

Dissertation genehmigt von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2009

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Fritz Gehbauer, M.S.
Institut für Technologie und Management im Baubetrieb
Universität Karlsruhe (TH)

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Universität Karlsruhe (TH)

Ein Entscheidungsunterstützungsmodell für den Rückbau massiver Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Marco Zeiher
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Januar 2009

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Fritz Gehbauer, M.S.
Institut für Technologie und Management im Baubetrieb
Universität Karlsruhe (TH)

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Abteilung Massivbau
Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe 2009

Vorwort des Herausgebers

Der Rückbau von kerntechnischen Anlagen ist eine äußerst komplizierte, ja komplexe Aufgabe. Selbst wenn man sich - wie in der vorgelegten Arbeit - nur auf die Problematik massiver Betonstrukturen beschränkt, ergibt sich eine Fülle von Randbedingungen und Kriterien. Hinzu kommt, dass der Rückbau in der Regel von wenigen spezialisierten Firmen ausgeführt wird. Diese Firmen leben von ihrem Know-how und werden bei Lösungsvorschlägen ihre eigenen Technologien in den Vordergrund stellen und nicht den gesamten Lösungsraum absuchen. Es gibt zwar eine Reihe bekannter Verfahren und Verfahrensschritte, eine durchgängige gemeinsame Wissensbasis ist aber nicht vorhanden. Es kommt hinzu, dass unter den gegenwärtigen politischen Verhältnissen die Pflege von Nachwuchs und der Wissenserhalt problematisch ist. Daher setzt sich Herr Zeiher zum Ziel, ein Wissens- und Entscheidungsmodell für den Rückbau kerntechnischer Anlagen zu entwickeln.

Um sein Modell aufbauen zu können, beschäftigt sich Herr Zeiher grundlegend mit den Entscheidungsmechanismen und Werkzeugen. In der vorgeschlagenen und verwendeten Lösung wird für jedes abzubrechende Bauteil eine Matrix erstellt, die die j-ten Aufgaben mit den i-ten Verfahren verknüpft. Über regelbasiertes Schließen werden ungeeignete Verfahren ausgeschlossen. Stufenweise werden dann mögliche, sinnvolle, dem Systemnutzer genehme und ökonomische Verfahren isoliert. Diese Vorgehensweise bildet zwar keinen neuen Beitrag zur Entscheidungstheorie ist aber im angewendeten Bereich in dieser Form neu. Zu den besonderen eigenen Leistungen gehört auch die Erstellung der eigentlichen Wissensbasis unter Verwendung eines selbst entwickelten Fragebogens und seiner Auswertung. Diese Gesamtheit der möglichen Verfahren und Verfahrenskomponenten ist so vollständig noch nicht beschrieben worden. Aus dieser wissenschaftlichen Basis wird dann eine praxisorientierte Vorgehensweise dargestellt, eine Software hierzu entwickelt und zur Anwendung gebracht. Betreiber von Anlagen und die Spezialfirmen erhalten aus der Arbeit eine Fülle wichtiger Anregungen, ja die Vorgehensweise ist sogar unmittelbar und direkt anwendbar.

Die Arbeit ist praxisorientiert und muss vor diesem Hintergrund an einigen Stellen Vereinfachungen einführen, die für die praktischen Anwendungen erforderlich sind. Im Detail wird eine Fülle von Einflussfaktoren genannt und auch benannt. Nicht immer wird klar, wie diese dann im Anwendungsfall zu quantifizieren sind, außer durch Abschätzungen. Trotzdem wird das Modell, wenn Fachleute sinnvolle Abschätzungen treffen, alleine schon durch die Kombinatorik und Berücksichtigung dieser vielen Einflüsse in einer sinnvollen und strukturierten Weise zu Entscheidungen führen können, die auf solider Basis stehen, weil sie einen größeren Lösungsraum berücksichtigen und die Randbedingungen systematisch erfassen.

Fritz Gehbauer

Vorwort des Verfassers

Den Rahmen dieser am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb der Universität Karlsruhe (TH) entstandenen Arbeit bildete das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG geförderte Projekt *Rückbau kerntechnischer Anlagen - Entwicklung eines Managementmodells für den Rückbau mineralischer Bauteile in kerntechnischen Anlagen*.

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Fritz Gehbauer für die Übernahme des Hauptreferats und das mir entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Er gab mir die Freiheit, meine Ideen nach meinen Vorstellungen zu gestalten und umzusetzen. Ebenso möchte ich an dieser Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski für seine freundliche Unterstützung, sein Interesse an meiner Arbeit sowie für ihre Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats danken.

Die Fertigstellung dieser vorliegenden Arbeit wäre ohne das Engagement und die Mitarbeit zahlreicher Personen nicht möglich gewesen. Mein ganz besonderer Dank gilt hier meinen Mentoren Peter Fritz und Wolfgang Stuber sowie meinen Kollegen Michael Ott, Jürgen Kirsch, Ailke Heidemann-Wunsch und Silke Gutzeit-Hummel für Ihre Unterstützung. Des Weiteren danke ich Peter Novak und Matthias Grube, die bei der Programmierung des Modells mitgewirkt haben. Schließlich möchte ich noch meinen Diplomanden Markus Schönit, Stefan Wittenauer und Stefan Maier danken, die durch ihre Arbeiten wertvolle Beiträge geleistet haben.

In Liebe danke ich meiner Ehefrau Tanja für ihre umfassende Unterstützung sowie für das Verständnis und die große Geduld, die sie mir und meiner Arbeit jederzeit entgegengebracht hat. Gemeinsam mit unseren Kindern Philipp und Kira gab sie mir immer wieder die Energie zur Weiterarbeit an dieser Dissertation. Schließlich danke ich meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglichten und somit einen wichtigen Grundstein für diese Arbeit legten.

Marco Zeiher

Zusammenfassung

Die herrschende Komplexität beim Rückbau von massiven Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen erfordert auf Planungsseite eine sorgfältige Auswahl der Rückbauverfahren und eine detaillierte Ablaufplanung für jedes Bauteil. Den mit einer Rückbautätigkeit betrauten Planern steht zwar ein breites Verfahrensspektrum unterschiedlichster Art zur Verfügung. Jedoch stehen die Planungsingenieure bei der Auswahl der einzelnen Verfahren vor der Entscheidung, welches Verfahren für die unterschiedlichsten Randbedingungen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht, als auch aus Umwelt- und Strahlenschutzgründen das Geeignetste ist.

Des Weiteren kann ein einzelnes Verfahren in der Regel nicht für alle anstehenden Aufgaben genutzt werden, so dass verschiedene Rückbauverfahren zur Anwendung kommen, welche unterschiedliche Prozessparameter besitzen, die bei der Verfahrensauswahl zu berücksichtigen sind. Ebenso sind bauteilspezifisch Rahmenbedingungen unterschiedlichster Art einzuhalten. Es werden deshalb Verfahrenskombinationen oder Subsysteme benötigt, um störende Prozessparameter zu eliminieren oder vorgegebene Randbedingungen einzuhalten.

Die Vernetztheit der verfahrensseitigen Prozessparameter untereinander sowie mit den bauteilspezifischen Anforderungen macht die gleichzeitige Beachtung sehr vieler Details notwendig und bringt es mit sich, viele voneinander abhängige Merkmale betrachten und eine strukturelle Kopplung vornehmen zu müssen. Bisher existiert keine standardisierte komplexe Lösung, die eine effiziente Verfahrensauswahl unter Betrachtung aller möglichen Methoden, Methodenkombinationen und Werkzeuge unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen erreicht und eine erweiterungsfähige Sammlung von Expertenwissen darstellt.

In der vorliegenden Dissertation wird für das oben genannte Problemfeld ein Modell RKA für die effiziente Verfahrensauswahl beim Rückbau von massiven Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen vorgestellt. Dieses Modell besteht aus drei Komponenten: der Anforderungskomponente, der Wissenskomponente und der Entscheidungskomponente.

In der Anforderungskomponente werden alle erforderlichen Daten über die Örtlichkeit, die einzuhaltenden Randbedingungen, die Anforderungen an den Rückbau und die Beton- und Bewehrungsstruktur des Bauteils aufgenommen, so dass erstmalig die Grundvoraussetzungen geschaffen werden, eine Verfahrensauswahl bauteilspezifisch durchzuführen.

Die Wissenskomponente bildet den Rahmen der Erfassung der Daten der Rückbauverfahren. Neben der Beschreibung, für welche Einsatzzwecke welche Verfahren verwendet werden können, erfolgt eine Erläuterung der Vorgehensweise der Datenaufnahme mit der Darstellung, welche Daten der Datenpool zu enthalten hat. Der gesamte Datenpool liefert dabei ein erweiterbares Expertenwissen über alle am Markt vorhandenen Rückbauverfahren.

In der Entscheidungskomponente erfolgt schließlich die Verknüpfung und Verarbeitung der Daten der Anforderungs- und Wissenskomponente, so dass zunächst entschieden werden kann, welche Verfahren sich prinzipiell für den Rückbau des in der Anforderungskomponente beschriebenen Bauteils eignen. Aus dem sich dann ergebenden reduzierten Verfahrenspool wird über einen Suchalgorithmus - je nach Nutzeranforderung - das optimale Verfahren oder die optimale Verfahrenskombination ausgewählt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Genehmigungsverfahren bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen	5
2.1	Stilllegungsvarianten	5
2.1.1	Einführung	5
2.1.2	Sicherer Einschluss (Variante 1)	7
2.1.3	Teilweise Beseitigung mit Resteinschluss (Variante 2)	9
2.1.4	Totale Beseitigung (Variante 3)	9
2.1.5	Vor- und Nachteile der jeweiligen Stilllegungslösung	10
2.2	Genehmigungserfordernis der Stilllegung	11
2.3	Phasen im Genehmigungsverfahren	12
3	Anforderungsanalyse	14
3.1	Anforderungen an das Modell RKA	14
3.2	Mögliche Problemlösungsansätze	15
3.2.1	Operations Research	15
3.2.2	Management Support Systeme	16
3.2.3	Expertensysteme	19
3.2.4	Zusammenfassung	21
3.3	Stand der Forschung	21
4	Das Modell RKA	24
4.1	Überblick	24
4.2	Prinzipieller Aufbau des Modells RKA	25
5	Grundlagen der Entscheidungsmechanismen und -werkzeuge	28
5.1	Grundbegriffe und Merkmale von Systemen	28
5.2	Problemlösungszyklus	30

5.3	Grundlagen der eingesetzten Entscheidungswerkzeuge	32
5.3.1	Regelbasierte Systeme	32
5.3.2	Kombinatorische Optimierung	34
6	Anforderungskomponente	39
6.1	Bauteilabtrag	39
6.2	Abmessung und Lage	40
6.2.1	Lage	40
6.2.2	Abmessung	41
6.2.3	Zugänglichkeit des Bauteils	43
6.3	Betonstruktur	45
6.3.1	Betontyp	46
6.3.2	Bewehrung	46
6.3.3	Stahlzusätze	48
6.3.4	Zusatzfragen	49
6.4	Bearbeitungskriterien	50
6.4.1	Fernbediente Bearbeitung	50
6.4.2	Schutz umliegender Strukturen	52
6.4.3	Vibrationen / Stoßbelastung	52
6.4.4	Bündige Bauteiltrennung	53
6.4.5	Funkenerzeugende Arbeitsmethoden	53
6.4.6	Prozesswasser	53
6.4.7	Staubemissionen	54
6.4.8	Glatte Schnittkanten	55
6.4.9	Trennungsprinzipien der zurückzubauenden Bauteile	56
6.5	Erfassung zusätzlicher Teile	57
6.5.1	Türen und Tore	57
6.5.2	Lichtquellen	58
6.5.3	Medientechnik	59
6.5.4	Lüftungstechnische Einrichtungen	59
6.6	Abweichung vom üblichen Betriebsablauf	60
7	Wissenskomponente	62
7.1	Rückbauverfahren	62
7.1.1	Leistungsspektrum	62
7.1.2	Abmessungen und Gewichte	70
7.1.3	Ökonomische Daten	71
7.1.4	Leistungsdaten	73
7.1.5	Prozessparameter	80
7.2	Subsysteme	82
7.2.1	Bühnen und Gerüste	82
7.2.2	Absauganlagen	86
7.2.3	Wasserrückgewinnungsanlage	88
7.2.4	Abschirmwand	89
7.2.5	Kontaminationsschutzzelte	92

8	Entscheidungskomponente	93
8.1	Generierung einer Eröffnungsmatrix	93
8.2	Regelbasiertes Schließen im Modell RKA	95
8.3	Verfahrensausschluss	98
8.4	Kalkulationstool	104
8.4.1	Rückbau von Metallauskleidungen	104
8.4.2	Dekontamination	108
8.4.3	Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage	109
8.4.4	Betonrückbau	110
8.4.5	Herstellung von Aussparungen	111
8.4.6	Rückbau von Bewehrung	111
8.4.7	Vor Ort Trennung von aktiviertem und nicht aktiviertem Beton	112
8.4.8	Herstellen von Betonkuben	113
8.4.9	Rückbau von Ankerplatten, Schienen und Träger	114
8.4.10	Bündige Trennung eines Bauteils zu bestehenden Gebäudeteilen	116
8.4.11	Erzeugung von glatten Schnittkanten	117
8.4.12	Asbestausbau	117
8.4.13	Überschnitte	118
8.4.14	Erzeugung von Startlöchern	119
8.4.15	Rückbauvolumina und Ausschleusvorgänge	121
8.4.16	Ablaufbedingte Zusatzzeiten	122
8.4.17	Beispielhafte Bestimmung von Zeiten und Leistungsdaten	123
8.4.18	Besonderheiten der Kostenermittlung	127
8.4.19	Zusatzkosten und -zeiten aufgrund erhöhten Filterwechsels . . .	127
8.4.20	Zusatzkosten und -zeiten aufgrund von Zusatzmaßnahmen . . .	128
8.4.21	Kosten von zu errichtenden betrieblichen Einrichtungen	129
8.5	Matrixpartition	130
9	Softwareunterstützung und Auswertung	134
9.1	Iststand und Anforderung	134
9.2	Bereitgestelltes Rückbauverfahrenswissen	138
9.3	Auswertung und Ergebnisse des Modells RKA	143
10	Zusammenfassung und Ausblick	148
	Literaturverzeichnis	150
A	Fragebogen	158
A.1	Bauteilabtrag	158
A.2	Abmessung und Lage des Bauteils	161
A.3	Betonstruktur	164
A.4	Erfassung zusätzlicher Teile	167
A.5	Kriterien für die Bearbeitung	169
A.6	Abweichungen vom üblichen Betriebsablauf	173
A.7	Rückbauziele	175

B	Modifikationen an den Rückbaugerätschaften	176
C	Berechnung zur Bestimmung der Förderleistung bei Absaugsystemen für Beton und Staub	181
C.1	Angaben zur Dimensionierung	181
C.2	Berechnung des Förderleitungsdurchmessers	182
C.3	Druckverlust Förderleitung	182
C.4	Druckverlust im Abscheidebehälter und Feinfilter	183
C.5	Druckverlustverläufe in Abhängigkeit unterschiedlicher Volumenströme und Gutdurchmesser	184
D	Institutsveröffentlichungen	187

Abbildungsverzeichnis

1.1	Restlaufzeiten deutscher Kernkraftwerke	2
2.1	Stilllegungsvarianten der EVU	6
2.2	Zeitlicher Ablauf der Stilllegungsvarianten (Wilting, 1985)	7
2.3	Wichtigste Maßnahmen zum „Sicheren Einschluss“ eines Reaktors (Engelhardt und Müller-Dietsche, 1995)	8
2.4	Wichtigste Maßnahmen zum „Sicheren Einschluss mit Teilabbau“ eines Reaktors (Engelhardt und Müller-Dietsche, 1995)	9
2.5	Phasen des Genehmigungsverfahrens	12
3.1	Systematik der Management-Unterstützung (in Anlehnung an Krallmann u. a. (1997))	17
3.2	Struktur eines Decision Support Systems (Hofacker, 1999)	18
3.3	Aufbau eines klassischen Expertensystems (in Anlehnung an Lenart (1991)). Die Pfeile stellen den Datenfluss dar.	19
3.4	Vergleich der Komponenten von Standardsoftware und Expertensystemen (In Anlehnung an Puppe (1991))	21
4.1	Prinzipieller Aufbau des Modells RKA	27
5.1	Grundbegriffe des Systemdenkens (nach Danezer (2002))	29
5.2	Problemlösungszyklus (in Anlehnung an Danezer (2002))	31
5.3	Regelsetdarstellung im Modell RKA am Beispiel der Verfahrenswahl bei der Aufgabe „Erzeugung von glatten Schnittkanten einer Bauteilseite“	35
5.4	Flussdiagramm zum allgemeinen Branch-and-Bound-Verfahren für ein Minimierungsproblem (in Anlehnung an Burkard (1998))	38
6.1	Prinzipielle Darstellung eines biologischen Schildes mit rückzubauenden Abmessungen	42
6.2	Darstellung der Schleuswege und des bereitgestellten Arbeitsplatzes am Beispiel eines Durchbruches beim Rückbau des Haupt-Waste-Lagers der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe [Quelle: WAK]	43
6.3	Prozentuale Unterteilung der Betonabfallmengen (Geiser u. a., 2002)	45

6.4	Darstellung typischer Bewehrungsdurchmesser und Einbauteile am Beispiel des VEK Außenwandmodells	48
6.5	Beispiel eines Abschirmsteines [Quelle: WAK]	50
6.6	Elimination von Überschritten durch Kernbohrungen	55
6.7	Flussbild zur Tor- / Türabfrage	57
6.8	Beispiel eines fernbedienten Arbeitsplatzes mit Licht- und Medientechnik [Quelle: WAK]	59
7.1	Oberflächendekontamination mit einem Wandshaver-Stapler-System [Quelle: WAK]	65
7.2	Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage mit Hochdruckwasserstrahlen (WOMA, 2004)	66
7.3	Portalgerüst (IfM)	85
7.4	Bild des Saugversuches am TMB (A = Kompakte Seilsägeanlage, B = Staubabsauganlage, C / D = Abgedichtete Schnittfuge mit Moosgummi)	86
7.5	Funktionsweise einer Sauganlage (Wieland, 2001)	88
7.6	Prinzip einer Wasserrückgewinnungsanlage mit Kühlung (in Anlehnung an Rachor (2002))	90
7.7	Abschirmstein (a) und Steingreifer (b) [Quelle: WAK]	90
7.8	Setzvorgang der Abschirmsteine (Quelle: CAD-Animation, Fa. Siempelkamp)	91
7.9	Abschirmung eines Reaktordruckbehälters mit Bleimatten (Pedi, 2001)	91
7.10	Kontaminationsschutzzelt bei Rückbauarbeiten (WAK Werkfoto)	92
8.1	Flussdiagramm zur Spaltenreduktion der Matrix A	94
8.2	Regelset zum Ausschluss von Verfahren bei der Aufgabe „Erzeugung von glatten Schnittkanten“	102
8.3	Vorgehensweise der Zeilenreduktion an der Matrix A	103
8.4	Schnittmuster in „horizontaler“ und „vertikaler“ Anordnung	105
8.5	Schnittmuster in gemischter Anordnung	106
8.6	Bohrlochraster am Beispiel von hydraulischen Spaltgeräten (Lindner, 1982)	119
8.7	Schematische Darstellung des Abbauablaufes	125
9.1	Virtuelle 3D - Ansicht der zu erschließenden Räume und Zellen [Quelle: WAK]	135
9.2	Fragenkatalog der Anforderungskomponente	136
9.3	Darstellung der Wissenskomponente am Beispiel Meißeln	139
A.1	Auswahl Fragenkatalog	158
A.2	Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Bauteilabtrag“ .	160
A.3	Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Abmessung und Lage des Bauteils“	161
A.4	Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Betonstruktur“ .	165
A.5	Eingabemaske Mattenbewehrung	166
A.6	Eingabemaske Rundstahlbewehrung	167

A.7	Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Erfassung zusätzlicher Teile“	169
A.8	Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Kriterien für die Bearbeitung“	170
A.9	Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Abweichungen vom üblichen Betriebsablauf“	173
B.1	Hydraulischer Trennschleifer (WAK)	177
B.2	Fräsen mit Baggeranbaufräse inklusive Staubabsaugung (WAK)	177
B.3	Fernbedienbarer Bagger mit Nibbler (WAK)	178
B.4	Wandshaver mit Absaugung am Stapler (WAK)	178
B.5	Trennschleifer elektrisch geführt mit Manipulator (WAK)	179
B.6	Plasmabrenner geführt mit Manipulator (WAK)	179
B.7	Integrierte Werkzeugablage der Fernhantierungswerkzeuge am Bagger (WAK)	180
B.8	Kreissäge als Fernhantierungswerkzeug am Bagger (MZFR, TopTec)	180
C.1	Mindestluftgeschwindigkeit im Förderrohr in Abhängigkeit des Gutdurchmessers und der Gutdichte	184
C.2	Erforderlicher Rohrdurchmesser in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms und der Luftgeschwindigkeit	185
C.3	Gebälsearbeitspunkt bei einem Luftvolumenstrom von $5400\text{m}^3/h$ in Abhängigkeit der Förderhöhe und der Rohrleitungslänge	186

