Bielecki, R.: *Eine softwaregestützte Analyse für ganzheitliche Bewertungen von offenen und geschlossenen Bauweisen unterirdischer Infrastrukturprojekte – Teil 2: : Anwendung der Software auf ein konkretes Bauprojekt*. In: GSTT Informationen 25-2, 2011
- [186] Thewes, M., Kamarianakis, S., Bielecki, R.: *Multikriterielle Bewertungsverfahren für unterirdische Infrastrukturprojekte*. In: Tagungsband zum 2. agenda4 – Forschungssymposium der Baubetriebs- und Immobilienwissenschaften, Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 14.-15. Okt. 2010, S. 375-398, 2010
- [187] Thewes, M., Kamarianakis, S., Bielecki, R.: *Multikriterielle Entscheidungsverfahren zur Bewertung verschiedener Bauweisen für unterirdische Infrastrukturprojekte*. In: Festschrift Prof. Schach, Technische Universität Dresden, S.415-440, 2011
- [188] Tietze, M.: *Einsatzmöglichkeiten der Fuzzy Set-Theorie zur Modellierung von Unschärfe in Unternehmensplanspielen*. Göttingen, 1999
- [189] Tolga, E., Demircan, M. L., Kahraman, C.: *Operating System Selection Using Fuzzy Replacement Analysis and Analytic Hierarchy Process*. In: International Journal of Production Economics, 97, 2005, S. 89-117

- [190] Traeger, D. H.: *Einführung in die Fuzzy-Logik*. 2.Auflage. Stuttgart, 1994
- [191] Triantaphyllou, E.; Mann, S. H.: *Using The Analytic Hierarchy Process for Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges*. In: International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice, 2, 1, 1995, S. 35-44, Springer, New York
- [192] Umweltlexikon: <http://www.umweltlexikon-online.de/RUBrechtmanagement/Planfeststellung.php>. (Abgerufen am 20. Mai 2013)
- [193] Varian, H. R.: *Grundzüge der Mikroökonomie*. 7.Auflage, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1999
- [194] Verkehrskommission der Regionalrates: *Erläuterung zur Linienbestimmung der L 238, Ortsumgehung Eschweiler, BA Pumpe-Steinfurt. Erläuterungsbericht*. Bezirksregierung Köln 2009
- [195] Vester, F.: *Ausfahrt Zukunft Supplement. Material zur Systemuntersuchung*. München, 1991
- [196] Vester, F.: *Die Kunst vernetzt zu denken. Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. Ein Bericht an den Club of Rome*. DTB, München, 2002
- [197] Vogt, P.: *Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten*. Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Bau-betrieb, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2012
- [198] Vollmann, G.; Thewes, M.; Kamarianakis, S.: *Evaluation and interpretation of f/n-curves: Development of a new tool for traceable and transparent decision making*. Proceedings of the 6th International Conference on Tunnel Safety and Ventilation, 23rd-25th April 2012, Graz, Austria, S. 49-57.
- [199] von Nitzsch, R.: *Entscheidung bei Zielkonflikten*. Ein PC-gestütztes Verfahren. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden, 1992
- [200] von Nitzsch, R.: *Entscheidungslehre - Der Weg zur besseren Entscheidung*, Verlag der Augustinus-Buchhandlung, 3. Auflage, Aachen, 1996
- [201] Vose, D.: *Risk Analysis, A quantitative Guide*. 3. Edition, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons., Ltd., 2008
- [202] Wabalickis, R. N.: *Justification of FMS with The Analytic Hierarchy Process*. In: Journal of Manufacturing Systems, 17, 1988, S. 175-182
- [203] Wannewetsch, H.: *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik: Beschaffung,*