Tabellenverzeichnis

5.1	Algorithmus der Vorwärtsverkettung (Beierle und Kern-Isberner, 2006)	34
6.1	Inhalte des Fragebogens	40
6.2	Gesteinskörnungen und Zusatzstoffe für Schwer- und Strahlenschutzbetone (Richter, 2002)	47
6.3	Gegenüberstellung der Betonklassifikationen nach alter und neuer DIN 1045	47
6.4	Klassifizierung des Bewehrungsanteils	48
6.5	Klassifizierung der maximal zulässigen Vibrationen / Stoßbelastungen in das Bauwerk	52
6.6	Klassifizierung der Staubbelastung am Arbeitsplatz	54
6.7	Abfragegang zur Lichtquelleninstallation	58
6.8	Abfragegang zur Medientechnikinstallation	60
6.9	Abfragegang zur Lüftungstechnikinstallation	60
7.1	Aufgabenspektrum und prinzipiell einsetzbare Verfahren	64
7.2	Datentabelle Abmessungen und Gewichte der Verfahren	70
7.3	Datentabelle der Investitionskosten	71
7.4	Datentabelle des monatlichen Satzes für Abschreibung und Verzinsung	72
7.5	Datentabelle der monatlichen Gesamtkosten	73
7.6	Eingabetabelle der Schnittleistungsdaten der einzelnen Verfahren	74
7.7	Eingabemaske für die Leistungsdaten bei mittlerem Bewehrungsanteil .	74
7.8	Leistungsänderung bei unterschiedlichen Bewehrungsanteilen	75
7.9	Leistungsänderung bei unterschiedlichen Betonzusätzen	75
7.10	Leistungsminderung bei Überschreitung der wirtschaftlichen Bearbeitungstiefe	76
7.11	Eingabemaske der Dekontaminationstabelle	76
7.12	Eingabemaske der Trennzeiten von Bewehrung der Rückbauverfahrenstypen	77
7.13	Leistungs- und Zeitangaben der Bohrlochherstellung einzelner Verfahren	79
7.14	Verfahrensseitige Anforderungen an die Bohrlochherstellung	79

7.15	Datentabelle des Subsystems Arbeitsbühnen	83
7.16	Datentabelle des Subsystems „Hebebühnen und Gerüste“	84
7.17	Datentabelle des Subsystems „Staubabsauganlage“	87
7.18	Datentabelle des Subsystems „Absauganlage für Beton und Staub“	89
8.1	Liste der Vergleichsoperatoren, die von Regeln und Regelsets verwendet werden	97
8.2	Unterteilung der Verfahren, die ein flächiges Bohrlochmuster bzw. vereinzelte Startlöcher benötigen	120
8.3	Prozesszeiten im Projekt „Durchbruchsherstellung“	124
8.4	Algorithmus zur Matrixpartition	131
8.5	Algorithmus zur Findung der Optimallösung	132
9.1	Abmessungen und Bewehrungsanteil der herzustellenden Durchbrüche	135
9.2	Mögliche Verfahren zur Lösung der Aufgabenstellung	145
9.3	Optimallösungen der Matrixpartition	146
A.1	Abfrageinhalte der Einbauteile	168

Abkürzungsverzeichnis

ALARA	A s L ow A s R easonably A chievable
AR	A rbeits R ichtlinie
AtDeckV	A tomrechtliche D eckungs V erordnung
AtG	A tom G esetz
AtVfV	A tomrechtliche V erfahrens V erordnung
BImSchG	B undes I mmissions S chutz G esetz
BMU	B undesministerium für U mwelt, N aturschutz und R eaktorsicher- heit
DIN	D eutsche I ndustrie N orm
DSS	D ecision- S upport- S ystem
EDV	E lektronische D aten V erarbeitung
EIS	E xecutive I nformations S ystem
EVU	E nergie V ersorgungs U nternehmen
GRS	G esellschaft für A nlagen- und R eaktor S icherheit
KI	K ünstliche I ntelligenz
KNK	K ompakte N atriumgekühlte K ernreaktoranlage
KTA	K ern T echnischer A usschuß
LBO	L andes B au O rdnung
LV	L eistungs V erzeichnis
MIS	M anagement I nformations S ystem
MZFR	M ehr Z weck F orschungs R eaktor
OR	O perations R esearch
QS	Q ualitäts S icherung
RDB	R eaktor D ruck B ehälter
RSK	R eaktor- S icherheits K ommission
SSK	S trahlen- S chutz K ommission
StrlSchV	S trahlen S chutz V erordnung
TBV	T echnische B eschaffungs V orschrift
TLA	T echnische L iefer- und A bnahmebedingung
UVP	U mwelt V erträglichkeits P rüfung
VDEW	V erband d er E lektrizität w irtschaft

VEK **V**erglasungs**E**inrichtung **K**arlsruhe
VPU **V**or**P**rüf**U**nterlage
WAK **W**iederauf**A**rbeitungsanlage **K**arlsruhe
XML **E**Xtensible **M**arkup **L**anguage

1.1 Problemstellung

Am 27. April 2002 trat in Deutschland das neue Atomgesetz in Kraft. Das „Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität“ änderte das seit 1959 geltende „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren“, kurz Atomgesetz (AtG). In den Vordergrund des neuen Atomgesetzes rückte nunmehr der Ausstieg aus der Atomenergienutzung, was die Paragraphen 1 und 7 des Atomgesetzes verdeutlichen. In den Zweckbestimmungen dieses Gesetzes wird unter § 1 Nr. 1 festgelegt, „die Nutzung der Kernenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität geordnet zu beenden und bis zum Zeitpunkt der Beendigung den geordneten Betrieb sicherzustellen“. Für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität und von Anlagen zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe werden daher gemäß § 7 Abs. 1 Satz 2 AtG keine Genehmigungen mehr erteilt.

Damit ergeben sich Restlaufzeiten der einzelnen AKWs zwischen einem und dreizehn Jahren. Auswirkungen hatte diese neue Gesetzgebung zunächst für das Atomkraftwerk Stade, welches 2003 den Betrieb einstellte, gefolgt von Obrigheim im Mai 2005. Die nächsten abzuschaltenden Kraftwerke sind laut Abkommen Biblis A, Neckarwestheim 1 und Brunsbüttel im Jahr 2009. Zudem werden, wie § 7 Abs. 1a i.V.m. Anlage 3 Spalte 3 AtG zeigt, die Strommengen, die die einzelnen Leistungskernkraftwerke noch produzieren dürfen und durften, festgelegt.

Neben den in Betrieb befindlichen Leistungsreaktoren befinden sich in Deutschland 18 Leistungs- und Prototypreaktoren in der Stilllegung, von denen bereits der Heizdampfreaktor Grosswelzheim und der schwerwassermoderierte Druckröhrenreaktor Niederaichbach vollständig abgebaut und aus dem Atomgesetz entlassen wurden. Das Kernkraftwerk Lingen und der Thorium-Hochtemperatur-Reaktor (THTR) in Hamm-Uentrop befinden sich im sicheren Einschluss. Zudem befinden sich sieben Forschungs-



Abbildung 1.1: Restlaufzeiten deutscher Kernkraftwerke

reaktoren in der Stilllegung, bei weiteren 24 Forschungsreaktoren ist die Stilllegung bereits beendet. Von den 11 Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung befinden sich vier Anlagen in der Stilllegung und bei sieben Anlagen ist die Stilllegung bereits abgeschlossen.¹

Weltweit befinden sich derzeit 437 Kernkraftwerke in 31 Ländern in Betrieb, davon in den USA 104, in Frankreich 59 und in Japan 57. 74 % aller in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke sind 20 Jahre und älter, so dass in den nächsten Jahren und Jahrzehnten weltweit eine enormes Potenzial an stillzulegenden und rückzubauenen Kernkraftwerken entsteht. Schon bis Dezember 2006 sind weltweit 123 prototypische oder kommerzielle Kernkraftwerke mit einer Blockleistung von über 5 MWe außer Betrieb genommen worden. (atw Redaktion, 2006) und (atw Redaktion, 2005).

Stilllegungs- und Rückbauvorhaben stellen die Betreiber, Unternehmen und Behörden immer wieder vor neue Herausforderungen technischer und organisatorischer Art. Auf der Planungsseite muss eine sorgfältige Auswahl der Rückbauverfahren und eine detaillierte Ablaufplanung für jedes Objekt bzw. Bauteil getroffen werden. Den mit einer Rückbautätigkeit betrauten Planern steht zwar ein breites Rückbauverfahrensspektrum unterschiedlichster Art zur Verfügung. Jedoch stehen die Planer zum einen bei der Auswahl der einzelnen Verfahren vor der Entscheidung, welches Rückbauverfahren für die jeweils anstehende Aufgabe sowohl aus technischer und wirtschaftlicher Sicht als auch aus Umwelt- und Strahlenschutzgründen das Geeignetste ist, zum anderen haben sie die einzelnen Verfahrens- bzw. Arbeitsschritte so aufeinander abzustimmen, dass ein reibungsloser Ablauf gewährleistet wird.

¹vgl. Auflistung in Betrieb befindlicher und abgeschalteter bzw. in Stilllegung befindlicher Leistungs-, Prototyp- und Forschungsreaktoren sowie von Anlagen der nuklearen Ver- und Entsorgung in Deutschland; Bundesamt für Strahlenschutz, Stand 09/2007

1.2 Zielsetzung

Die Entwicklung eines geeigneten Modells für das Management von Rückbaumaßnahmen in kerntechnischen Anlagen ist eine komplexe Aufgabe, da sich der Rückbau von kerntechnischen Anlagen von dem konventioneller Industriebetriebe unterscheidet. Dies betrifft insbesondere die Anforderungen an die radiologische Überwachung von Kühlwasser und Abwässern, die Personendosimetrie und das Vermeiden unnötiger Kontamination durch Kontaminationsverschleppungen.

Bei der Auswahl der unterschiedlichen Rückbauverfahren muss zwischen mehreren zur Verfügung stehenden Lösungsvarianten entschieden werden. Vor dem Hintergrund, dass die getroffenen Entscheidungen von großer Tragweite sind und ein technisches Versagen zu betriebs- und volkswirtschaftlichen Verlusten oder zu Verlusten der menschlichen Gesundheit, im ungünstigsten Fall eine Fehlentscheidung sogar zu globalen ökologischen Katastrophen führen kann, sind mögliche mit einem Rückbau verbundene Risiken vor Beginn eines Rückbaus im Rahmen einer Bewertung der einzelnen Rückbauverfahren zu minimieren.

Ziel dieser Dissertation ist nun die Entwicklung eines neuen Modells, das eine Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl eines Rückbauverfahrens oder einer Verfahrenskombination einschließlich der eventuell notwendigen Verfahrenssysteme für einzelne rückzubauende massive Bauteile bzw. Objekte aus Beton oder Stahlbeton in einer kerntechnischen Anlage geben soll.² Es soll ein Modell geschaffen werden, das unter Analyse der Randbedingungen der betreffenden Örtlichkeit eine Verknüpfung der planerischen Rahmenbedingungen und der rückbautechnologischen Prozessparameter unter Abgleichung aller möglicher Verfahren, Verfahrenskombinationen und Werkzeuge schafft und durch Eingabe der definierten Daten in der Praxis für die Rückbauproblematik von kerntechnischen Anlagen einsetzbar ist.

Hierfür wird zunächst eine Übersicht aller Methoden und Werkzeuge geschaffen, aus der sich ein entsprechendes Expertenwissen aufbauen lässt. Sodann werden planerische Rahmenbedingungen und verfahrensseitige Prozessparameter durch wissenschaftliche Methoden miteinander verflochten, analysiert und ausgewertet, damit dann die jeweils für das rückzubauenden Bauteil am besten geeigneten Rückbauverfahren festgestellt und ausgewählt werden können. Durch die Verwendung eines solchen Modells wird die Planngeeffizienz bei der Abarbeitung komplexer Rückbauvorhaben erhöht. Zudem soll den Planern durch die sukzessive Betrachtung einzelner Bauteile beim Rückbau der gesamten Anlage ermöglicht werden, die Rahmenbedingungen ähnlich gestalteter Bauteile zu identifizieren und somit Synergieeffekte für die Gesamtanlage oder idealerweise für alle Anlagen des Energieversorgungsunternehmens nutzen zu können.

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Forschungsprojektes *Rückbau von mineralischen Strukturen in kerntechnischen Anlagen* entstanden. Das Projekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

²Dabei sind der Rohrleitungsbau sowie die gesamten Stahlkonstruktionen, welche zu den betrieblichen Einrichtungsgegenständen einer kerntechnischen Anlage gehören, nicht Gegenstand der Betrachtung.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in zehn Teile gegliedert, wobei sich folgender Ablauf ergibt: In Kapitel 2 wird zunächst ein Überblick über die unterschiedlichen Rückbaustrategien, welche in der Bundesrepublik Deutschland zur Anwendung kommen, gegeben. Im anschließenden Kapitel 3 werden Kriterien hergeleitet, die ein Modell in diesem Bereich sinnvollerweise erfüllen muss. Die möglichen Modellierungsansätze werden diskutiert und ihre Vor- und Nachteile erörtert. Kapitel 4 gibt einen Überblick über das Modell RKA und beschreibt dessen prinzipiellen Aufbau, ehe in Kapitel 5 die Grundlagen der im Modell RKA eingesetzten Entscheidungsmechanismen und -werkzeuge vorgestellt werden. Kapitel 6 bis 8 beschreibt das eigentliche Modell RKA. Dabei werden zunächst die Anforderungen an den Rückbau sowie die gegebenen Randbedingungen erfasst (Kapitel 6). Im Anschluss daran wird in der Wissenskomponente beschrieben, welche verfahrensseitigen Daten aufzunehmen und weiterzuverarbeiten sind. In der Entscheidungskomponente (Kapitel 8) wird schließlich die Verknüpfung und Verarbeitung der Daten der Anforderungs- und Wissenskomponente detailliert beschrieben. Kapitel 9 zeigt die softwaretechnische Umsetzung des Modells RKA anhand eines Beispiels. Die dabei erzielten Ergebnisse werden ausgewertet und interpretiert. Im abschließenden Kapitel 10 wird die Arbeit kurz zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Erweiterungen und Entwicklungen gegeben.

Genehmigungsverfahren bei der Stilllegung kerntechnischer Anlagen

2.1 Stilllegungsvarianten

2.1.1 Einführung

Wie alle industriellen Anlagen müssen auch kerntechnische Anlagen nach Ende ihrer Betriebszeit stillgelegt und rückgebaut werden. Im Gegensatz zu vielen industriellen Anlagen gestaltet sich der Verlauf der Stilllegung und des Rückbaus bei kerntechnischen Anlagen weitaus schwieriger, da die Anlage bis zum Erreichen des Rückbauzieles in einem für die umgebende Umwelt sicheren Zustand gehalten werden muss.

Hinzu kommt, dass am 14. Juni 2000 zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen (EVU) beschlossen wurde, die Nutzung der noch bestehenden Kernkraftwerke zu befristen. Ein vorzeitiger Ausstieg Deutschlands aus der Atomenergie ist somit beschlossen. Das hat zur Folge, dass die Stilllegung und der Rückbau verschiedenster Kernkraftwerke parallel zu planen sind und nicht oder nur in bedingtem Maße auf Erfahrungen bereits abgeschlossener Rückbauvorhaben zurückgegriffen werden kann.

Bei der Stilllegung und dem Rückbau von kerntechnischen Anlagen liegen den deutschen EVU gemäß der VDEW Studie drei mögliche Varianten vor (Abbildung 2.1) (Watzel, 1981):

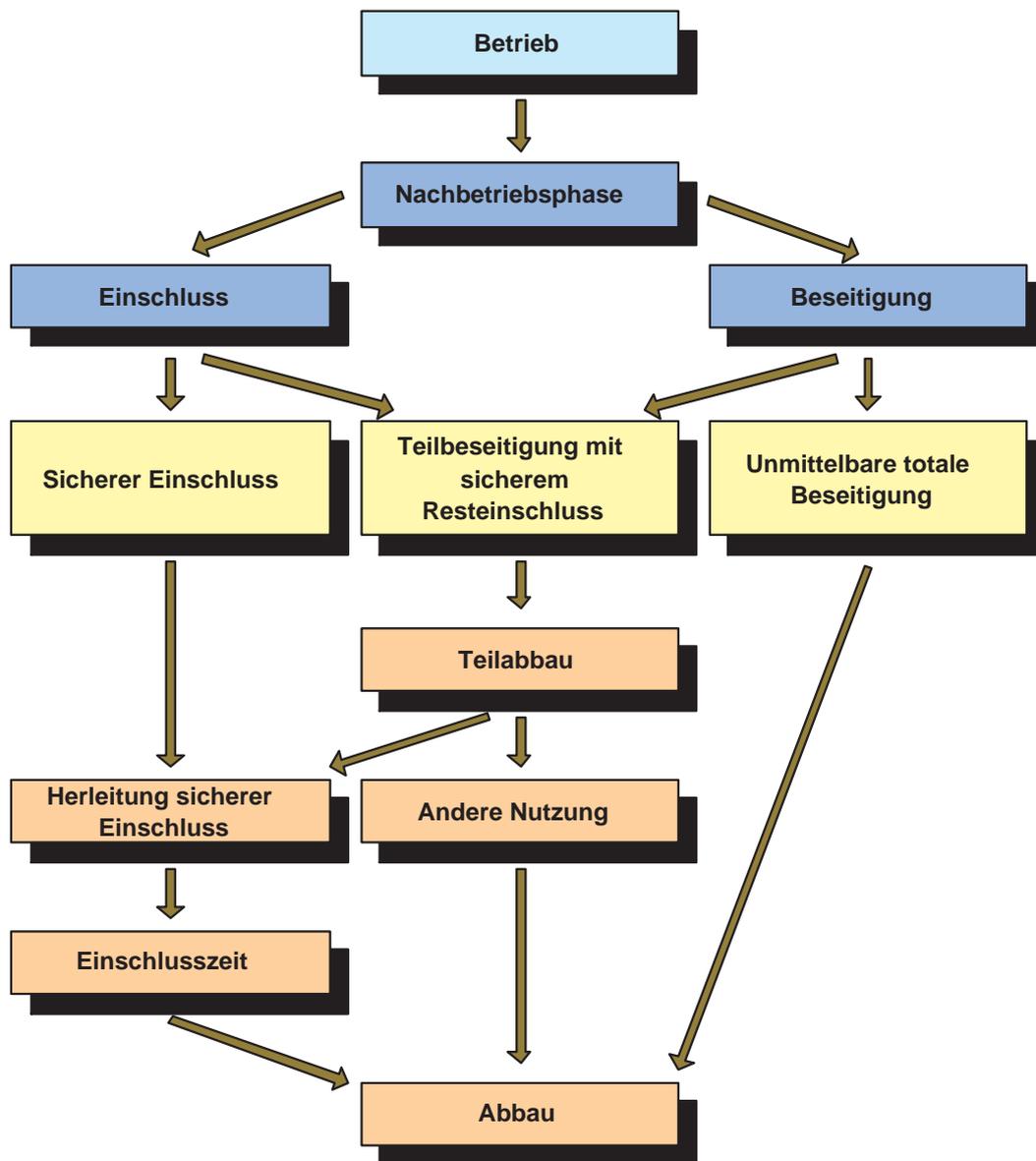


Abbildung 2.1: Stilllegungsvarianten der EVU

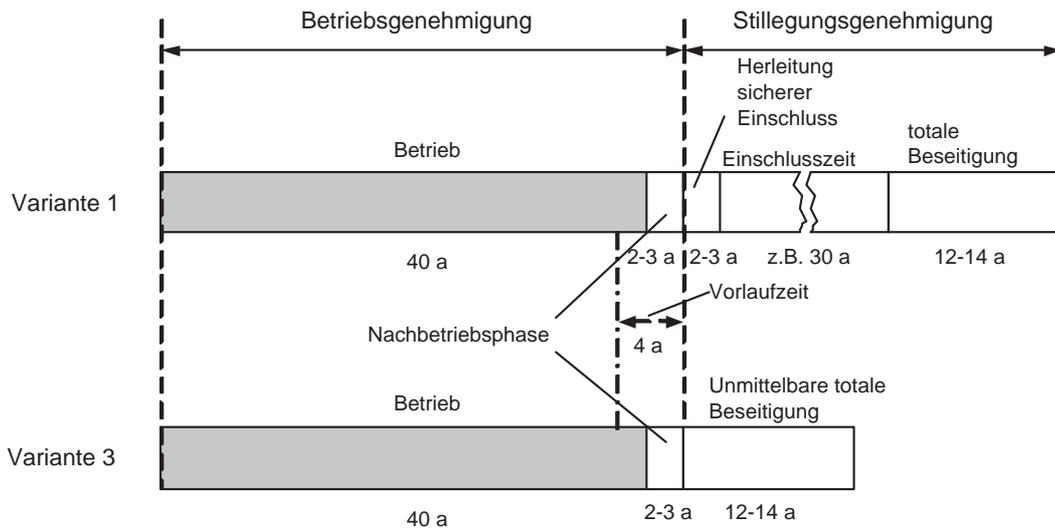


Abbildung 2.2: Zeitlicher Ablauf der Stilllegungsvarianten (Wilting, 1985)

Jede der drei Varianten, nämlich

1. der sichere Einschluss
2. die teilweise Beseitigung mit Resteinschluss und
3. die totale Beseitigung

kann entweder für sich als eine endgültige Art der Stilllegung betrachtet werden oder es wird in einer zeitlichen Abfolge von einer Variante zur nächsten übergegangen.

Wie aus den Abbildungen 2.1 und 2.2 ersichtlich, folgt nach Beendigung des Betriebs, also nach der endgültigen Abschaltung der kerntechnischen Anlage, die Nachbetriebsphase. Diese stellt den Übergang von der endgültigen Außerbetriebnahme zum Beginn des Rückbaus dar. In dieser Phase, die noch im Rahmen der Betriebsgenehmigung abläuft, werden in den Kernkraftwerken die Brennelemente abtransportiert. Im Rahmen der Betriebsgenehmigung der nuklearen Anlagen werden die Betriebsmedien und -abfälle (Filtereinsätze, Schlämme, Konzentrate, etc.) entsorgt. Der Zeitbedarf hierfür wird im Wesentlichen durch den Abtransport der Brennelemente aus der Anlage bestimmt und liegt in der Regel zwischen 24 und 36 Monaten. Nach der entsprechenden behördlichen Freigabe werden in dieser Phase auch nicht mehr benötigte Anlagen und Systeme außer Betrieb genommen.

Die Variante 2 - Teilweise Beseitigung mit Resteinschluss - kann in ihrem Ablauf als Kombination der beiden anderen Varianten betrachtet werden, so dass auf diese Variante aus zeitlicher Sicht nicht weiter eingegangen wird. In Abbildung 2.2 ist der prinzipielle Ablauf der Stilllegungsvarianten 1 und 3 dargestellt.

2.1.2 Sicherer Einschluss (Variante 1)

Bei der Variante 1 - Sicherer Einschluss - muss die Anlage zunächst in den sicheren Einschluss überführt werden. Ziel ist, das verbleibende Radioaktivitätsinventar mit möglichst geringem Aufwand ohne sofortiger Demontage der Anlage sicher einzuschließen. Zur Überführung der Anlage in den sicheren Einschluss, die gemäß § 7 Abs. 3 AtG

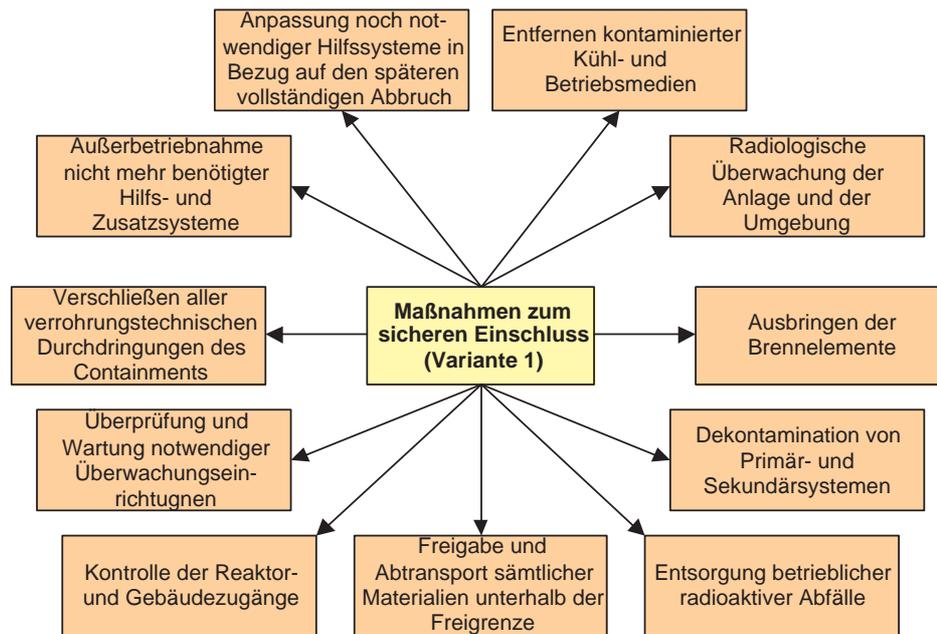


Abbildung 2.3: Wichtigste Maßnahmen zum „Sicheren Einschluss“ eines Reaktors (Engelhardt und Müller-Dietsche, 1995)

genehmigungspflichtig ist, werden alle Systeme und Komponenten innerhalb bestimmter Gebäudebereiche entleert, mit Chemikalien gespült und nach außen hin dicht verschlossen. Dabei werden flüssige und gasförmige radioaktive Medien entfernt und dem Zwischen- bzw. Endlager zugeführt (vgl. Abbildung 2.3). Die in den kerntechnischen Anlagen verbleibende Radioaktivität liegt sodann nur noch in fester Form vor. Weiterhin müssen Maßnahmen gegen unbefugtes Eindringen in die Anlage realisiert und ein radiologisches Überwachungsprogramm durchgeführt werden. Der sichere Einschluss garantiert eine langfristige, gefahrlose Verwahrung des noch in der Anlage verbleibenden Aktivitätsinventars und gewährleistet den Schutz von Menschen und Umwelt vor unzulässiger Strahlenexposition. Die eingeschlossene Anlage wird von einer zentralen Meldestelle aus überwacht und regelmäßig zu Kontroll- und Inspektionszwecken begangen.

Wenn die Herleitungsmaßnahmen zur Erreichung des Status „Sicherer Einschluss“ abgeschlossen sind, beginnt die Phase „Einschlusszeit“. Für die Dauer dieser Phase werden auch die Anlagenteile konserviert, die für einen späteren Rückbau oder Teilrückbau (Übergang in Stilllegungsvarianten 2 und 3) benötigt werden. Während der Einschlusszeit vermindert sich das in der Anlage noch befindliche Radioaktivitätsinventar durch den natürlichen Zerfall der Nuklide. Am Ende der Einschlusszeit erfolgt die totale Beseitigung aller Gebäude und Einrichtungen des Sperr- und Kontrollbereichs. Die Einschlusszeit kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt beendet werden.

Als optimale Einschlusszeit werden 30 Jahre von der Abschaltung eines Kernkraftwerkes bis zum Beginn der Totalbeseitigung angegeben. Nach dieser Zeit tritt der aktivitätsmäßig bedeutsame Gammastrahler Kobalt 60, der eine Halbwertszeit von 5,3 Jahren hat, bei einer üblichen Reaktorbetriebszeit von 17 bis 40 Jahren in seiner radiologischen, für die Personalstrahlenbelastung maßgebenden Bedeutung gegenüber dem Betastrahler Nickel 63 zurück. Da Nickel 63 jedoch eine Halbwertszeit von 100

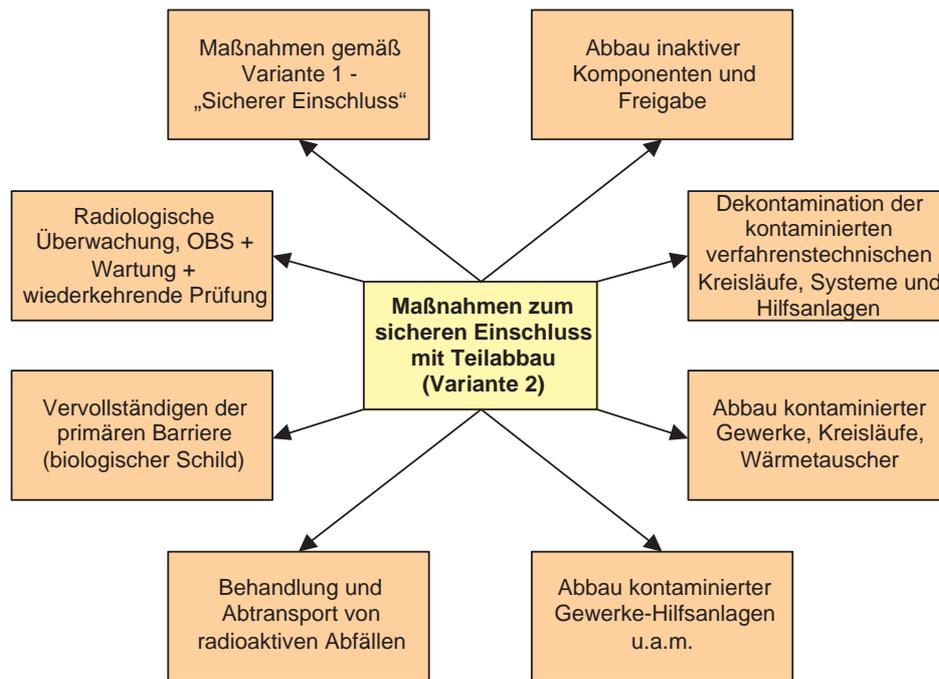


Abbildung 2.4: Wichtigste Maßnahmen zum „Sicheren Einschluss mit Teilabbau“ eines Reaktors (Engelhardt und Müller-Dietsche, 1995)

Jahren hat, wird seine Aktivitätsabnahme durch Zerfall nicht berücksichtigt. Ein vollständig manuell gesteuerter Rückbau kann deshalb nicht durchgeführt werden, da die vorhandene hohe Strahlenbelastung nur einen fernbedienten Rückbau erlaubt. (Watzel, 1981)(Engelhardt und Müller-Dietsche, 1995).

2.1.3 Teilweise Beseitigung mit Resteinschluss (Variante 2)

Gegenüber der Variante 1 - Sicherer Einschluss - wird bei dieser Variante der Abbau der Anlage deutlich erweitert. Abgebaut wird hierbei das gesamte kontaminierte Gewerk mit den internen verfahrenstechnischen Kreisläufen, Wärmetauschern/Dampferzeugern und einem sehr großen Teil der Hilfsanlagen. Nicht abgebaut wird der biologische Schild und alles, was sich innerhalb des biologischen Schildes befindet (Reaktordruckbehälter nebst Einbauten, thermischer Schild und weitere Zusatzeinrichtungen), also alles, was einer sehr intensiven Neutronenbestrahlung ausgesetzt war.

Durch die in Abbildung 2.4 dargestellten Maßnahmen wird der Reaktor faktisch im biologischen Schild eingeschlossen und die primäre Kontaminationsbarriere erheblich eingegrenzt. Die Reststruktur der Anlage kann somit anderen Nutzungen zugeführt werden.

2.1.4 Totale Beseitigung (Variante 3)

Die totale Beseitigung der Anlage meint einen Abbau bis zur „grünen Wiese“ bzw. eine uneingeschränkte Nutzung des Grundstückes mit oder ohne der Nutzung von Reststrukturen des Gebäudes.

Variante 3 geht dabei von der unmittelbaren totalen Beseitigung der Anlage im An-

schluss an die Nachbetriebsphase aus, d.h. mit dem Abbau aller Systeme, Einrichtungen und Gebäudeteilen des Sperr- und Kontrollbereichs wird sofort begonnen. Zu Beginn der Demontagearbeiten sind alle betrieblichen Einrichtungen noch betriebsbereit, so dass bei dieser Variante die Einrichtungen direkt für den Abbau genutzt werden können und Neueinrichtungen sowie Umrüstmaßnahmen weniger aufwendig sind als beim Abbau nach dem sicheren Einschluss. Mangels langer Abklingzeit ist bei dieser Variante von einer höheren Strahlenexposition des Rückbaupersonals auszugehen.

2.1.5 Vor- und Nachteile der jeweiligen Stilllegungslösung

Der Betreiber einer kerntechnischen Anlage entscheidet, welche Variante für den Rückbau ausgeführt wird. Dazu sind die Vor- und Nachteile jeder Variante abzuwägen. Bei der Wahl der Variante 3 „sofortiger Rückbau“ ergeben sich gegenüber den anderen Varianten folgende Vorteile:

- Die Weiterbeschäftigung des sach- und anlagenkundigen Personals ist gewährleistet. Damit verbunden ist der Verbleib des Know-how in der Anlage, so dass eine fehlende oder unzureichende Dokumentation von Anlagenteilen kompensiert werden kann.
- Das Gelände kann in einer schnelleren Zeit einer Neunutzung zugeführt werden. Ebenso ist die Infrastruktur für eine Neunutzung vorhanden und muss nicht, wie bei Variante 1, über eine lange Zeit kostenintensiv instand gehalten werden.
- Die Investitionskosten für den sicheren Einschluss und dessen Überwachung über mehrere Jahrzehnte entfallen.
- Es muss keine kostenintensive Reaktivierung von Sicherheitseinrichtung, Transporttechniken, Lüftungsanlagen etc. durchgeführt werden. Ebenso entfallen alle Tätigkeiten und Kosten, um die Anlage mit ihren sämtlichen Nebengebäuden auf den dann vorherrschenden Stand der Technik zu bringen.

Gegenüber den beiden anderen Varianten bestehen bei der Variante 3 folgende Nachteile:

- Als entscheidender Nachteil ist die nach der Nachbetriebsphase vorhandene hohe Strahlenbelastung zu nennen.
- Durch die erreichten niedrigen Dosisleistungen bei Variante 1 ergibt sich ein Einsparpotenzial in der Menge des endzulagernden Materials, welches nicht so kostenintensiv verpackt und endgelagert werden muss.
- Während der Einschlusszeit bei Variante 1 ist es möglich, dass neue und bessere Rückbauverfahren entwickelt werden, so dass der Rückbau sicherer und zeitsparender erfolgen könnte.
- Das momentan in Deutschland fehlende Endlager zwingt die Betreiber dazu, die aktivierten und kontaminierten Abfälle kostenintensiv in neu zu erstellende Zwischenlager zu lagern.

- Eine zu geringe Rücklagenbildung für den Rückbau der Anlage kann die Betreiber zwingen, die Anlage in den Zustand des sicheren Einschlusses zu überführen.

Für welche Stilllegungsvariante sich der Betreiber einer kerntechnischen Anlage entscheidet, ist von vielen Einzelfragen abhängig, so dass es unmöglich ist, eine Stilllegungsvariante zu präferieren. Es existiert also keine Standard-Stilllegungsvariante, welche für alle kerntechnischen Anlagen eingesetzt werden kann.

2.2 Genehmigungserfordernis der Stilllegung

Die Planungsarbeiten für den Abbau beginnen bereits während des Betriebes. Zunächst benötigen die Betreiber einer kerntechnischen Anlage gemäß § 7 Abs. 1 Satz 1 und Abs. 3 des Atomgesetzes eine Genehmigung für die Stilllegung, den sicheren Einschluss und den Rückbau der Anlage oder Anlagenteile. Eine solche Genehmigung ist bei der zuständigen Genehmigungsbehörde zu beantragen.¹

Wenn eine umfassende und vollziehbare Stilllegungsgenehmigung nach § 7 AtG vorliegt, ist für die völlige Beseitigung mit einer Durchführungszeit von 6 - 9 Jahren nach der Außerbetriebnahme des Reaktors zu rechnen.

Der Abbau der Anlage erfolgt in den folgenden Stufen:

- Demontage und Beseitigung der kontaminierten Systeme und Komponenten außerhalb des Reaktordruckbehälters (RDB)
- Demontage und Beseitigung der aktivierten Einbauten des RDB
- Demontage des RDB
- Abbruch des aktivierten Teils des biologischen Schildes
- Rückbau der Stahlkonstruktionen
- Dekontamination der Gebäude
- Freimessung und Freigabe der Gebäude
- konventioneller Abbruch der Gebäudestrukturen

Ziel aller Varianten ist die - aus radiologischer Sicht - unbeschränkte Freigabe des Standorts und seiner gegebenenfalls noch verbleibenden Einrichtungen. Der Standort unterliegt nach dem Rückbau nicht mehr dem Atomrecht. (Wilting, 1985) (Engelhardt und Müller-Dietsche, 1995) (Watzel, 1981) (Eickelpasch, 1999)

¹Zum prinzipielle Ablauf des Genehmigungsverfahrens siehe (Kurz und Baumgärtel, 1994), (Berberich, 1996), (Thierfeldt, 2000).

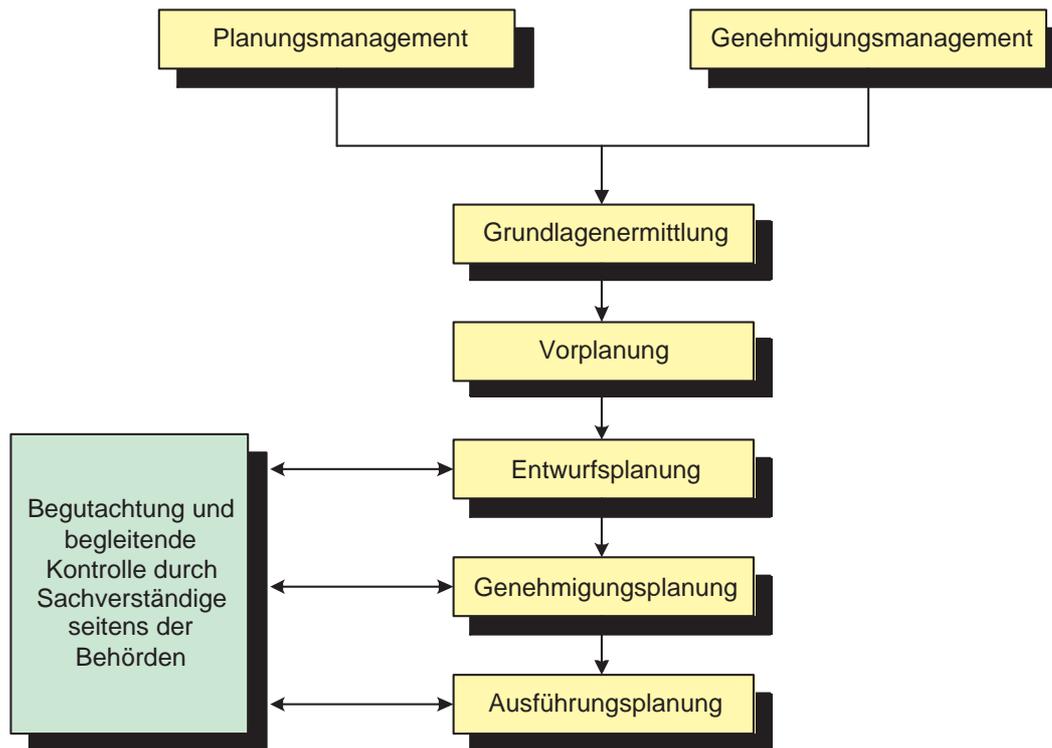


Abbildung 2.5: Phasen des Genehmigungsverfahrens

2.3 Phasen im Genehmigungsverfahren

Um den technischen, wirtschaftlichen und genehmigungstechnischen Belangen und Erfordernissen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen gerecht zu werden, empfiehlt es sich unabhängig von der Anlagengröße für die Planung des Genehmigungsverfahrens verschiedene Planungsphasen einzuführen, die von einem Planungs- und Genehmigungsmanagement gesteuert werden.

Die einzelnen Phasen für die Planung des Genehmigungsverfahrens sind in Abbildung 2.5 aufgeführt und im folgenden kurz erläutert.

Aufgabe des Planungsmanagements ist ausgehend von der Aufnahme des Ist-Zustandes die Ausarbeitung eines technischen Stilllegungskonzepts und der anfallenden spezifischen Unterlagen im Rückbauverlauf sowie die Festlegung der einzelnen Planungsschritte. Dabei werden die einzuhaltenden Schutzziele, Gesetze, Regeln etc. vom Genehmigungsmanagement vorgegeben und überprüft. Das Genehmigungsmanagement erarbeitet im Hinblick auf das Herunterfahren der Betriebsgenehmigung und das Hochfahren des Stilllegungsverfahrens Vorgaben für die betreffenden Betriebsabteilungen und Stilllegungsprojektteams.

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wird der Gegenstand des Genehmigungsantrags definiert und anhand der Errichtungsunterlagen von einem Expertenteam unterschiedlicher Fakultäten mit Unterstützung des Genehmigungsmanagements Stilllegungsstrategien entwickelt und Stilllegungsschritte festgelegt. Planungsaufgaben sind in dieser Phase u.a. die Untersuchung der unterschiedlichen Stilllegungsvarianten und Klärung der Aufgabenstellung nach der Festlegung der Stilllegungsvariante, die Ermittlung einer für den Reaktor optimalen Strategie sowie die Überprüfung der Sicherheits-

anforderungen. Zur Unterstützung dieser Aufgaben kann das zu entwickelnde Modell eingesetzt werden.

Auch in der Phase der Vorplanung kann das neue Modell Anwendung finden. Zunächst wird nach Abstimmung der planerischen Randbedingungen und Zielvorstellungen ein Planungskonzept erstellt und ein Soll-Ist-Vergleich der radiologischen und baulichen Zustände vorgenommen, bevor dann ein Einsatz des neuen Modells bei der Untersuchung der Termine und Kosten sowie unterschiedlicher Lösungsmöglichkeiten in Bezug auf grundsätzliche unterschiedliche Anforderungen erfolgen kann.

Im Rahmen der Entwurfsplanung von der Erarbeitung der einzelnen Konzepte unter Berücksichtigung aller sachspezifischen Anforderungen und der von den Fakultäten bisher erarbeiteten Beiträge bis zum vollständigen Entwurf eines Gesamtkonzepts sowie bei der Kostenermittlung und -zusammenstellung der Stilllegungsmaßnahmen kann das neue Modell ebenfalls eingesetzt werden.

In der Genehmigungsplanung werden dann die erforderlichen Unterlagen erstellt. Das sind der Sicherheitsbericht, ergänzende Pläne, Zeichnungen und Beschreibungen der Anlage, Angaben über Schutzmaßnahmen gem. §7 Abs. 2 Nr. 5 AtG, Zuverlässigkeits- und Sachkundenachweise, Sicherheitsspezifikationen, der Nachweis über die Vorsorge der Erfüllung der gesetzlichen Schadensersatzverpflichtungen, Angaben über sonstige Umweltauswirkungen des Vorhabens, Zulassungsentscheidungen nach § 7 Abs. 2 Nr. 6 AtG, Entscheidungen und Vorschriften über Naturschutz und Landschaftspflege, die Beschreibung der anfallenden radioaktiven Reststoffe sowie Angaben über vorgesehene Maßnahmen zur Vermeidung des Anfalls von radioaktiven Reststoffen. Mit einzureichen ist u.a. auch eine Übersicht über die wichtigsten, vom Antragsteller geprüften technischen Verfahrensalternativen einschließlich der Angabe der wesentlichen Auswahlgründe, soweit diese Angabe für die Beurteilung der Zulässigkeit des Vorhabens nach § 7 AtG bedeutsam sein kann. Diese Übersicht kann auch durch das neue Modell unterstützt werden.

Nach Einreichung der Genehmigungsunterlagen bei der Genehmigungsbehörde wird mit der Ausführungsplanung begonnen. Die technischen Vorgaben für die Ausführungsplanung beruhen auf den Ergebnissen der Entwurfs- und Genehmigungsplanung. Zunächst werden vom Planungsteam die Herstellungs- und Fertigungsverfahren sowie die Montage-/Demontagereihenfolge festgelegt. Die dabei zusätzlich benötigten Komponenten und Bauteile müssen dimensioniert und die zugehörigen Werkstoffe ausgewählt werden. Auch hierfür kann das neue Modell Anwendung finden.