- Logistik, Materialwirtschaft und Produktion*. Springer, Berlin, Heidelberg 2009
- [204] Weber, K.: *Mehrkriterielle Entscheidungen*. R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1993
- [205] Weck, M., Klocke, F., Schell, H., Rüenauer, E.: *Production Cycles Using The Extended Fuzzy AHP Method*. In: *European Journal of Operational Research*, 100, 2, 1997, S. 351-366
- [206] Wingsch, D.: *Projektsteuerung im Bauwesen*. Vorlesungsmaterial 1993/1994, Universität Rostock, FB Bau, Fachgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft, 1994
- [207] Wolf, K.; Runzheimer, B.: *Risikomanagement und KonTraG*, Gabler, Wiesbaden, 2003
- [208] Yazdani-Chamzini, A.; Yakhchali, S. H.: *Tunnel Boring Machine (TBM) selection using fuzzy multicriteria decision making methods*. In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 30, 2012, S. 194–204
- [209] Yoon K., Hwang C.L.: *Multiple Attribute Decision Making An Introduction*. Thousand Oaks: SAGE Publications, 1995
- [210] Zadeh, L.A.: *Fuzzy Sets*. In: *Information and Control* 8, 1965, S. 338 – 353
- [211] Zadeh, L.A.: *Making computers think like people*. In: *IEEE Spectrum* 08/1984
- [212] Zahedi, F.: *The analytical hierarchy process: A survey of the method and its applications*. In: *Interfaces* 16, 1986, S. 96-108
- [213] Zangemeister, C.: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. 2.Auflage. München: Wittmannsche Buchhandlung, 1971
- [214] Zerna, Köpper & Partner – Ingenieurgesellschaft für Bautechnik: *Machbarkeitsstudie für den Neubau des Ruhralleetunnels (A535)*. Nicht veröffentlicht. 2004
- [215] Zettler A.: *A hybrid grouting control algorithm based on fuzzy logic tuned by a neural network*. Wien, Technische Universität Wien, Fak. Für Bau, Dissertation, 1998
- [216] Zettler, A.; Poisel, R.; Stadler, G.: *Bewertung geologisch-technischer Risiken mit Hilfe von Fuzzy-Logik und Expertensystemen*. In: *Felsbau*, 14 (1996), Nr. 6, S. 352-357
- [217] Zhang, K.: *Entwicklung eines integrierten multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems für Gruppen*. 1. Auflage. Aachen: Shaker Verlag, 2004
- [218] Zimmermann, H.-J., Gutsche, L.: *Multi-Criteria Analyse; Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. 1.Auflage. Berlin:

Springer Verlag, 1991

- [219] Zimmermann, H.-J.: *Fuzzy Set Theory and its Applications*. 4. Auflage, Springer; Berlin, 2001

12 Anhang

Berechnung des Energieverbrauchs

Im Folgenden soll der erforderliche Energieverbrauch für die geschlossene Bauweise (Stollenbau) und die offene Bauweise bzgl. der Kanalerneuerung ermittelt werden, um einen Vergleich dieser Verfahren auch unter diesem Aspekt zu ermöglichen.

Der Vergleich beschränkt sich hier lediglich auf die Bereiche Bodenaushub inklusive Abtransport sowie Lieferung der Verfüllmaterialien und Wiedereinbau. Dabei unberücksichtigt bleiben

u.a. der anfallende Energieverbrauch infolge des Straßenaufbruchs und Wiederherstellung sowie die Verlegung der Rohre. Bei der Ermittlung des Energieverbrauchs muss auf konkrete Erfahrungswerte der bauausführenden Firma zurückgegriffen werden, da es aufgrund der starken Abhängigkeit von den jeweiligen Randbedingungen keine allgemeingültigen Aussagen gibt.

Geschlossene Bauweise:

- Abbau insgesamt gem. Leistungsverzeichnis:
- Abbau mit einem umgebauten Minibagger
- Abbau erfolgte mittels Stemmhammer (0,7 m³ pro Stunde) erreicht wurde.
- Verbrauch des Minibaggers (Motorleistung 14 kW) ca. 2,5 Litern Diesel pro Stunde
- Aushub 1 m³ Löffel; durchschnittliche Baggerleistung von 10 m³ pro Stunde
- Verbrauch Kettenbagger (164 kW) ca. 26 Liter Diesel pro Stunde
- Transport mit 4-achsigen Lkw (Ladevolumen 10 m³) aufweist, abtransportiert
- Deponierung erfolgt in einer Entfernung von 7 km
- Durchschnittlich 40 Liter Diesel pro 100 km für den LKW
- Lieferung Verfüllmaterial (Dämmer) aus einem 60 km entfernten Werk
- Transport erfolgt mittels Silo-Zügen (ca. 15 m³ Dämmer pro Lieferung)
- Verfüllung erfolgt über eine Pumpe, die aber aufgrund des minimalen Energieverbrauchs in der nachfolgenden Berechnung nicht berücksichtigt wird.
- Für den Silo-Lkw wird ebenfalls im Durchschnitt ein Verbrauch von 40 Liter Diesel pro 100 km angesetzt.