Es folgt seitens der zuständigen Behörde eine Prüfung der eingereichten Unterlagen daraufhin, ob die nach dem Stand der Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Stilllegung der Anlage getroffen ist, insbesondere im Hinblick auf die Sicherheit der Bevölkerung, die Sicherheit der Anlage und des Betriebes, den Schutz der Anlage gegen Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter.

Dieser Begutachtung durch die Landesbehörde folgt eine Durchführung der begleitenden Kontrolle durch die beauftragten Sachverständigen unter staatlicher Aufsicht. Die begleitende Kontrolle umfasst die Vorprüfung, die Werkstoff-, Bau- und Druckprüfung sowie die Abnahme- und Funktionsprüfung.

In diesem Kapitel wird untersucht, welche Anforderungen an ein System bzw. ein Modell gestellt werden, das für die Rückbauproblematik von kerntechnischen Anlagen eingesetzt werden kann. Anschließend wird geprüft, welche Lösungsansätze denkbar sind und welche Vor- und Nachteile mit ihnen verbunden sind.

Den Abschluss der Anforderungsanalyse bildet die Betrachtung des Standes der Forschung beim Rückbau von massiven Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen.

3.1 Anforderungen an das Modell RKA

Wie aus Kapitel 2 ersichtlich, stellt die Rückbauplanung, also die Planung der einzusetzenden Rückbauverfahren, nur einen - wenn auch wichtigen - Teilaspekt aller Tätigkeiten während des Gesamtrückbaus der kerntechnischen Anlage dar. Ein Modell für die effektive Auswahl der Rückbauverfahren sollte über folgende Eigenschaften verfügen:

- Es sollte möglich sein, mit Hilfe des Modells eine effiziente Zuordnung des Rückbauverfahrens zu den zurück zubauenden Bauteilen in einer kerntechnischen Anlage durchzuführen.
- Die Entscheidungskomponente sollte zunächst in einem ersten Schritt alle Rückbauverfahren, die aufgrund der Anforderungen aus technischen Gründen nicht verwendet werden können, ausschließen.
- Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungsarten muss die Entscheidungskomponente in diesem ersten Schritt diejenigen Rückbauverfahren auswählen, die auf jeden Fall zur Anwendung kommen müssen.
- Die Entscheidungskomponente soll eigenständig Kombinationen der Rückbauverfahren bilden, so dass ein Gesamtrückbau des betrachteten Bauteils möglich ist.
- Von der Entscheidungskomponente sollen die gebildeten Kombinationen nach unterschiedlichen Gesichtspunkten, wie z.B. Zeit und Kosten, hin überprüft werden,

so dass, je nach vorgegebenem Ziel, eine optimale Gesamtlösung erreicht werden kann.

- Die Entscheidungskomponente sollte möglichst Wissen bezüglich schon durchgeführter Projekte in die Entscheidung mit einfließen lassen.
- Nach Projektdurchführung soll es möglich sein, die daraus gewonnenen Daten für neue Projekte zu verwenden, so dass in einem iterativen Prozess die Datenbasis verbessert werden kann.

3.2 Mögliche Problemlösungsansätze

3.2.1 Operations Research

Unter Operations Research (OR) wird allgemein die Entwicklung und der Einsatz quantitativer Modelle und Methoden zur Entscheidungsunterstützung verstanden. Mit Operations Research Methoden lassen sich komplexe reale Probleme strukturiert analysieren, erfassen und modellieren, so dass eine möglichst optimale Lösung ermittelt und gefunden werden kann (Werners, 2006). Der gesamte OR-Prozess in einem soziotechnischen System, wie z.B. einem Unternehmen, gliedert sich in 14 Komponenten, wobei es im ersten Teil des Prozesses, der die Komponenten 1 bis 9 beinhaltet, darum geht, das Problem zu identifizieren, zu formulieren und zu analysieren. Schließlich werden ein Modell oder mehrere Modelle konstruiert (Müller-Merbach, 1982). Im Anschluss seien die ersten neun Komponenten kurz dargestellt: Zunächst wird das Problem identifiziert und formuliert (Komponente 1). Hierzu gibt es zahlreiche Methoden, die beispielsweise bei Pfohl (1977) und Müller-Merbach (1982) zu finden sind. In jeder Organisation existieren unveränderliche aufbauorganisatorische beziehungsweise ablauforganisatorische Rahmen. Die Komponenten 2 und 3 bilden deshalb die Analyse der Aufbau- und der Ablauforganisation. Innerhalb dieser Rahmen besteht oftmals die Möglichkeit einer Änderung. Da die meisten Probleme nur einen Teil der Organisation betreffen, ist es bei der Modellbildung wichtig, diesen Teil der Organisation präzise zu beschreiben. Hierbei geht es um die Festlegung, welches die relevanten Systemelemente sind, welche relevanten Attribute diese besitzen und welche Beziehungen zwischen ihnen bestehen (Komponente 4). Die fünfte Komponente befasst sich mit der Analyse der Ziele und der Festlegung der Entscheidungskriterien. Hierbei müssen Ziele formuliert und daraus verbindliche Entscheidungskriterien hergeleitet werden. An die Komponente 5 schließt sich die Komponente 6, Analyse und Entwicklungsprognose der Systemumwelt, an. Für die modellgestützte Entscheidungsvorbereitung ist es erforderlich, die möglichen Auswirkungen für die Systemumwelt vorher zu sagen. Hierbei kann das Risiko der Entscheidung deutlich herausgearbeitet beziehungsweise teilweise sogar quantifiziert werden. Die Komponente 7 beinhaltet den Entwurf von Entscheidungsalternativen. OR-Methoden können nur Entscheidungen vorbereiten, nicht aber Kriterien oder Klassifizierungen treffen, nach denen die beste mögliche Lösung gefunden werden kann. Die zu bewertenden Entscheidungen und Alternativen müssen zunächst formuliert werden. Die Komponente 8, die Modellkonstruktion, steht in enger Beziehung zu den Komponenten 4 bis 7. In Komponente 8 werden ein oder mehrere mathematische

Modelle konstruiert. Den Abschluss dieses ersten Teiles des OR-Prozesses bildet die Komponente 9, die Datenbeschaffung, die Organisation und die Qualitätsbeurteilung von Daten.

Die Komponenten 10 bis 12 bilden den 2. Teil des OR-Prozesses, die mathematischen Operationen am Modell. Zunächst wird in Komponente 10 die Auswahl und/oder der Entwurf von Algorithmen festgelegt. Hierzu können prinzipiell heuristische Algorithmen (Näherungsverfahren) und Standardalgorithmen (exakte Verfahren) unterschieden werden. Exakte Verfahren sind allerdings nur bei gut strukturierten Modellen mit überschaubaren Problemgrößen möglich. Unter Näherungsverfahren werden solche Verfahren verstanden, die zwar die gesuchte Lösung nicht garantieren, dafür aber mit geringeren Rechenzeiten auskommen. Nach der Wahl der Algorithmen schließt sich die Auswahl und der Entwurf von EDV-Programmen (Komponente 11) an. Mit der Komponente 12, der Modellrechnung, schließt der 2. Teil des OR-Prozesses ab. In dieser Komponente können beispielsweise verschiedene Entscheidungskriterien (Komponente 5) getestet werden.

Den Abschluss und 3. Teil des OR-Prozesses bilden die Komponenten 13 und 14. Die Komponente 13 beinhaltet die Interpretation der am Modell gefundenen Ergebnisse. Idealerweise können diese Ergebnisse durch ein EDV-Programm in eine solche Form gebracht werden, dass eine Ergebnisinterpretation erleichtert wird. Für die Nutzer des EDV-Programms sollte sich ein „mentaler Erfolg“ einstellen, indem sie das gefundene Ergebnis nachvollziehen und begreifen können, denn nur so können sie sich mit dem gefundenen Ergebnis identifizieren und das Modell auch akzeptieren. Die Komponente 14, die Implementation des oder der Ergebnisse, schließt den gesamten OR-Prozess ab. Das akzeptierte Modell wird aktiv in den Entscheidungsvorbereitungsprozess aufgenommen.

Die 14 Komponenten des OR-Prozesses bilden eine Einheit. Je nach Problemtyp kommt den einzelnen Komponenten eine unterschiedliche Gewichtung zu, so dass einzelne Komponenten nicht berücksichtigt werden brauchen.

Prinzipiell besteht die Möglichkeit, das Rückbaumanagement mit Hilfe eines ganzheitlichen OR-Modells zu unterstützen und ein eigenes Lösungsverfahren zu entwickeln. Aufgrund der unterschiedlichen und mit dem Zeitablauf sich ändernden Anforderungen an die Rückbauverfahren erscheint es jedoch schwierig, ein solches Gesamtmodell zu entwickeln. Der Einsatz von OR-Modellen für Teilaufgaben der Rückbauplanung (z.B. Zuschnittsoptimierung für eine effiziente Verpackung) ist jedoch sinnvoll. Diese Modelle werden in der Gesamtarchitektur eingebettet und bei Bedarf abgerufen. Bei dieser Vorgehensweise besteht der Vorteil einer offenen Modellarchitektur, so dass bei Systemerweiterungen zusätzliche OR-Modelle in der Gesamtarchitektur integriert werden können.

3.2.2 Management Support Systeme

Management Support Systeme bzw. Managementunterstützungs-Systeme (MUS) sind EDV-Systeme, welche Führungskräfte und Entscheidungsträger durch den kombinierten Einsatz von Kommunikations- und Informationstechnologien bei ihrer Arbeit unterstützen. Sie können nach Mertens (2001) prinzipiell in Management Information

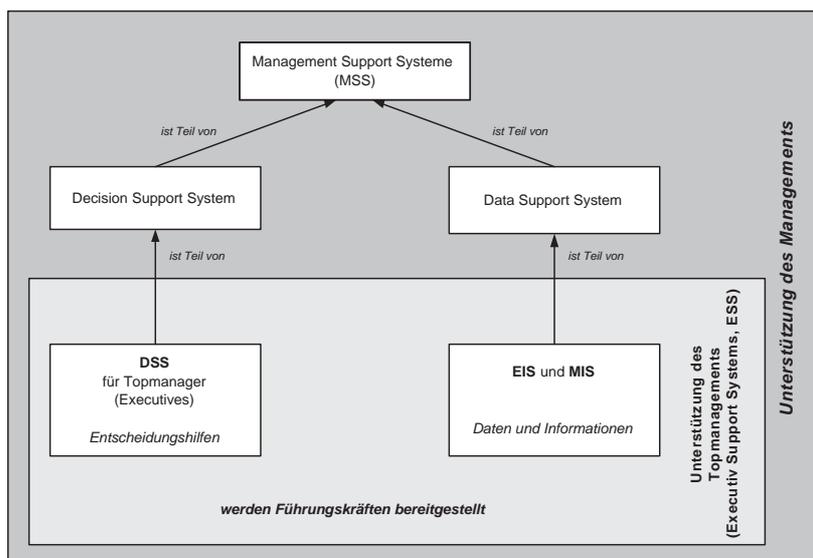


Abbildung 3.1: Systematik der Management-Unterstützung (in Anlehnung an Krallmann u. a. (1997))

Systems (MIS), Executive Informations Systems (EIS) und Decision Support Systems (DSS) eingeordnet werden (vgl. Abbildung 3.1). Nach Werner (1992, S.31f.) sind „die Hauptfunktionen dieser Systeme zum einen die Versorgung mit entscheidungsrelevanten (Führungs-) Informationen, zum anderen die weitergehende Unterstützung im Problemlösungsprozess durch geeignete Planungs- und Entscheidungshilfen“.

Den einen Teil der Management Support Systeme bildet das Data Support System, dessen Teile aus den Management Information Systems (MIS) und den Executive Information Systems (EIS) besteht. Auf Ebene des Data Support werden die Führungskräfte primär durch Daten unterstützt. Den anderen Teil der Management Support Systeme bilden die Decision Support Systems, auch entscheidungsunterstützende Systeme (EUS), auf deren Ebene die Entscheidungshilfe im Vordergrund steht (Krallmann u. a., 1997, S.150). Executiv Support Systems (ESS) bilden eine Synthese aus EIS und DSS, wobei sich die Gestaltung der Ergebnispräsentation an die EIS anlehnt und bei der Datenverarbeitung die Modelle bzw. die Methoden der DSS verwendet werden. (Turban und Aronson, 1998)

Management Information Systems (MIS)

Die Management Informationssysteme stellen dem Unternehmen auf verschiedenen Hierarchiestufen Informationen zur Verfügung, die für die Entscheidungsträger relevant sind und diese bei ihren Entscheidungen unterstützen. Die benötigten Informationen werden aus einer Datenbasis ohne aufwendige Modellbildung und logisch-algorithmischer Bearbeitung extrahiert und bestehen vorwiegend aus (standardisierten) Berichten (Gluchowski u. a., 1997, S.152). In MIS sind einfache Prognosefunktionen sowie What if- und How to achieve-Analysen implementiert. Bei einer What if- Analyse können Auswirkungen von Variationen bestimmter Entscheidungsvariablen auf die Zielgrößen untersucht werden. Eine How to achieve-Analyse geht entsprechend von einem gegebenen Anspruchsniveau der betrachteten Ziele aus und versucht, Werte für die

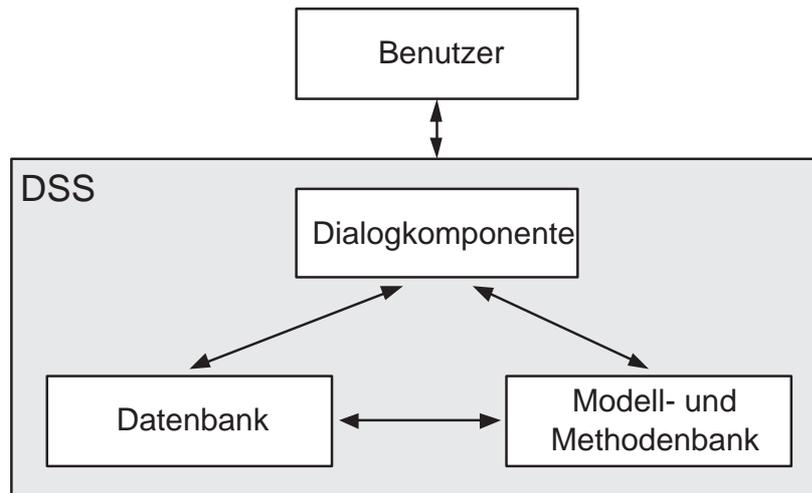


Abbildung 3.2: Struktur eines Decision Support Systems (Hofacker, 1999)

Entscheidungsvariablen zu ermitteln, die eine Zielerreichung gewährleisten. (Vetschera, 1995, S.40f.) Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die MIS im wesentlichen die Problemerkennung und -diagnose unterstützt. Da die dort eingesetzten Methoden sehr einfach sind, sind sie zur Bewältigung von unstrukturierten Entscheidungsproblemen nicht geeignet (Hofacker, 1999, S.65).

Executive Informations Systems (EIS)

Executive Informations Systeme dienen der obersten Führungsebene zur Beschreibung der Unternehmenssituation und unterstützen diese bei der Identifizierung und Diagnose strategischer Problemstellungen (Walls u. a., 1992). Die Funktionen der Executive Informations Systems entsprechen im Wesentlichen der MIS. Ein wesentlicher Unterschied zu den MIS besteht darin, dass in den EIS Informationen aus unterschiedlichen funktionalen Bereichen integriert werden (Turban und Aronson, 1998, S.413), da das Unternehmen im Rahmen strategischer Entscheidungen als Ganzes betrachtet wird. Darüber hinaus werden noch zusätzliche externe Informationen integriert (Hofacker, 1999, S.65).

Decision Support Systeme (DSS)

Mit Decision Support Systemen (DSS) werden Entscheidungsträger unterschiedlicher Führungsebenen in einem interaktiven Prozess bei der Lösung von unstrukturierten und/oder schlecht strukturierten Entscheidungsproblemen unterstützt (Vetschera, 1995). Automatisiert werden soll der Entscheidungsprozess mit den DSS daher nicht.

Charakteristisch für Decision Support Systeme ist die ausgeprägte Methoden- und Modellorientierung zur Lösungsfindung (Gluchowski u. a., 1997, S.168). Die Modellbildung, die Auswahl von Methoden und die dafür benötigte Datenbasis erfolgt über eine Dialogkomponente. Die Struktur eines DSS zeigt Abbildung 3.2.

Ein Decision Support System ist kein generelles, allumfassendes Problemlösungswerkzeug, es stehen vielmehr (Teil-)Aufgaben eines übergeordneten Problemlösungsprozesses im Vordergrund (Werner, 1992). Ziel des Einsatzes von DSS ist nicht die

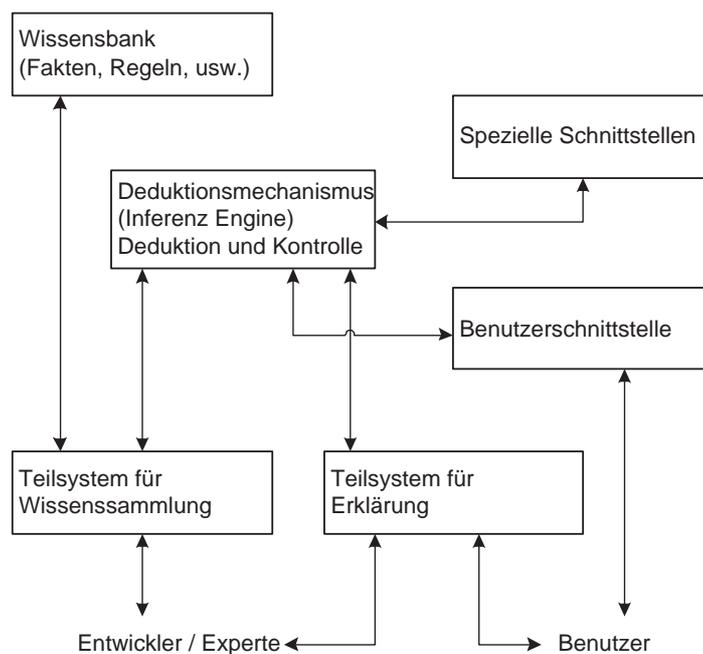


Abbildung 3.3: Aufbau eines klassischen Expertensystems (in Anlehnung an Lenart (1991)). Die Pfeile stellen den Datenfluss dar.

Verbesserung der Effizienz, sondern die Steigerung der Effektivität. (Krallmann u. a., 1997) (Keen und Scott Morton, 1978)

Unter den Management Support Systemen sind Decision Support Systeme zur Entscheidungsunterstützung am geeignetsten, um das Management bei der Auswahl geeigneter Verfahren beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zu unterstützen. Sie finden ihren Einsatz bei der Lösung von Teilaufgaben von schlecht strukturierten Entscheidungssituationen.

3.2.3 Expertensysteme

Expertensysteme können dem Fachgebiet der künstlichen Intelligenz (KI) zugeordnet werden. Nach Kurbel (1989) ist ein Expertensystem „ein Programm, das in einem eng abgegrenzten Anwendungsbereich die spezifischen Problemlösungsfähigkeiten eines menschlichen Experten erreicht oder übertrifft.“

Ein Expertensystem hat als Ziel das Wissen und die Erfahrung menschlicher Experten über ein spezielles, beschränktes Gebiet zusammenzufassen, zu speichern und es dann zu benutzen, um Aufgaben in diesem Wissensbereich zu lösen bzw. den Benutzer bei der Lösung des Problems zu unterstützen und ihm das Wissen bereitzustellen. Somit kann das spezifisch Wissen eines Experten einem Nutzerkreis zugänglich gemacht und durch Hinzunahme mehrerer Experten erweitert werden (Lenart, 1991).

Die wesentlichen Bestandteile eines Expertensystems sind die Wissensbank, der Inferenz- bzw. Kontrollmechanismus und der Arbeitsspeicher (Lenart, 1991, S.55). Den prinzipiellen Aufbau eines Expertensystems verdeutlicht Abbildung 3.3.

Wissensbank

Die Wissensbank oder Wissensquelle speichert die vom Experten gesammelten Fakten und das heuristische Wissen ab und stellt sie dem System sowie dem Benutzer des Systems zur Verfügung. Diese Daten werden in Datenbanken oder XML-Dateien abgelegt.

Teilsystem für Wissenssammlung

In dieser Komponente wird das Wissen und die Regeln zur Verknüpfung der Fakten eingegeben. Die gesammelten Daten werden in der Wissensbank abgelegt.

Deduktionsmechanismus

Der Deduktionsmechanismus beziehungsweise der „Schlussfolgerungsmechanismus“ dient der Wissensauswertung. Hier werden Fakten über vorgegebene Regeln miteinander verknüpft, um so zu Schlussfolgerungen und Ergebnissen zu kommen. Dabei gibt es grundsätzlich zwei Ausweitungsstrategien: die Vorwärtsverkettung, bei welcher der Benutzer Fakten eingibt und die Inferenzmaschine diese anschließend auf einen Zusammenhang hin überprüft, und die Rückwärtsverkettung, bei der eine Frage eingegeben wird und danach untersucht wird, ob es Fakten und Regeln gibt, mit denen diese Behauptung bewiesen werden kann.

Teilsystem für Erklärung

Das Teilsystem für Erklärung liefert Informationen über das Zustandekommen der Lösung. Damit ist auch die Erklärungsfähigkeit im Expertensystem gegeben.

Spezielle Schnittstellen

Über diese Schnittstellen ist es dem Expertensystem z.B. möglich, mit anderen Systemen zu kommunizieren oder gegebenenfalls Wissen/Entscheidungen anderer Komponenten abzufragen.

Benutzerschnittstelle

Die Benutzerschnittstelle bietet dem Benutzer die Möglichkeit, mit dem System zu interagieren, Wissen abzufragen oder Probleme einzugeben bzw. deren Lösung zu erhalten.

Ein Expertensystem unterscheidet sich von einer Standardsoftware zum einen dadurch, dass beim Expertensystem das, was bei der Standardsoftware Algorithmen darstellt, in Wissen und Problemlösungsstrategien bzw. Regeln aufgeteilt ist (vgl. hierzu Abbildung 3.4) (Puppe, 1991). Zum anderen unterscheiden sie sich darin, dass Experten fest in den Entwicklungsprozess miteinbezogen werden. Um ein Expertensystem zu entwickeln, muss also zunächst das Wissen formalisiert, in einem EDV-System repräsentiert und gemäß der Problemlösungsstrategie manipuliert werden.

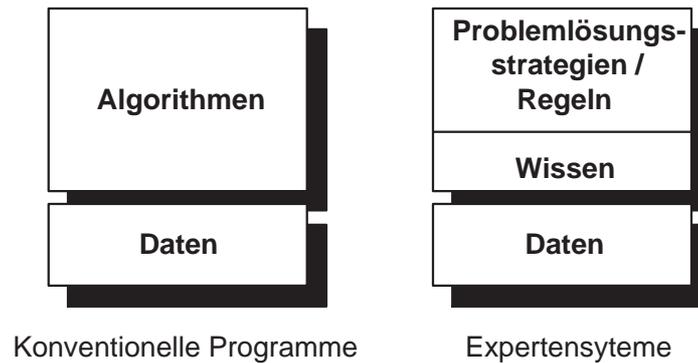


Abbildung 3.4: Vergleich der Komponenten von Standardsoftware und Expertensystemen (In Anlehnung an Puppe (1991))

Expertensysteme bieten eine geeignete Plattform, um die Entscheidungsträger bei der Verfahrensauswahl für den Rückbau von kerntechnischen Anlagen zu unterstützen. Mit der Benutzerschnittstelle, die in Form eines Fragenkataloges vorliegen sollte, können die Randbedingungen und Erfordernisse, die beim Rückbau einzuhalten und zu beachten sind, eingegeben werden. In der Wissensbank wird das Wissen über die unterschiedlichen Rückbauverfahren abgelegt. Schließlich lässt sich mit dem Deduktionsmechanismus eine Vorabauswahl technisch geeigneter Verfahren treffen. Die Wissenverarbeitung, die in Expertensystemen durch Regeln erfolgt, muss noch durch Modelle und Algorithmen des Operations Research erweitert werden, so dass nicht nur eine Lösung zur technischen Realisierbarkeit gefunden wird, sondern auch ein Bezug zum Zeit- und Kostenbedarf etc. geschaffen werden kann.

3.2.4 Zusammenfassung

Jeder der genannten Teilbereiche kann einen wichtigen Beitrag für einen effizienten Rückbau von kerntechnischen Anlagen leisten. Ein größtmöglicher Nutzen wird durch eine Kombination dieser Systeme erreicht. Experten- und Decision Support Systeme stellen eine optimale Plattform dar, um die Anforderungen an einen Rückbau aufzunehmen. Diese Anforderungskomponente wird mithilfe eines standardisierten Fragenkatalogs aufgenommen. Ebenso kann eine Wissensbank implementiert werden, in der die Daten der Rückbauverfahren aufgenommen werden können (Wissenskomponente). Die Entscheidung über die bestmögliche Lösung erfolgt in der Entscheidungskomponente, in der Regeln von Expertensystemen und Modelle des Operations Research zur Anwendung kommen.

3.3 Stand der Forschung

In diesem Kapitel soll der Stand der Forschung hinsichtlich des Rückbaus von massiven Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen und hinsichtlich der Unterstützungssysteme zur Rückbauverfahrensauswahl erläutert werden.

Als Standardwerk für den Rückbau von Betonstrukturen ist das Buch „Abbrucharbeiten“ von Lippok (2004) zu nennen. Hierin wird beschrieben, welche Verfahren und

Werkzeuge für Abbrucharbeiten existieren. Es ist als praxisorientiertes Arbeitsbuch zu verstehen, mit dessen Hilfe eine Planung von Abbrucharbeiten unter sicherheitstechnischen, rechtlichen und technischen Anforderungen durchgeführt werden kann.

Im Zusammenhang mit dem Rückbau von kerntechnischen Anlagen beschreiben Bach u. a. (2005), Thierfeldt (2000), Bach u. a. (2000) und Bach (1995) Dekontaminations- und Rückbauverfahren für die maschinentechnischen Einrichtungen und den Beton. Hierbei werden die einzelnen Verfahren und Werkzeuge nach Einsatzmöglichkeiten beschrieben und praktische Einsatzbeispiele aufgezeigt.

Bayliss und Langley (2003) beschreiben, ähnlich wie Bach (1995), hinsichtlich ihres prinzipiellen Anwendungsgebietes unterschiedliche Dekontaminations- und Rückbauverfahren für den Rückbau von kerntechnischen Einrichtungen, Stählen und Beton.

Die Technical Reports der Internationalen Atomenergiebehörde beschreiben ebenfalls die unterschiedlichen Möglichkeiten der Dekontamination von kerntechnischen Anlagen (No.365, 1994), der Managementplanung der Dekontamination von Forschungsreaktoren (No.351, 1993) und den Einsatz von Manipulatoren beim kerntechnischen Rückbau (No.348, 1993).

Schreck (1998) untersucht unterschiedliche Demontageverfahren für die Komponentendemontage und -zerlegung von Einrichtungsgegenständen in kerntechnischen Anlagen. Darüber hinaus werden unterschiedliche Handhabungstechniken zum fernbedienten Einsatz dieser Verfahren aufgezeigt. Des Weiteren werden Hinweise gegeben, nach welchen Kriterien diese Verfahren bewertet werden sollen. Ein bewertender Vergleich der Rückbauverfahren erfolgt, wie bei den anderen Literaturstellen, jedoch nicht.

Eine Softwarelösung für die Rückbauplanung von kerntechnischen Anlagen ist von der Fa. NIS Ingenieure auf dem Markt. Hierbei handelt es sich um ein Projektplanungs- und Überwachungssystem für die Stilllegung kerntechnischer Anlagen mit dem Namen CORA-CALCOM, mit dem die Planung von Stilllegungsprojekten, die Ermittlung von Kosten, der Personalaufwand, die Strahlenbelastung des Personals und die Komponentenerfassung mit integrierter Abfallentsorgungsplanung ermöglicht wird. Das System eignet sich für die Konzeptentwicklung, Benchmark-Vergleiche, Sensitivanalysen und für Soll-Ist-Vergleiche im Rahmen der Projektplanung und -überwachung (Auler, 2006). Eine Betrachtung bzw. Auswahl von Rückbauverfahren erfolgt in der Software jedoch nicht.

Insgesamt sind die genannten Literaturquellen nur bedingt auf das in dieser Arbeit beschriebene Problemfeld übertragbar. Dafür sind folgende Gründe verantwortlich:

- Es wird lediglich aufgezeigt, mit welchen Verfahren und Werkzeugen die unterschiedlichen Materialien bearbeitet werden können, ohne auf die Randbedingungen der betreffenden Örtlichkeiten in dem Sinne einzugehen, dass eine Verknüpfung der planerischen Rahmenbedingungen und der rückbautechnologischen Prozessparameter erfolgt.
- Es gibt weder eine Übersicht aller Verfahren und Werkzeuge noch wird ein bewertender Vergleich dieser durchgeführt.
- Es erfolgt keine Betrachtung, mit welchen Verfahrenskombinationen der gesamte Rückbau eines Bauteils durchgeführt werden kann.

- Es existiert keine standardisierte Lösung in Form einer Software, mit deren Hilfe das Expertenwissen von Einzelnen gesammelt und erweitert werden kann.

4.1 Überblick

Im folgenden wird der Aufbau des Modells RKA detailliert erläutert. Es handelt sich hierbei um ein praktisches Modell, dessen Erstellung mit wissenschaftlichen Methoden durchgeführt ist. Mit diesem Modell werden die Randbedingungen der zu bearbeitenden Bauteile analysiert und die planerischen Rahmenbedingungen und rückbautechnologischen Prozessparameter verknüpft, um die für die zurückzubauenden Bauteile am besten geeigneten Rückbauverfahren bzw. -verfahrenskombinationen zu finden. Praktisch umsetzbar und beliebig erweiter- und veränderbar ist das Modell durch Eingabe der definierten Daten. Das Modell besteht aus folgenden Komponenten:

Die Anforderungskomponente: In dieser Komponente werden alle Daten bzgl. der Anforderungen an den Rückbau des betreffenden Bauteils einer kerntechnischen Anlage mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens¹ erfasst. Des weiteren werden Daten, die das Bauteil betreffen, gesammelt.

Die Wissenskomponente: In der Wissenskomponente wird die Vorgehensweise der Datenaufnahme beschrieben und zum einen zusammengestellt, welche Daten aufzunehmen sind, zum anderen dargestellt, für welche Einsatzzwecke welche Verfahren verwendet werden können. Die Wissenskomponente sieht vor, es den Systemnutzern zu ermöglichen, die Daten der einzelnen Verfahren detailliert einzusehen und bei Weiter- oder Neuentwicklungen von Verfahren Daten zu ändern oder neue Datensätze anzulegen.

Die Entscheidungskomponente: Die Entscheidungskomponente enthält Mechanismen, die auf der Basis der gesammelten Daten der Anforderungskomponente die geeigneten Rückbauverfahren beziehungsweise Kombinationen der Rückbauverfahren in Abhängigkeit der jeweils gesetzten Ziele ermittelt. Somit werden den Rückbauplanern Vorschläge optimaler Verfahren zur Verfügung gestellt.

¹vgl. Anhang A

Die Verknüpfung der Komponenten untereinander erfolgt mittels geeigneter Schnittstellen. Die Entscheidungskomponente nutzt dabei die zentrale Datenbasis der Wissenskomponente und verknüpft diese mit der Anforderungskomponente. Die Anforderungskomponente bildet die Schnittstelle zum Nutzer.

Die Kapitel 4 bis 8 sind wie folgt gegliedert: Für ein besseres Verständnis der Einzelkomponenten wird in Kapitel 4 zunächst ein Überblick über das Gesamtsystem gegeben. Kapitel 5 befasst sich mit den Grundlagen der eingesetzten Entscheidungsmechanismen und Werkzeuge. Der Aufbau der Anforderungskomponente wird in Kapitel 6 gezeigt. Im Anschluss daran wird in Kapitel 7 auf die zugrunde liegende Datenbasis eingegangen. In Kapitel 8 wird das Zusammenspiel der Komponenten beschrieben.

4.2 Prinzipieller Aufbau des Modells RKA

Die herrschende Komplexität beim Rückbau von mineralischen Strukturen in kerntechnischen Anlagen erfordert auf Planungsseite eine sorgfältige Auswahl der Rückbauverfahren und eine detaillierte Ablaufplanung für jedes Objekt bzw. Bauteil. Den mit einer Rückbautätigkeit betrauten Planern steht zwar ein breites Spektrum an Rückbauverfahren zur Verfügung. Jedoch stehen die Planer bei der Auswahl der einzelnen Verfahren vor der Entscheidung, welches Verfahren für die jeweils anstehende Aufgabe sowohl aus technischer und wirtschaftlicher Sicht als auch aus Umwelt- und Strahlenschutzgründen das Geeignetste ist. Des weiteren haben sie die einzelnen Verfahrensbzw. Arbeitsschritte so aufeinander abzustimmen, dass ein reibungsloser Ablauf gewährleistet wird.

In der Regel kann ein einzelnes Verfahren nicht als alleiniges Verfahren für alle anstehenden Aufgaben genutzt werden, so dass verschiedene Rückbauverfahren zur Anwendung kommen, welche unterschiedliche Prozessparameter besitzen, die bei der Verfahrensauswahl zu berücksichtigen sind. Ebenso sind objekt- bzw. bauteilspezifisch Rahmenbedingungen unterschiedlichster Art einzuhalten. Es werden deshalb Kombinationen der Verfahren oder Subsysteme dieser benötigt, um störende Prozessparameter zu eliminieren oder vorgegebene Randbedingungen einzuhalten.

Aus den vorstehend genannten Gründen wurde das Modell RKA entwickelt. Hierbei werden bauteilspezifisch Rückbauverfahren oder -kombinationen einschließlich eventuell notwendiger Verfahrenssubsysteme in kerntechnischen Anlagen betrachtet und die jeweils besten Lösungsvarianten aufgezeigt. Dabei werden planerische Rahmenbedingungen und rückbautechnologische Prozessparameter miteinander verflochten, analysiert und ausgewertet. Die Verwendung eines solchen Managementmodells ermöglicht es den Planern somit, die Effektivität bei der Abwicklung von komplexen Rückbauvorhaben zu erhöhen. Den prinzipiellen Aufbau des Modells RKA zeigt Abbildung 4.1.

Grundlage für die Auswahl der Verfahren ist ein Fragenkatalog (Anforderungskomponente), in dem das betrachtete Bauteil untersucht wird. Untersuchungsgegenstand ist dabei zunächst das Bauteil selbst (Betonstruktur, Abmessung und Lage des Bauteils, etc.). Des weiteren werden die Anforderungen an den Rückbau festgelegt und Festlegungen getroffen, wie das Bauteil abzutragen ist. Anforderungen in diesem Sinne sind die Emissionsverringerung bzw. -vermeidung eines Verfahrens, die Prozesswassermini-

mierung, die fernbediente Bearbeitung eines Bauteils etc, also die technischen Kriterien, die an den Rückbau gestellt werden. Schließlich können noch Angaben bezüglich zusätzlicher Hilfseinrichtungen gemacht werden. In dieser Komponente werden auch die Ziele definiert, nach denen die Rückbauverfahren auszuwählen sind. Diese Ziele sind z.B. die Optimierung der Endlager-Volumina, die Reduzierung von Rückbauzeiten und -kosten (vgl. Kapitel 6).

Die Wissenskomponente bildet den Rahmen zur Erfassung der Daten der Rückbauverfahren. In dieser Komponente des Modells soll das Wissen über die unterschiedlichsten Rückbauverfahren aufgenommen werden. Zunächst wird das Leistungsspektrum der Verfahren, d.h. für welche Einsatzzwecke das Verfahren verwendet werden kann, abgebildet. Dann folgt die Darstellung der Vorgehensweise der Datenaufnahme z.B. der ökonomischen Daten, Abmessungen und Gewichte, Prozessparameter, etc. (vgl. hierzu das Kapitel 7).

Die Verknüpfung der Daten aus der Wissenskomponente mit den Angaben aus der Anforderungskomponente erfolgt in der Entscheidungskomponente. Hier werden zunächst alle Verfahren, die aus technischen Gründen nicht für den Bauteilrückbau geeignet sind, ausgeschlossen. Je nach Anforderungsprofil werden anschließend Verfahren oder Kombinationen von Verfahren gebildet, mit Hilfe derer es möglich ist, alle Anforderungen an den Rückbau zu erfüllen. Aus diesem Pool der möglichen Rückbauverfahren bzw. -kombinationen werden mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus, je nach den von den Systemnutzern verfolgten Ziele, die geeignetsten Verfahren herausgefiltert, so dass ein effizienter Rückbau eingeleitet werden kann (vgl. hierzu das Kapitel 8).

Mit dem Modell RKA ist es in der Planungsphase damit möglich, schnell und flexibel auf Variationen der Randbedingungen zu reagieren, da sich durch Änderung einzelner Daten in der Anforderungskomponente (z.B. eine sich ergebende Änderung der Ortsdosisleistung durch z.B. ergänzende Messungen oder genauere Messmethoden) schnell und zuverlässig neue Verfahren oder Verfahrenskombinationen oder Änderungen im Endergebnis hinsichtlich der Ziele (Zeit, Kosten, etc.) ergeben. Somit ist das Modell RKA während der Planungsphase für unerwartete planungsseitige Änderungen der Randbedingungen und auch der Zielfunktionen einsetzbar.

Verfahrensseitig wird das sich ergebende Risiko beim Rückbau durch den definierten Ausschlussprozess in der Wissenskomponente reduziert. In diesem Prozess scheiden alle Verfahren aus, die nicht den Anforderungen des Rückbaus entsprechen. Durch Variation der Anforderungen (Prozesswasser, Staubbildung, Funkenflug, etc.) können sich andere Lösungen ergeben, so dass planungsseitig durch die Anforderungsvariation unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt werden können. Durch die offene Systemarchitektur ist es dem Nutzer zusätzlich möglich, flexibel auf Verfahrensneu- oder -weiterentwicklungen zu reagieren und die Daten ins System einzugeben.

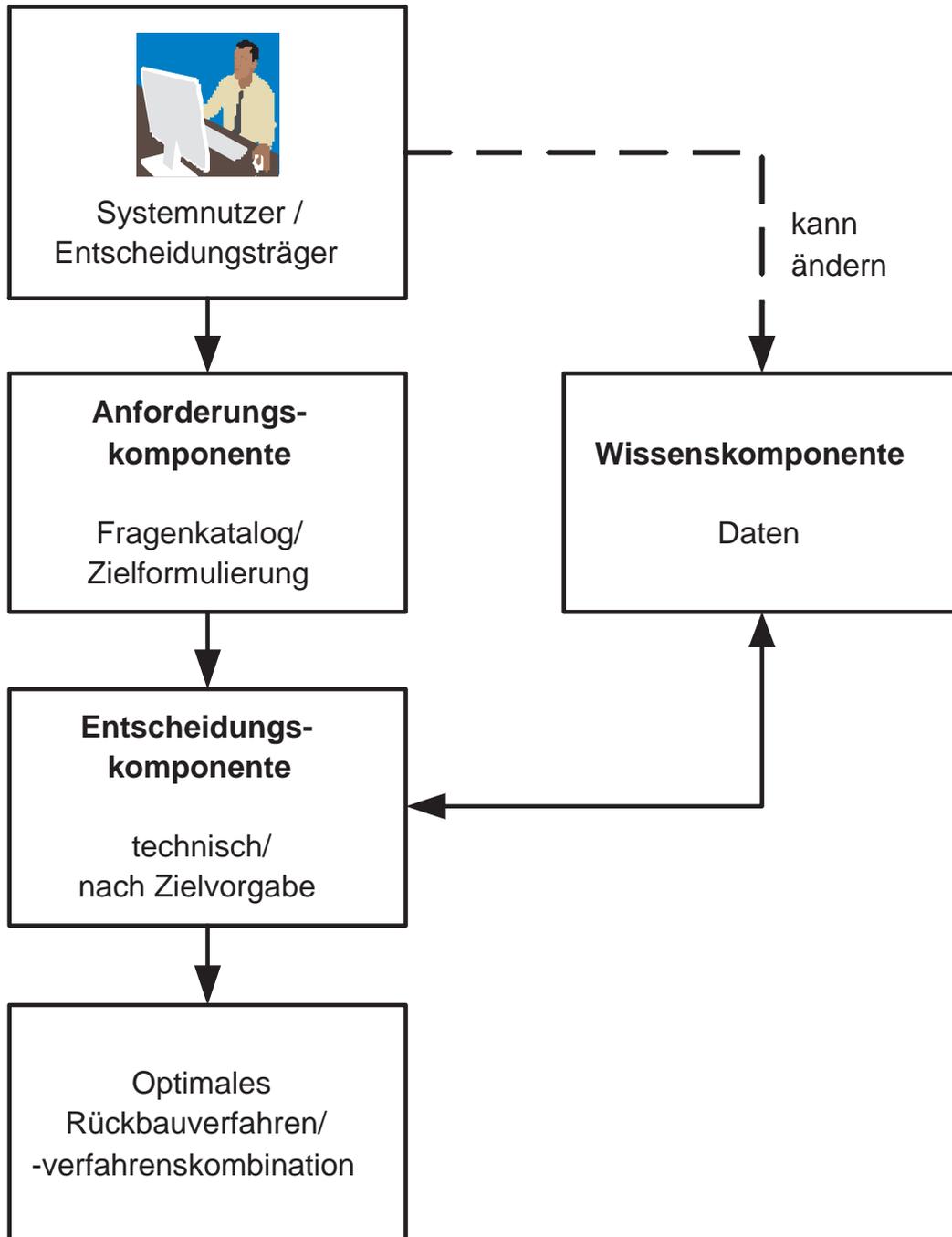


Abbildung 4.1: Prinzipieller Aufbau des Modells RKA

Grundlagen der Entscheidungsmechanismen und -werkzeuge

Im Kapitel 3 wurde hergeleitet, dass ein geeignetes System für den Rückbau kerntechnischer Anlagen in mehrere Phasen aufgeteilt werden sollte. Zur Entscheidungsfindung des Gesamtproblems wird das Problem in Teilprobleme untergliedert, welche dann einzeln gelöst und wieder zusammengefügt werden, so dass sich eine Lösung für das Gesamtproblem ergibt.

In diesem Kapitel sollen einige Grundbegriffe der eingesetzten Entscheidungsmechanismen und -werkzeuge erläutert werden, die für den methodischen und systematischen Entwurf des Modells RKA das theoretische Gerüst bilden. Schwerpunktartig wird dabei auf den aus der Kybernetik stammenden Systembegriff, den systemtechnischen Problemlösungszyklus sowie auf die zur Anwendung kommenden Entscheidungstechniken eingegangen.

5.1 Grundbegriffe und Merkmale von Systemen

Ein System besteht aus einer Vielzahl von Elementen, die in Beziehungen zueinander stehen. Die Elemente und Beziehungen werden von der Systemgrenze umschlossen. Im Umfeld des Systems befinden sich wiederum Systeme oder Elemente, die aber außerhalb der Systemgrenze liegen. Abbildung 5.1 zeigt die Grundbegriffe des Systemdenkens nach Danezer (2002).