Offene Bauweise:

- Lieferung des Verfüllmaterials (nichtbindiger Füllsand) erfolgt über eine Strecke von 7 km und unter Verwendung des vorher beschriebenen 4-achsigen Lkws
- Zusätzliche Kosten bzgl. des Einbaus mittels Bagger und durch Verdichten mit Hilfe einer Rüttelplatte.
- Durchschnittlich zu erzielende Baggerleistung ca. 12 m³ pro Stunde.
- Verbrauch der Rüttelplatte ca. 1,2 Litern pro Stunde; ca. 100 m² pro Stunde Verdichtung möglich werden (0,012 Liter pro m²).
- Tiefe der Baugrube ca. 5,10 m; Rüttelplatte Verdichtungstiefe ca. 0,5 m
- Elf Verdichtungs Vorgänge erforderlich.
- Zur Vereinfachung: Das eingebaute Volumen wird durch die durchschnittliche Tiefe dividiert und die daraus resultierende Fläche mit den elf erforderlichen Verdichtungs Vorgängen multipliziert, um so die vollständig zu verdichtende Fläche zu erhalten.

Bodenaushub	
Geschlossene Bauweise	Offene Bauweise
5.210,00 [m ³]	13.500,00 [m ³]
Minibagger → Abbau: 0,7 m ³ /h Verbrauch: 2,5 l/h → 18.607 Liter (Diesel)	Hydraulikbagger → Abbau: 10 m ³ /h Verbrauch: 26 l/h → 41.210 Liter (Diesel)
Lkw → Abtransport: 10 m ³ /Fahrt Fahrtstrecke: 14 km(Hin u. zurück) Verbrauch: 0,4 l/km → 2.917 Liter (Diesel)	Lkw → Abtransport: 10 m ³ /Fahrt Fahrtstrecke: 14 km(Hin u. zurück) Verbrauch: 0,4 l/km → 8.876 Liter (Diesel)

Tabelle A1: Kraftstoffverbrauch Bodenaushub

Bodeneinbau	
Geschlossene Bauweise	Offene Bauweise
8.020 [m ³]	11.200 [m ³]
Lkw → Lieferung: 15 m ³ /Fahrt Fahrstrecke: 120 km (Hin u. zurück) Verbrauch: 0,4 l/km → 25.664 Liter (Diesel)	Lkw → Lieferung: 10 m ³ /Fahrt Fahrstrecke: 14 km (Hin u. zurück) Verbrauch: 0,4 l/km → 6.272 Liter (Diesel)
	Hydraulikbagger → Einbau: 12 m ³ /h Verbrauch: 26 l/h → 24.267 Liter (Diesel)
	Rüttelplatte → Fläche: 25.235 m ² Verbrauch: 0,012 l/m ² → 303 Liter (Diesel)

Tabelle A2: Kraftstoffverbrauch Bodeneinbau

In dem Vergleich des benötigten Energieverbrauches ist zu erkennen, dass infolge der offenen Bauweise (Summe: 80.928 Liter) mehr Energie benötigt wird als bei der geschlossenen Bauweise (Summe: 47.188 Liter), so dass sich ein Verhältnis von ca. 2:1 ergibt.

13 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Kamarianakis
Vorname: Sissis
Titel: Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing.
Geburtsdatum: 07. Februar 1977
Geburtsort: Herten
Familienstand: ledig

Beruflicher Werdegang:

seit September 2008 Ruhr-Universität Bochum,
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb
Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes

Mai 2007 – August 2008 Ingenieurgemeinschaft Knoke
Niederlassung Bottrop

Januar 2005 – Februar 2005 Planungs- und Ingenieurbüro Hallmann, Bochum

Oktober 2003 – Nov. 2004 Hochtief Construction AG
Abteilung: Market Development & Research, Essen

Studium:

März 2003 – Dezember 2004 Hochschule Bochum,
Fachbereich Wirtschaft
Diplomstudiengang Wirtschaftsingenieurwesen
Abschluss: Dipl.-Wirt.-Ing.

Oktober 1996 – Oktober 2002 Ruhr-Universität Bochum,
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Diplomstudiengang Bauingenieurwesen
Abschluss: Dipl.-Ing.