Beer (1962) definiert *System* wie folgt: „Das Wort System steht...für Konnektivität. Wir meinen damit jede Ansammlung miteinander in Beziehung stehender Teile...Was wir als System definieren, ist deshalb ein System, weil es miteinander in Beziehung stehende Teile umfasst und in gewisser Hinsicht ein...Ganzes bildet.“

Die *Elemente* sind die Bausteine des Systems. Je nach Betrachtungstiefe können die Elemente des System selbst Systeme mit ihren Systemgrenzen sein, indem Elemente tieferer Ebene gebildet und durch *Beziehungen* miteinander verflochten werden (*Untersysteme*). Im umgekehrten Fall können mehrere Systeme zu einem umfassenderen System zusammengefasst werden (*Übersysteme*). Die *Untersysteme* leisten somit ihren

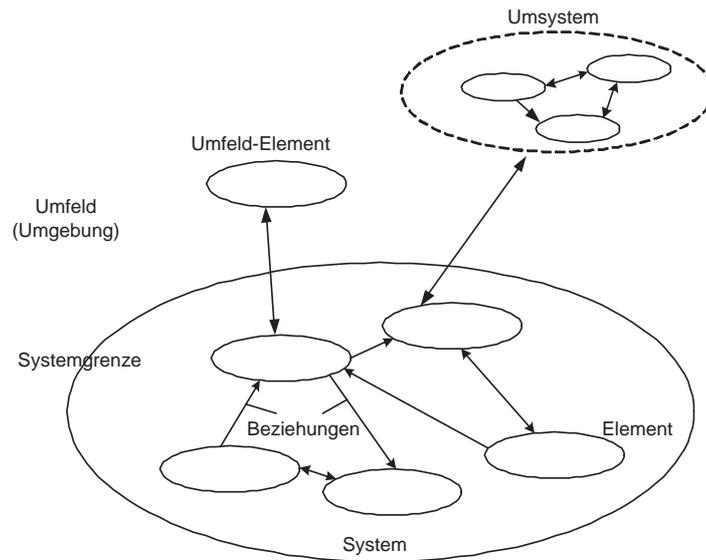


Abbildung 5.1: Grundbegriffe des Systemdenkens (nach Danezer (2002))

Beitrag zum Gesamtsystem und damit ist das Gesamtsystem mehr als die Summe seiner Teile. Die Beziehungen zwischen den Elementen können aus Wirkzusammenhängen, aus Informationsflussbeziehungen etc. bestehen.

Die *Systemgrenze* ist eine mehr oder minder willkürlich festgelegte Abgrenzung zwischen dem System und seiner Umgebung (Umfeld). Unter *Umgebung* werden Systeme (Umsysteme) oder Elemente verstanden, die zwar außerhalb des betrachteten Systems liegen, aber Einfluss nehmen bzw. vom betrachteten System beeinflusst werden und untereinander Beziehungen eingehen. Charakteristisch für ein System ist nach Hartmann (1949), dass innerhalb der Systemgrenzen ein größeres Maß an Beziehungen besteht als zwischen Umfeld und System. Dieses „Übergewicht der inneren Bindung“ macht daraus die „Gesamtheit“.

Die *Struktur* eines Systems ergibt sich durch das Gefüge, welches sich aus den Elementen und Beziehungen zusammensetzt und damit eine Ordnung bildet. Wenn das System in unterschiedliche Stufen untergliedert wird, wird von einer *Systemhierarchie* gesprochen.

Die Aufgabe der *Systemtechnik*, welche sich als allgemeingültige Lösungsmethodologie begreift, ist die Bereitstellung allgemeiner Prinzipien, Methoden und Hilfsmittel. Dadurch lassen sich komplexe Systeme analysieren, planen, auswählen und optimal gestalten.

Ziel der *Systemtechnik* ist es, mit der für jedes komplexe Problem spezifischen Lösungsmethode optimale Lösungen zu finden. (Hall, 1962),(Danezer, 2002)

Im Folgenden wird als System das Modell RKA verstanden. Die Elemente des Systems stellen die Anforderungs-, Wissens- und die Entscheidungskomponente dar. Die unterschiedlichen Elemente sind durch die Anordnungsbeziehungen miteinander verbunden. Ebenso lassen sich diese Elemente wiederum als Systeme darstellen, deren Elemente die Fragenkomplexe (Anforderungskomponente), die Verfahren und Subverfahren (Wissenskomponente) und die einzelnen Entscheidungsmechanismen (Entscheidungskomponente) sind. In dieser Systemhierarchie stellen die einzelnen Beziehungen

die Verknüpfungen dar zwischen Anforderungen der Anforderungskomponente und Eigenschaften der Verfahren der Wissenskomponente, welche mit den jeweiligen Entscheidungsregeln der Wissenskomponente verbunden sind. Die Systemgrenze ist in der Hinsicht definiert, dass nur massive Betonstrukturen in die Betrachtungen mit aufgenommen werden. Die gesamten Stahlkonstruktionen sowie der Rohrleitungsbau ist nicht Gegenstand der Betrachtung. Der Rückbau dieser Komponenten bildet das Um-system des betrachteten System, welches unter Umständen das betrachtete System beeinflusst. Diese Beeinflussung spiegelt sich in der Wahl der Rückbauverfahren, in der zeitlichen Abfolge des Gesamtückbaus, in vorhanden Störkanten etc. wider.

5.2 Problemlösungszyklus

Die Systemtechnik definiert ein Vorgehensmodell für die systematische und strukturelle Behandlung komplexer Problemstellungen. Sie hat den Zweck, den Werdegang einer Lösung in mehrere überschaubare Teiletappen zu untergliedern. Damit wird ein stufenweiser Planungs-, Entscheidungs- und Konkretisierungsprozess ermöglicht.

Danezer (2002) beschreibt in diesem systematischen Vorgehensmodell das Grundmodell des Problemlösungszyklus, welcher die zur Zielsuche (Situationsanalyse und Zielformulierung), Lösungssuche (Lösungssynthese und -analyse) und Lösungsauswahl (Bewertung und Entscheidung) notwendigen Schritte formuliert (vgl. Abbildung 5.2).

Der Problemlösungszyklus wird hierbei als Meta-Methode angesehen, um komplexe Problemstellungen systematisch und zielgerichtet zu lösen. Die einzelnen Etappen beschreiben unabhängig vom eigentlichen Problem in abstrakter Weise den Lösungsweg. Die Situationsanalyse beschreibt den genauen IST-Zustand. Der Zweck der Situationsanalyse besteht darin, sich mit der Ausgangssituation (z.B. radiologische Randbedingungen) und der Aufgabenstellung zu befassen. Die Ergebnisse der Situationsanalyse dienen als Informationsquelle zur Formulierung des SOLL-Zustands. Die Zielformulierung hat den Zweck, Absichten systematisch zusammenzufassen, die der Lösungssuche zugrunde gelegt werden sollen. Die Zielformulierungen sollten sich an gewissen Grundregeln orientieren (Danezer, 2002):

- Lösungsneutralität, d.h. der Weg zur Entscheidungsfindung sollte nicht vorgegeben sein.¹
- Vollständigkeit, d.h. alle wichtigen Anforderungen an die gewünschte Lösung sollten beinhaltet sein.
- Zielformulierungen müssen möglichst präzise und verständlich sein.
- Realitätsnah, d.h. Ziele müssen realistisch, nach den gegebenen Randbedingungen formuliert sein.

¹Anmerkung des Verfassers: Im Zuge der Modellbildung wird der Weg zur Entscheidungsfindung festgelegt, so dass die technischen Aspekte des Lösungsweges gegeben sind und das Modell als standardisiertes Modell zum Rückbau massiver Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen genutzt werden kann.

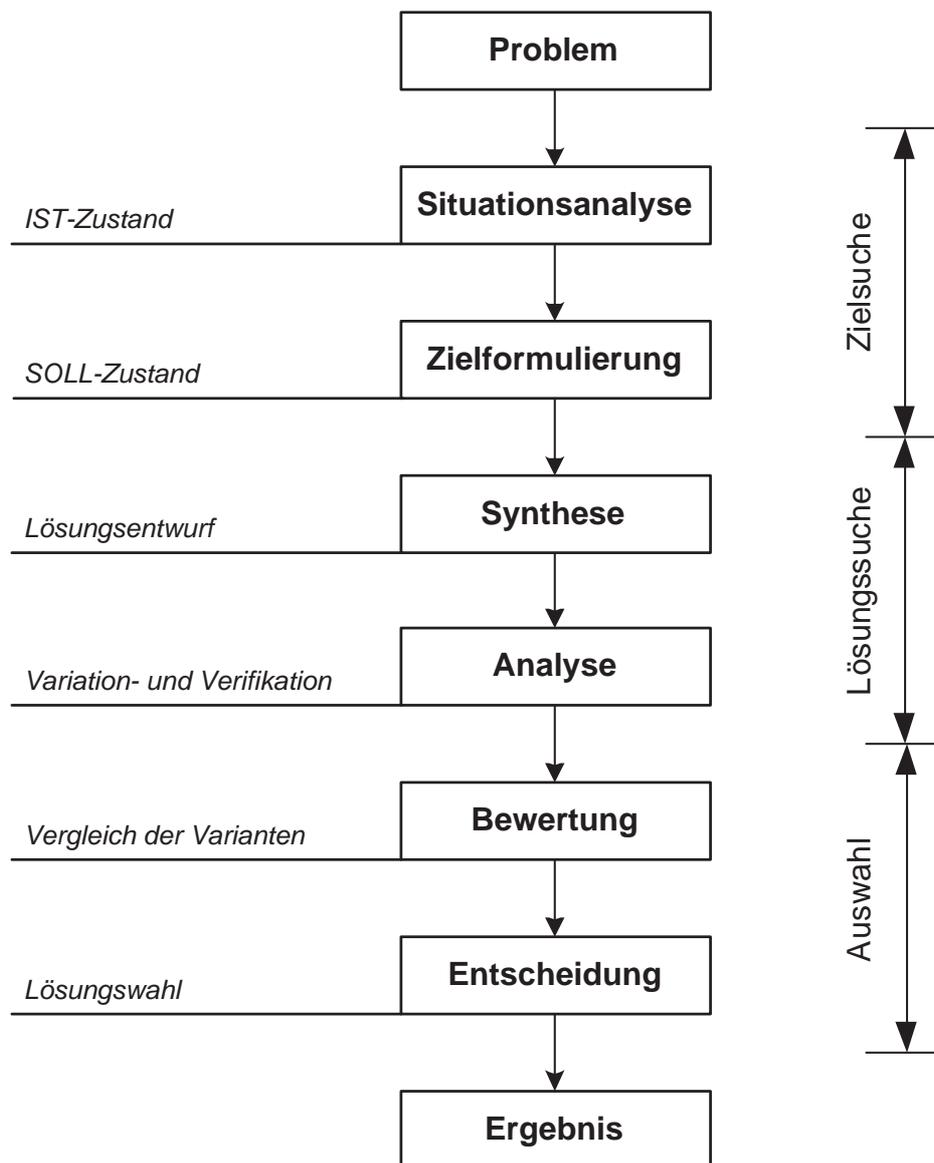


Abbildung 5.2: Problemlösungszyklus (in Anlehnung an Danezer (2002))

Die Zieldefinitionen sind zu unterscheiden in Muss- und Sollziele. Dabei sind Mussziele solche Ziele, die zwingend erreicht werden müssen. Bei Sollzielen sollte eine möglichst gute Erreichung angestrebt werden. Dementsprechend kommt den Musszielen eine wesentlich größere Bedeutung zu als den Sollzielen.

Der Lösungsentwurf wird als Synthese bezeichnet. Die Synthese hat den Zweck, aufbauend auf den Ergebnissen der Situationsanalyse und der Zielformulierung, Lösungsvarianten zu erarbeiten. Sie kann als der Weg zwischen IST und SOLL interpretiert werden.

Die Analyse von Lösungen bietet die Möglichkeit, Lösungen, welche in der Synthese gefunden wurden, zu variieren und verifizieren. Zweck der Analyse ist, zu prüfen, ob ein Konzept den gestellten Anforderungen entspricht bzw. ob wesentliche Schwachstellen aufzufinden sind. Die Analyse dient einerseits der Vorselektierung, indem untaugliche oder weniger gute Lösungen aussortiert werden, und andererseits können gezielt Verbesserungen an den gefundenen Lösungen (Synthese) vorgenommen werden. Somit wird bei der Lösungsfindung ein iterativer Prozess zwischen Synthese und Analyse gestartet, um die beste Lösung zu finden. In der Literatur wird Synthese und Analyse oft als Einheit betrachtet. Blaß (1988) fasst die beiden Arbeitsschritte unter dem Oberbegriff *Lösungssuche* zusammen. In diesem Zusammenhang wird bei der Wegfindung zwischen IST und SOLL von der Lösungsfindung gesprochen. Hierbei wird auch verdeutlicht, dass der Problemlösungszyklus als lösungs- und nicht als problemorientierte Methode zu verstehen ist.

Bei der Bewertung werden taugliche Varianten systematisch anhand geeigneter Kriterien gegenübergestellt, um die am besten geeignete herauszufiltern. Zur Bewertung werden also nur die Varianten betrachtet, die alle Mussziele erfüllen.

Der letzte Schritt des Problemlösungszyklusses ist die Entscheidung für einen gefundenen Lösungsweg. Hierbei wird festgelegt, welche Lösungsvariante zur Anwendung kommt. (Danezer, 2002)

Das Modell RKA bildet den Problemlösungszyklus von der Situationsanalyse bis zur Bewertung ab. Eine Entscheidung, welches Verfahren bzw. -kombination zum Einsatz kommt, wird vom Modell nicht vorgenommen, d.h. die Entscheidungsgewalt liegt beim Systemnutzer.

Die Mechanismen, die beim Modell RKA zur Anwendung kommen, sind im Kapitel 5.3 in ihren Grundzügen erläutert.

5.3 Grundlagen der eingesetzten Entscheidungswerkzeuge

5.3.1 Regelbasierte Systeme

Im Modell RKA werden in einem ersten Schritt Regeln aufgestellt, mit deren Hilfe Rückbauverfahren ausgeschlossen werden können. In diesem Kapitel werden zunächst einige Grundbegriffe des regelbasierten Schließens gegeben.

Nach Beierle und Kern-Isberner (2006) sind Regeln *formalisierte Konditionalsätze* der Form

Wenn A dann B (5.1)

mit der Bedeutung: Wenn A wahr ist, dann schlieÙe, dass auch B wahr ist, wobei A und B Aussagen sind. Die Formel im „Wenn“-Teil der Regel 5.1 wird als Prämisse oder Antezedenz der Regel bezeichnet, die Formel im „Dann“-Teil der Regel wird Konklusion oder Konsequenz genannt. Wenn die Prämisse einer Regel also erfüllt ist, wird die Regel auch angewandt.

Regeln stellen einen guten Kompromiss zwischen der Verständlichkeit der Wissensdarstellung und formalen Ansprüchen dar. Ein großer Teil von Expertenwissen lässt sich über die Anwendung von Regeln repräsentieren. Bei der Konzipierung von Expertensystemen werden daher Regeln in der Wissensbasis der Systeme realisiert.

Nach Beierle und Kern-Isberner (2006) wird bei der Modellierung der Wissensbasis Wert auf eine möglichst einfache syntaktische Form der Regeln gelegt, um eine effiziente Abarbeitung der Regeln zu erreichen und die Übersichtlichkeit der Wirkung der einzelnen Regeln zu verbessern. Dabei müssen bei der Form der Regeln zwei Bedingungen eingehalten werden.

- Eine ODER-Verknüpfung darf nicht in der Prämisse der Regel auftreten.
- Die Konklusion einer Regel soll nur aus einem Literal, also einem positiven oder negativen Atom, bestehen.

Die Wissensbasis eines regelbasierten Systems enthält Objekte und deren Beschreibungen mittels einer endlichen Menge diskreter Werte. Die Regeln repräsentieren die Zusammenhänge zwischen den Objekten oder Mengen von Objekten. Objekte und Regeln bilden das abstrakte Wissen der Wissensbasis. Wird das regelbasierte System auf einen speziellen Fall angewandt, kommt das konkrete, fallspezifische Wissen hinzu, in dem sowohl unmittelbare Beobachtungen oder Tatsachen als auch abgeleitetes Wissen über die aktuelle Situation gespeichert ist.

Regelbasierte Systeme besitzen die Fähigkeit, komplexe Informationen durch Verkettung von Regeln zu verarbeiten. Dabei wird zwischen der Vorwärtsverkettung (forward chaining) bzw. datengetriebenen Inferenz (data-driven inference) und Rückwärtsverkettung (backward chaining) bzw. zielorientierten Inferenz (goal-oriented inference) unterschieden.

Bei der Vorwärtsverkettung werden die Regeln transitiv miteinander verknüpft. Das bekannte fallspezifische Wissen wird als Ausgangspunkt für den Schlussfolgerungsprozess genommen. Aus erfüllten Prämissen wird auf die Wahrheit der Konklusion geschlossen. Diese abgeleiteten Fakten gehen erneut als faktisches Wissen in den Inferenzprozess ein. Wenn keine neuen Fakten mehr abgeleitet werden können, endet das Verfahren. Den entsprechenden Algorithmus zeigt Tabelle 5.1. (Beierle und Kern-Isberner, 2006)

Wenn der Zustand ganz bestimmter Knoten von Interesse ist, wird die Rückwärtsverkettung (rückwärtsgerichtete Inferenz) angewandt. Hierbei wird von einem Zielobjekt ausgegangen, über dessen Zustand der Nutzer Informationen wünscht. Das System durchsucht dann die Regelbasis nach geeigneten Regeln, die das Zielobjekt in der

Datengetriebene Inferenz

Eingabe: Eine Wissensbasis RB (Objekte und Regeln), eine Menge F von Fakten.

Ausgabe: Die Menge der gefolgerten Fakten

1. Sei F die Menge der gegebenen (evidentiellen) Fakten.
 2. Für jede Regel **Wenn A dann B** der Regelbasis RB überprüfe:
Ist A erfüllt, so schließe auf B ;
 $F := F \cup \{B\}$
 3. Wiederhole Schritt 2, bis F nicht mehr vergrößert werden kann.
-

Tabelle 5.1: Algorithmus der Vorwärtsverkettung (Beierle und Kern-Isberner, 2006)

Konklusion enthalten. Die Objekte der Prämissen werden zu Zwischenzielen. Die rückwärtsgerichtete Inferenz wird im Modell RKA nicht angewandt, so dass hier nicht näher darauf eingegangen wird. Eine vertiefende Darstellung zur Rückwärtsverkettung liefert Beierle und Kern-Isberner (2006).

Regelbasierte Systeme verfügen über eine gute Erklärungsfähigkeit, da sie die zur Schlussfolgerung herangezogenen Regeln darstellen und somit eine Erklärungskette nachbilden. (Beierle und Kern-Isberner, 2006)

Ein Beispiel zur Anwendung von Regeln zeigt Abbildung 5.3. Die Anwendung von Regeln im Modell RKA wird im Kapitel 8.2 erläutert. Dort wird auch auf die unterschiedlichen Regelarten, Regelsets und verwendeten Vergleichsoperatoren eingegangen.

5.3.2 Kombinatorische Optimierung

Das Problem der optimalen Verfahrensauswahl lässt sich als ganzzahliges kombinatorisches binäres Optimierungsproblem darstellen. Als Lösungsprinzip kommt hierbei das Branch-and-Bound-Verfahren in Frage. Branch-and-Bound ist ein Suchverfahren und führt auf einem Entscheidungsbaum zur optimalen Lösung. Branch-and-Bound ist kein spezielles Verfahren mit einem Algorithmus, sondern ein Meta-Verfahren.

Typische praktische Anwendungsgebiete des Branch-and-Bound-Verfahrens ist die Lösung von gemischt-ganzzahligen linearen Programmen (z.B. Produktionsplanung, Kapazitäts- und Routing-Planung in Telekommunikationsnetzen, Dienst- und Umlaufplanung im öffentlichen Nahverkehr) und die Lösung von Rundreiseproblemen (Tourenplanung, Handlungsreisendenproblem).

Im Folgenden wird das Branch-and-Bound-Verfahren in seinen Grundzügen kurz erläutert. Anschließend werden die Lösungsprinzipien von Partitionsproblemen aufgezeigt. Zum Schluss wird auf eine Suchstrategie in Form eines Algorithmus eingegangen, mit dessen prinzipieller Vorgehensweise das kombinatorische Optimierungsproblem des Rückbaus kerntechnischer Anlagen gelöst werden kann. In Kapitel 8.5 wird der Lösungsweg zur Entscheidungsfindung detailliert dargestellt.

Beim **Branch-and-Bound-Verfahren** wird das binäre Optimierungsproblem wie folgt dargestellt:

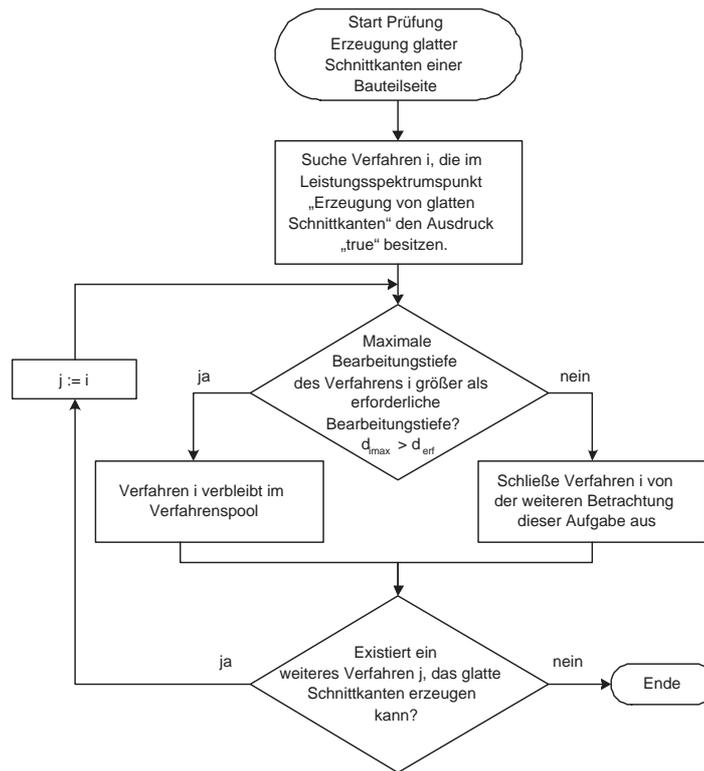


Abbildung 5.3: Regelsetdarstellung im Modell RKA am Beispiel der Verfahrenswahl bei der Aufgabe „Erzeugung von glatten Schnittkanten einer Bauteilseite“

$$z^* \begin{cases} \text{Min. } F(x) \\ \text{u.d.N. } x \in X \subseteq (0, 1)^n \end{cases} \quad (5.2)$$

Eine Möglichkeit, das Problem z^* zu lösen, ist die vollständige Enumeration. Hierbei werden alle binären Vektoren $x \in (0, 1)^n$ nacheinander erzeugt, und es wird jeweils geprüft, ob $x \in X$ ist, und wenn ja, $F(x)$ berechnet. Die „beste“ bisher erzeugte zulässige Lösung $x \in X$ wird gespeichert. Am Ende liegt eine optimale Lösung x^* vor. Die vollständige Enumeration ist nur für relativ kleine n geeignet.

Der zulässige Bereich X wird deshalb sukzessiv in Teilmengen aufgespaltet (Branch). Nun wird jede Teilmenge untersucht, um festzustellen, ob sich in ihr die Optimallösung befinden kann. Ist dies nicht der Fall, kann die Teilmenge ausgeschlossen werden. Diese Vorgehensweise wird implizite Enumeration genannt, da nicht jede Lösung einzeln betrachtet wird, sondern von gewissen Lösungen nur implizit nachgewiesen wird, dass sie nicht als Optimallösungen in Frage kommen. Um feststellen zu können, ob eine Teilmenge nicht zur Optimallösung gehören kann, wird bei Minimierungsproblemen eine untere Schranke (bound) für die Zielfunktionswerte dieser Teilmenge gebildet. Wenn der optimale Zielfunktionswert höchstens den Wert z_0 hat und für die untere Schranke \bar{z} der betrachteten Klasse $\bar{z} > z_0$ gilt, so kann gefolgert werden, dass diese Klasse nicht die Optimallösung enthält und somit ausgeschlossen werden kann. Gilt jedoch $\bar{z} \leq z_0$, so muss die Klasse weiter untersucht werden. Dazu wird die Klasse weiter aufgespaltet (branching) und Schranken für die neu hinzugekommenen Teilklassen berechnet, mit denen wie oben beschrieben verfahren wird. Enthält eine Klasse nur mehr einen zu-

lässigen Punkt x^0 , so wird für diesen der exakte Zielfunktionswert $z(x^0)$ ermittelt. Ist $z(x^0) > z_0$, so kann der Punkt x^0 ausgeschlossen werden.

Nach diesem ersten kurzen Überblick über das Branch-and-Bound-Verfahren wird nun auf die eigentlichen Teile dieses Verfahrens eingegangen, welches sich aus vier Hauptteilen zusammensetzt, nämlich der Relaxation, der Separation, der Schrankenberechnung und der Auswahlregel.

Durch eine Relaxation wird ermöglicht, zu einem schwer lösbaren Problem ein leichter lösbares anzugeben, so dass alle zulässigen Punkte des schwer lösbaren Problems auch zulässig für das leichter lösbare Problem sind. Im Modell RKA wird zunächst für die Problemidentifikation und im Anschluss daran für die Lösungsfindung eine klare Struktur vorgegeben, so dass eine Relaxation im Modell RKA nicht zur Anwendung kommt (eine vertiefende Darstellung zur Relaxation gibt Burkard (1998)).

Die **Separation** gibt an, wie eine Menge X in Teilmengen zerlegt werden soll. Im Modell RKA erfolgt die Separation derart, dass ein Verfahren, das den meisten Erfolg verspricht, also mit dem die meisten Aufgaben abgearbeitet werden können, zunächst separiert wird und in den folgenden Schritten überprüft wird, ob eine Verfahrenskombination mit diesem Verfahren existiert, die eine Optimallösung liefert.

Im Modell RKA wird eine binäre $m \times n$ Matrix A generiert, mit der Aussagen möglich sind, mit welchen Verfahren welche Aufgaben gelöst werden können. Aus dieser Matrix müssen nun Partitionen gebildet werden, so dass eine genaue Zuordnung erfolgt, welche Verfahren oder -kombinationen zur Anwendung kommen.

Um das Problem in unterschiedliche Teilprobleme zu zerlegen, wird dieses nach den Reduktionsregeln für Partitionsprobleme aufgespalten, wobei jede Aufspaltung eine Zuordnung eines Verfahrens zu einer oder mehreren Aufgaben bedeutet. Diese Reduktionsregeln lauten in Anlehnung an Burkard (1998) wie folgt:

1. Enthält Matrix \mathbf{A} eine Nullspalte, so gibt es keine zulässige Lösung.
2. Enthält \mathbf{A} eine Zeile i^* mit nur einem 1-Element, d.h. $a_{i^*k} = 1, a_{i^*j} = 0$ für $j \neq k$, so muss $x_k = 1$ gesetzt werden. Die k -te Spalte wird nun gestrichen und alle Zeilen i , die in der k -ten Spalte ein 1-Element haben.

Zusätzlich wird jede Spalte $l \neq k$ gestrichen für die gilt: $a_{ik} = 1$ und $a_{il} = 1$.

3. Gilt für eine Zeile i^* und eine Zeile i : Wenn $a_{ik} = 1$ ist, so ist auch $a_{i^*k} = 1$, so kann die Zeile i^* gestrichen werden, denn jede Überdeckung des Elements $i \in I$ führt dann auch zu einer Überdeckung $i^* \in I$.

Zusätzlich wird jede Spalte k gestrichen, für die gilt $a_{i^*k} = 1$ aber $a_{ik} = 0$.

4. Gilt für eine Teilmenge \bar{J} der Spalten $\sum_{j \in \bar{J}} a_j = a_k$ und $\sum_{j \in \bar{J}} c_j \leq c_k$,

so kann die Spalte k gestrichen werden.

Die oben genannten Reduktionen können iterativ angewandt werden, d.h. nach Punkt 2 kann in der reduzierten Matrix wieder Punkt 2 angewandt werden.

Für die im Separationsschritt aufgestellten Teilprobleme werden **Schranken** berechnet. Diese Schranken dienen als Ausscheidungskriterien für die Teilprobleme. Die

Teilprobleme werden nacheinander untersucht, so dass eine Reihenfolge festgelegt werden muss, wie dies geschehen soll. Diese Reihenfolge beeinflusst wesentlich die Rechenzeit, so dass Auswahlregeln geschaffen werden müssen, die festlegen, welches Teilproblem in der Liste der noch nicht untersuchten Probleme als nächstes zu behandeln ist. (Burkard, 1998)

Die drei am häufigsten verwendeten Suchstrategien sind nach Neumann und Morlock (2002):

1. **FIFO-Strategie** („first in first out“): Diese Strategie wird als Breitensuche bezeichnet. Dabei werden, ausgehend vom Startknoten (der Wurzel), alle Knoten der Tiefe 1 im Suchbaum durchlaufen, danach alle Knoten der Tiefe 2 usw., bis der Zielknoten in Tiefe n erreicht ist. Es wird also jeder Knoten eines Suchbaumes untersucht.
2. **LIFO-Strategie** („last in first out“): Die LIFO Strategie wird als Tiefensuche bezeichnet. Hierbei wird das zuletzt behandelte Teilproblem solange weiteruntersucht, bis es entweder in einer Senke angekommen ist und somit keine weiteren Nachfolgeknoten mehr untersucht werden können, oder die Optimallösung gefunden wurde. An dieser Stelle kehrt der Algorithmus zum zuletzt expandierten Knoten zurück und untersucht den nächsten Nachfolger des Knotens. Wenn keine weiteren Nachfolger des Knotens vorhanden sind, geht der Algorithmus Schritt für Schritt zum jeweiligen Vorgänger zurück und führt seine Prüfung dort fort.
3. **LLB-Strategie** („least lower bound“): Bei einem Minimierungsproblem wird jenes Problem als nächstes behandelt, welches noch nicht untersucht wurde und die kleinste Schranke besitzt. Die LLB-Strategie basiert auf der Vermutung, dass Knoten mit der jeweils kleinsten Schranke am schnellsten zu einer optimalen Lösung führen.

Der Ablauf eines Branch-and-Bound-Verfahrens wird anhand eines Verzweigungsbaums dargestellt. Jedem Teilproblem entspricht ein Knoten in diesem Verzweigungsbaum. Wird ein Problem P in Teilprobleme P_1, \dots, P_k zerlegt, so führen Pfeile von P nach P_1, \dots, P_k . Im Modell RKA wird nach der LIFO-Strategie vorgegangen.

Abbildung 5.4 zeigt das Flussdiagramm zum Branch-and-Bound-Verfahren für ein Minimierungsproblem. Dabei enthält L die Liste der noch nicht untersuchten Teilprobleme. \bar{z} ist eine untere Schranke für den Zielfunktionswert (ZFW) von P . Wird für P_i nur eine untere Schranke berechnet und keine zulässige Lösung x^i von P_i bestimmt, so ist die Abfrage „ x^i zulässig für P “ mit NEIN zu beantworten.

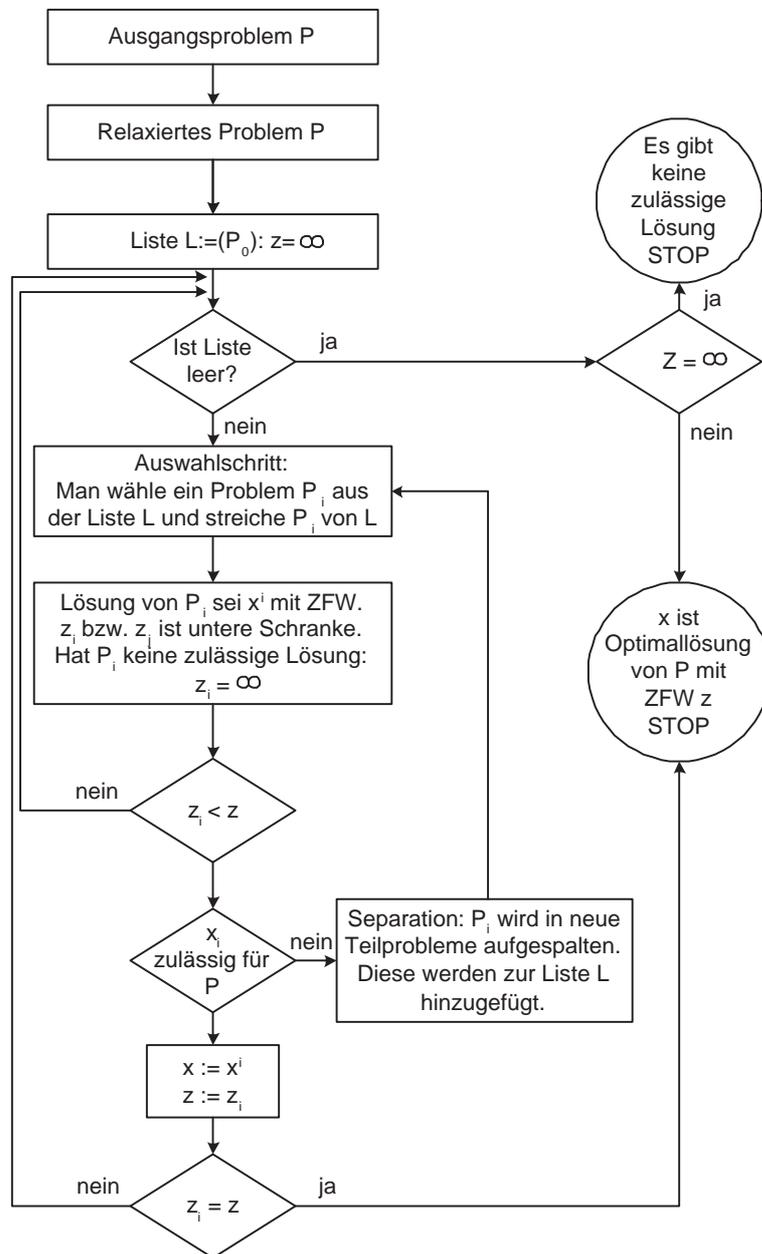


Abbildung 5.4: Flussdiagramm zum allgemeinen Branch-and-Bound-Verfahren für ein Minimierungsproblem (in Anlehnung an Burkard (1998))

Anforderungskomponente

Wie bereits in Kapitel 4 kurz erläutert, werden in der Anforderungskomponente zunächst alle erforderlichen bauteilspezifischen Daten erfasst und die Anforderungskriterien an den Rückbau festgelegt. Hierzu wurde ein Fragebogen entwickelt, der in Anlage A vollständig wiedergegeben ist und dessen Inhalte in Tabelle 6.1 zusammengefasst dargestellt sind ¹ Dieses Kapitel beschreibt die einzelnen Elemente des Fragebogens.

6.1 Bauteilabtrag

In diesem Fragenkomplex erfolgen Angaben zum Bauteilabtrag. Beim Bauteilabtrag ist zu unterscheiden, ob das Bauteil dekontaminiert werden soll, ob ein Teilabtrag des Bauteils (z.B. ein Durchbruch) vorzunehmen ist oder das gesamte Bauteil rückgebaut wird. Als gesamtes Bauteil wird dabei z.B. eine gesamte Wand oder Decke, ein biologisches Schild, ein Kühlturm oder Schornstein verstanden. Darunter ist nicht z.B. ein komplettes Kraftwerkshaus zu verstehen.

Die ersten grundsätzlichen Fragen beziehen sich also darauf, welche Bereiche des Bauteils zurückgebaut werden sollen und ob das Bauteil in seiner Dicke komplett zurückgebaut wird oder nur eine Aussparung herzustellen ist.

Falls ein Oberflächenabtrag durchgeführt werden soll, ist es von Bedeutung, ob dieser Oberflächenabtrag über die erste Bewehrungslage hinausgeht, da nicht alle Rückbauverfahren sowohl Beton als auch Bewehrung abtragen/rückbauen können.

Im weiteren Verlauf wird geklärt, ob das Bauteil kontaminiert und/oder aktiviert ist. Die Tiefe der Aktivierung des Betons lässt sich berechnen, wobei als Eingangsgrößen die Strahlenquelle nach Art und Stärke und die Bestrahlungsdauer eine Rolle spielen.

Der Nutzer wird des weiteren befragt, ob das Bauteil mit einer Metallauskleidung (Liner) versehen ist und ob diese auch zurückgebaut werden soll. Anschließend erfolgt

¹Anmerkung des Verfassers: Die Fragebogenentwicklung beruhte auf einer Vielzahl von Erkenntnissen, die sich der Verfasser durch seine beratende und gutachterliche Tätigkeit für die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe, den Natriumgekühlten Kernreaktor Karlsruhe und die Bundesanstalt für Wasserbau und durch seine Planungstätigkeit in Rückbauprojektteams erwerben konnte.

Fragenkomplex	Details
Bauteilabtrag	Gesamt-/Teil-/Oberflächenabtrag, Aktiviert, Kontaminiert, Kontaminationsschutz, Rückbau von Metallauskleidungen
Abmessung und Lage	Breite, Höhe, Dicke; in Atmosphäre, unter Wasser; Sperr-, Kontroll-, nicht nuklearer Bereich; vertikaler/horizontaler Abtrag; Massen; Transportwege; Entsorgung; Zugänglichkeit
Betonstruktur	Betontyp; Druckfestigkeit; Betonzusätze; Bewehrungsanteil; Stahlzusätze; Asbest; Fugen
Bearbeitungskriterien	Fernhantierung; Abschirm-/Kontaminationsschutzmaßnahmen; Personaleinsatz; Konstruktionsschutzmaßnahmen; Vibrations-/Stoßeinleitung; bündige Trennung; glatte Schnittkanten; Überschnitte; Prozesswasser; Staubentstehung; Abfallmasse/-volumen
Erfassung zusätzlicher Teile	Türe, Tore, Hebevorrichtung, Lüftung, Licht,ameratechnik
Abweichung vom üblichen Betriebsablauf	Erhöhung des Personaleinsatzes, zusätzliche Strahlenschutzrichtungen, zusätzliche Leitstände, sonstige zusätzliche Einrichtungen

Tabelle 6.1: Inhalte des Fragebogens

eine Abfrage, aus welchem Material der Liner besteht, wie dick dieser ist und welche maximalen Abmessungen die Metallplatten besitzen dürfen².

Die Frage, ob umliegende Bauteile bei einem Vorhandensein von Kontamination / Aktivität geschützt werden müssen, schließt diesen Fragenkomplex ab. Falls ein Kontaminationsschutz vorgesehen werden soll, wählt der Nutzer aus einem Katalog von Einhausungs- und Abschirmungsmöglichkeiten dasjenige, welches seinen Anforderungen entspricht, aus.

6.2 Abmessung und Lage

Im Fragenkomplex Abmessung und Lage des Bauteils werden Details des Bauteils über dessen Abmessungen, den Strahlenschutzbereich, die rückzubauenden Massen und die Transportwege aufgenommen. Die Einzelheiten werden in den nachfolgenden Unterkapiteln dargestellt.

6.2.1 Lage

Zunächst muss geklärt werden, ob sich das Bauteil an der Luft oder unter Wasser befindet, um Rückschlüsse über die möglichen Bearbeitungsverfahren ziehen zu können.

Die weiteren Fragen beziehen sich auf den Strahlenschutzbereich des Bauteils. Dabei wird vom Systemnutzer - je nach Höhe der Strahlenexposition - angegeben, ob sich das Bauteil im Sperrbereich als Teil des Kontrollbereichs, im Kontrollbereich oder im Überwachungsbereich der Anlage befindet³. Um Rückschlüsse darüber ziehen zu

²Die maximalen Abmessungen sind davon abhängig, ob die Metallauskleidung lediglich zwischenlagerverpackt und einer späteren Nachzerkleinerung zugeführt oder ob die Metallauskleidung im Zuge des Rückbaus in endlagergerechte, kleinere Stücke geschnitten wird.

³Nach § 36 Strahlenschutzbereiche der Strahlenschutzverordnung sind „Überwachungsbereiche nicht zum Kontrollbereich gehörende betriebliche Bereiche, in denen Personen im Kalenderjahr eine effek-

können, ob ein manueller Rückbau möglich ist, wird vom Systemnutzer die Ortsdosisleistung in Mikrosievert pro Stunde ($\mu Sv/h$) angeben. Mit dieser Angabe ist es in einem Folgeschritt möglich, die Kollektivdosis des eingesetzten Personals bei der Wahl der unterschiedlichen Rückbauverfahren zu bestimmen. Bei einer hohen Ortsdosisleistung wird ein manueller Rückbau ausgeschlossen. In diesem Fall wird mit den Strahlenschutzingenieuren erörtert, ob ein semi-fernbedienter Rückbau möglich erscheint, ob Personaleinsatz z.B. für die Wartung und Pflege der Geräte möglich ist oder das Bauteil komplett fernbedient zurückgebaut werden muss.

Hinsichtlich der Lage des Bauteils muss auch unterschieden werden, ob das Bauteil in vertikaler Richtung, also von oben nach unten bzw. unten nach oben (z.B. Decke oder Boden) oder in horizontaler Richtung (z.B. Wand) rückgebaut wird. Grund für diese Abfrage sind die unterschiedlichen Reichweiten von fernbedienten Trägergeräten (z.B. zeigt die Grabkurve eines fernbedienbaren Baggers eine höhere Reichweite in horizontaler als in vertikaler Richtung), was unter Umständen die Auswahl der möglichen Rückbauverfahren einschränkt.

6.2.2 Abmessung

Die Abmessungen des Bauteils beziehen sich auf den tatsächlich zurückzubauenden Teil dessen. In vielen Fällen wird lediglich gefordert, dass ein Teil des Bauteils zurückzubauen ist. Beispiele hierfür sind die Herstellung von Durchbrüchen als Erschließungsmaßnahme, der Abtrag des aktivierten Teils des Bauteils und die Flächendekontamination eines Raumes.

Der Systemnutzer gibt die abzutragenden Abmessungen des Bauteils nach Breite, Höhe bzw. Länge und Dicke an, wobei bei der Dicke zwischen der Bauteildicke und Bearbeitungstiefe des Bauteils unterschieden werden muss. Die Bearbeitungstiefe gibt dabei an, wie tief in das Bauteil hinein gearbeitet werden muss, um z.B. den aktivierten Teil des Betons vom Restbeton zu trennen. Nicht mit jedem Rückbauverfahren lassen sich beliebig dicke Bauteile bearbeiten, so dass die Bearbeitungstiefe des Bauteils ausschlaggebend für den technischen Ausschluß einzelner Rückbauverfahren sein kann.

Die Höhe des Bauteils ist als maximale Höhe von einem bestimmten Höhenniveau des zu bearbeitenden Bauteils definiert, d.h. es ist nur die Höhe zu ermitteln, die von einer Rückbautechnik noch erreicht werden muss. Hintergrund hierfür sind die maximalen Bearbeitungshöhen, die mit den unterschiedlichsten Rückbauverfahren erreichbar sind. Wie bei der Bearbeitungstiefe wird bei der Bearbeitungshöhe ebenfalls ein Ausscheidungskriterium für die Wahl bestimmter Rückbauverfahren definiert.

Die Angabe der Breite dient sowohl der Berechnung der Rückbaumassen als auch der Berechnung der Rückbaufläche, welche erforderlich ist, wenn das Bauteil dekontaminiert werden soll. Über die Flächenberechnung werden die Zeiten und Kosten der

tive Dosis von mehr als 1 Millisievert oder höhere Organdosen als 15 Millisievert für die Augenlinse oder 50 Millisievert für die Haut, die Hände, die Unterarme, die Füße und Knöchel erhalten können. Kontrollbereiche sind Bereiche, in denen Personen im Kalenderjahr eine effektive Dosis von mehr als 6 Millisievert oder höhere Organdosen als 45 Millisievert für die Augenlinse oder 150 Millisievert für die Haut, die Hände, die Unterarme, die Füße und Knöchel erhalten können. Sperrbereiche sind Bereiche des Kontrollbereiches, in denen die Ortsdosisleistung höher als 3 Millisievert durch Stunde sein kann.“

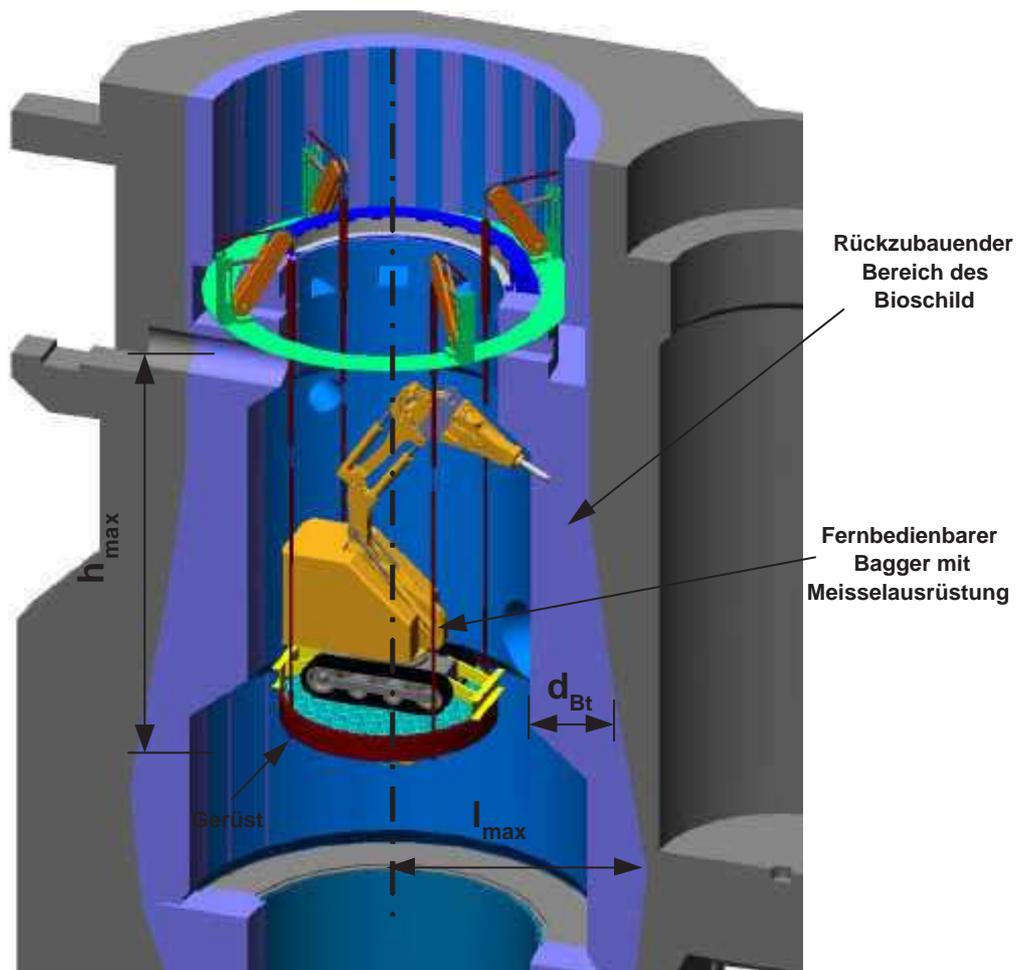


Abbildung 6.1: Prinzipielle Darstellung eines biologischen Schildes mit rückzubauenden Abmessungen

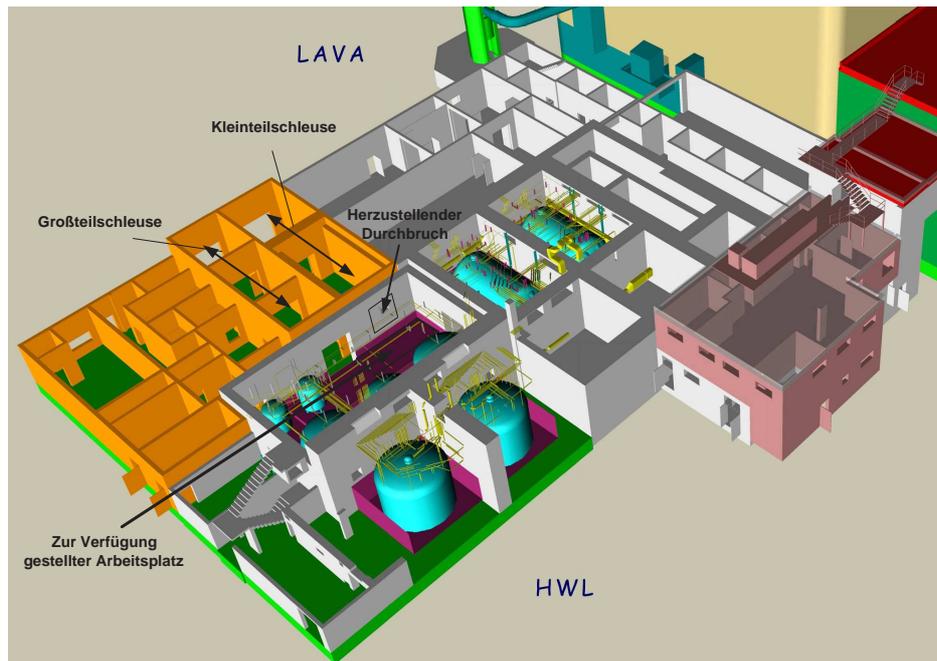


Abbildung 6.2: Darstellung der Schleuswege und des bereitgestellten Arbeitsplatzes am Beispiel eines Durchbruches beim Rückbau des Haupt-Waste-Lagers der Wiederaufbereitungsanlage Karlsruhe [Quelle: WAK]

Verfahren berechnet, die für eine Dekontamination in Frage kommen.

Für eine spätere Kalkulation und für die Berechnungen der anfallenden Entsorgungsmassen erfolgt in einem letzten Schritt die Angaben der gesamten Rückbaumasse, welche unterteilt wird in die Masse des aktivierten Betons, des kontaminierten Betons und des freien Betons, also des Betons, welcher weder aktiviert noch kontaminiert ist.

6.2.3 Zugänglichkeit des Bauteils

Die Zugänglichkeit des Bauteils beschreibt die vorhandenen räumlichen Gegebenheiten, d.h. wie viel Platz am Einsatzort zur Verfügung steht, ob und wie die Rückbauverfahren an den Einsatzort transportiert werden können, ob Maßnahmen ergriffen werden, um die Rückbauverfahren in unterschiedlichen Höhenniveaus einzusetzen und wie die Entsorgung geregelt wird.

Des weiteren ist die Bearbeitung davon abhängig, ob aus Platz- und/oder Strahlenschutzgründen nur eine Seite des Bauteils frei zugänglich ist. Einige Rückbauverfahren benötigen für ihren effektiven Einsatz eine beidseitige Zugänglichkeit des Bauteils (z.B. das Seilsägen). Falls das Bauteil wegen den oben genannten Gründen nur von einer Seite aus zugänglich ist, wird ein Ausscheidungskriterium definiert, so dass einige Rückbauverfahren aus diesem technischen Grund nicht weiter betrachtet werden.

Transportweg

Für den Einsatz der Rückbauverfahren muss zunächst geklärt werden, ob dessen Geräte überhaupt zum Einsatzort transportiert werden können. Aus diesem Grund muss der Systemnutzer die Abmessungen des kleinsten Durchgangs bis zur Arbeitsstelle ange-

ben (vgl. Abbildung 6.2). Diese Abmessungen werden dann in der späteren Bewertung mit den Transportabmessungen der unterschiedlichen Rückbauverfahren verglichen, um festzustellen, welche Verfahren aufgrund zu hoher Transportabmessungen ausscheiden. Ebenso bestimmt der Transportweg die maximal mögliche zurückzubauende Bauteilgröße (wenn diese nicht aus statischen Gründen oder durch die gewählte Verpackung vorgegeben ist) und damit die Auslegungsvorgaben der einzusetzenden Transportgeräte.

Arbeitsplatz

Analog zum Transportweg wird der zur Verfügung stehende Arbeitsplatz für den Bauteilrückbau angegeben. Diejenigen Rückbauverfahren, deren erforderliche Arbeitsabmessungen größer sind als der zur Verfügung gestellte Platz, können nicht verwendet werden und scheiden aus dem System aus.

Klärungsbedarf besteht auch darin, ob die zum Einsatz kommenden Verfahren in unterschiedlichen Höhen genutzt werden sollen. Aus diesem Grund schließen sich Fragen zum Einsatz von Arbeits- und Hebebühnen sowie Gerüsten an. Falls Bühnen oder Gerüste verwendet werden, wird ggf. der zur Verfügung stehende Arbeitsplatz eingegrenzt. Ebenso muss geprüft werden, ob die maximal zulässige Bühnen- bzw. Gerüstbelastung bei Einsatz der unterschiedlichsten Rückbauverfahren überschritten wird.

Entsorgung

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Entsorgung der Rückbaumaterialien. Hierbei ist zu klären, wie die Rückbaumaterialien vom Abbauort zu den Zwischenlagerplätzen transportiert werden. Die Entsorgung erfolgt prinzipiell über Fässer oder Container. Alternativ dazu können, falls Blöcke aus dem Bauteil herausgeschnitten werden, diese verpackt und z.B. mittels Gabelstapler oder Kränen ausgeschleust werden. Die Systemnutzer geben in diesem Schritt an, welche Entsorgungsbehältnisse sie wählen. Somit wird in der sich anschließenden Bewertung berechnet, wie viele Ausschleusvorgänge - je nach verwendetem Rückbauverfahren und Fassungsvermögen der gewählten Entsorgungsbehältnisse - erforderlich sind und welche zeitliche Beanspruchung die Schleusvorgänge insgesamt darstellen.

Da sich die Zeiten für den Transport der Rückbaumaterialien projektspezifisch stark ändern, wird vom Systemnutzer die jeweilige Zeit eines Transportvorgangs von der Arbeitsstelle ins Transportbehältnis und im weiteren Verlauf die Zeit für einen Ausschleusvorgang angegeben, so dass das System die Gesamtzeiten für diese Vorgänge ermitteln kann.

Zusätzlich zu diesen Angaben muss die maximale Größe und das maximale Gewicht von Bauteilsegmenten angegeben werden, welche entstehen, wenn Sägeverfahren zum Einsatz kommen. Die maximale Größe ist für die Ausschleusvorgänge von entscheidender Bedeutung. Das maximale Gewicht ergibt sich aus den maximalen Decken- bzw. Bühnenbelastungen sowie der maximal zulässigen Last des verwendeten Transportmittels. Hierbei wird geprüft, ob das Gewicht oder die Größe der Bauteilsegmente das ausschlaggebende Ausscheidungskriterium ist. Falls das Gewicht reduziert werden muss, werden automatisch die maximalen Abmessungen der Breite und Höhe angepasst.

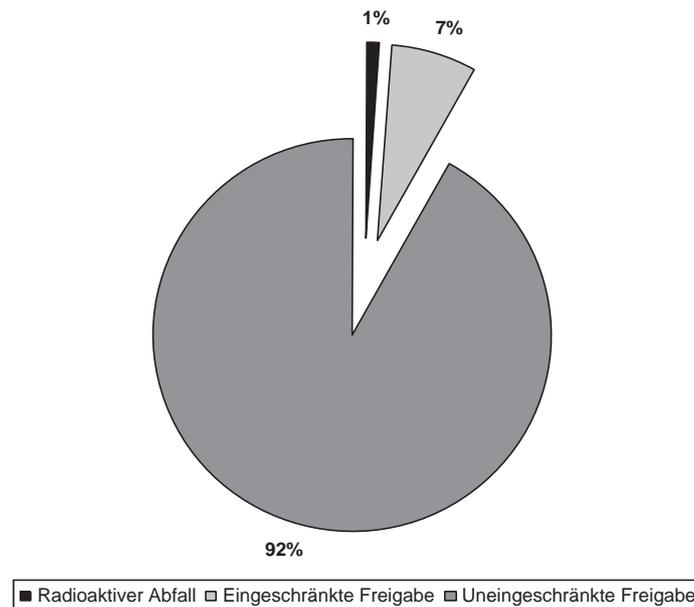


Abbildung 6.3: Prozentuale Unterteilung der Betonabfallmengen (Geiser u. a., 2002)

Somit ergeben sich neue Schnittmuster, die ggf. zu einer Erhöhung der Gesamtschnittfläche führen.

Weiterhin muss geklärt werden, ob die gesamten Rückbaumassen über die angegebenen Entsorgungssysteme ausgeschleust werden oder ob nur das aktivierte bzw. das kontaminierte Material abtransportiert werden soll. Der aktivierte bzw. kontaminierte Anteil des Betons beträgt nach Geiser u. a. (2002) ca. 1 % des gesamten Betonaufkommens. 7 % der Masse werden eingeschränkt freigegeben und 92 % können uneingeschränkt freigegeben werden (vgl. Abbildung 6.3). Falls nur das aktivierte / kontaminierte Material abtransportiert wird, ist festzuhalten, wie mit dem nicht aktivierten / nicht kontaminierten Material umgegangen wird.

Anschließend wird sowohl der Zwischenlagerungsort des nicht aktivierten / nicht kontaminierten Materials als auch die Aufbewahrungsbehältnisse des Materials definiert.

6.3 Betonstruktur

Die Erfassung der Betonstruktur hat zum einen informellen Charakter, um bei weiteren, ähnlichen Projekten mit ähnlicher Betonstruktur Erkenntnisse darüber zu erlangen, mit welchen Verfahren zurückliegende Projekte zurückgebaut wurden und welche Ereignisse hierbei aufgetreten sind. Zum anderen werden diejenigen Verfahren ausgeschlossen, mit denen es nicht möglich ist, bestimmte Betonstrukturen zu bearbeiten. Bestimmte Betonstrukturen bedingen zudem eine erhebliche Leistungsverringerung einiger Rückbauverfahren oder führen zu einer erhöhten Störanfälligkeit bzw. zu Bearbeitungsschwierigkeiten hinsichtlich eines kontinuierlichen Bauteilabtrages. Auch erforder-

dern bestimmte Betonstrukturen je nach betrachtetem Rückbauverfahren den Einsatz weiterer Verfahren. Die Angaben zur Betonstruktur und deren Verknüpfungen zur Bewertungskomponente sind nachfolgend beschrieben.

6.3.1 Betontyp

In kerntechnischen Anlagen werden in den Bereichen, in denen radioaktiv strahlende Quellen die Umgebung kontaminieren bzw. aktivieren und so Personen schädigen können, geeignete Abschirmmaßnahmen getroffen, die eine Gesundheitsgefährdung des Personals ausschließen. Die Art und Dicke der Abschirmung wird von der Strahlenquelle bestimmt. Während α und β -Strahler durch mehrere Millimeter starken Beton abgeschirmt werden können, bedarf es bei Röntgenstrahlen, welche in der Medizintechnik vorkommen, einer Abschirmung mit Normalbeton in einer Stärke von 30 cm. In kerntechnischen Anlagen herrschen außer α - und β -Strahlern γ -Strahler und Neutronenstrahler vor. Die γ -Strahlungsquellen müssen mit Schwer- oder Strahlenschutzbetonen abgeschirmt werden. Grund hierfür ist eine höhere Abschirmwirkung als bei Normalbetonen bei gleicher Bauteildicke. Hierzu werden Zuschlagstoffe mit einer höheren Dichte verwendet. Eine Auswahl der dabei verwendeten schweren Zuschlagstoffe ist in Tabelle 6.2 aufgelistet. Zusätzlich zur erhöhten Betondichte kann es, je nach der Strahlenbelastung, möglich sein, dass größere Bauteildicken bis zu 200 cm realisiert werden müssen. Um Neutronenstrahlen abschirmen zu können, bedarf es zusätzlich noch eines Betons, der einen hohen Gehalt an chemisch gebundenem Wasser und Zusätze von Bor, Kadmium oder Hafnium enthält (Richter, 2002).

Diese schweren Zuschlagstoffe werden den normalen Gesteinskörnungen beigemischt, um die gewünschte Festbetonrohddichte zu erreichen. Die erhöhte Druckfestigkeit von Abschirmbetonen bedingt in erster Linie eine geringe Abbauleistung der Rückbauverfahren gegenüber Normalbetonen.

Bei der Abfrage des Betontyps kann der Nutzer aus einer Liste (Tabelle 6.3) denjenigen Typ auswählen, der auf sein Bauteil zutrifft.⁴

6.3.2 Bewehrung

Zur Klassifikation des Bewehrungsanteils geben die Systemnutzer zunächst den Bewehrungsanteil in Kilogramm Bewehrung pro Kubikmeter Beton (kg/m^3) an. Anschließend wird geprüft, ob der angegebene Bewehrungsanteil als hoch, mittel oder gering einzustufen ist (Tabelle 6.4). Somit sind Rückschlüsse darüber zu erhalten, wie hoch die Abbruchleistung der einzelnen Rückbauverfahren sein wird.

Der Systemnutzer gibt weiterhin an, welche Bewehrungstypen im Bauteil vorhanden sind. Dabei ist zwischen Matten- und Rundstahlbewehrung auszuwählen. Ist Matten-

⁴Falls der Betontyp nicht bekannt ist, können Proben aus dem Beton genommen werden, welche auf ihre Druckfestigkeit (charakteristische Zylinderdruckfestigkeit f_{ck}) geprüft werden. Die neue DIN 1045-2 unterscheidet nach der Druckfestigkeit von Zylindern $f_{ck,cyl}$ und der Druckfestigkeit von Würfeln $f_{ck,cube}$. Da in einem Bestandsbeton nur Zylinder als Probekörper entnommen werden können, beziehen sich die Mindestdruckfestigkeiten der Druckfestigkeitsklasse auf den ersten Wert. Diese Druckfestigkeit wird direkt in das System eingegeben. Das System sucht sich zur ermittelten Druckfestigkeit den passenden Betontyp, d.h. wird die untere Schranke der erforderliche Druckfestigkeit erreicht, wird der Beton dieser Betonfestigkeitsklasse zugeordnet.

Stoffgruppe	Zuschlagsstoffe	Kornrohddichte <i>kg/dm³</i>
Natürliche schwere Gesteinskörnungen	Baryt (Schwerspat)	4,0 - 4,3
	Ilmentit (Titaneisenstein)	4,6 - 4,7
	Magnetit (Magneisenstein)	4,6 - 4,8
	Hämatit (Roteisenstein)	4,7 - 4,9
industriell hergestellte, schwere Gesteinskörnungen	Schwermetallschlacken	3,5 - 3,8
	Ferrosilicium	5,8 - 6,2
	Ferrophosphor	6,0 - 6,2
	Stahlgranalien ($\leq 8mm$)	6,8 - 7,5
	Stahlsand (0, 2...3mm)	7,5 - 7,6
Gesteinskörnungen mit erhöhtem Kristallwassergehalt	Limonit (4...16mm)	3,6 - 3,8
	Serpentin	2,5 - 2,6
Borhaltige Zusatzstoffe	Borocalcit, Colemanit	2,3 - 2,4
	Borfritte	2,4 - 2,6
	Borcarbid	2,4

Tabelle 6.2: Gesteinskörnungen und Zusatzstoffe für Schwer- und Strahlenschutzbetone (Richter, 2002)

bewehrung vorhanden, wird der Nutzer zu einer Liste mit den gebräuchlichen Mattenbewehrungen geleitet, in die er den vorhandenen Mattentyp auswählt. Falls der vorhandene Mattentyp nicht in der Liste zu finden ist, ist es möglich, den neuen Mattentyp in die Liste aufzunehmen.

Bei Vorhandensein von Rundstahlbewehrung im Bauteil wird vom Nutzer zunächst der stärkste Bewehrungsstahl in *mm* angegeben, da nicht alle Rückbauverfahren beliebig starke Bewehrungsstähle durchtrennen können. Damit einhergehend wird vom Nutzer zusätzlich noch die Dicke der stärksten Bügelbewehrung angegeben. Im nächsten Schritt wird in einer Tabelle aufgeführt, wie viel Lagen die Rundstahlbewehrung hat, welche Durchmesser und welche Stababstände die einzelnen Stähle besitzen und

Betonklassifikation nach DIN 1045-2			
alt	neu	alt	neu
B 5	C 8/10	B 55	C 45/55
B 10	C 8/10	B 65	C 55/67
B 15	C 12/15	B 75	C 60/75
B 25	C 20/25	B 85	C 70/85
B 25	C 25/30	B 95	C 80/95
B 35	C 30/37	B 105	C 90/105
B 45	C 35/45	B 115	C 100/115

Tabelle 6.3: Gegenüberstellung der Betonklassifikationen nach alter und neuer DIN 1045

Klassifizierung des Bewehrungsanteils	Bewehrungsanteil in kg/m^3
niedrig	unter 30
mittel	30 bis 60
hoch	über 60

Tabelle 6.4: Klassifizierung des Bewehrungsanteils



Abbildung 6.4: Darstellung typischer Bewehrungsdurchmesser und Einbauteile am Beispiel des VEK Außenwandmodells

ob, nach Lagen getrennt, die Verlegungsrichtung horizontal oder vertikal ist.

Dieser Schritt ist für die anschließende Bewertung erforderlich, da z.B. gefordert werden kann, den Beton vom Stahl zu trennen, wobei zu berücksichtigen ist, dass die einzelnen Stäbe aus Entsorgungszwecken nur eine bestimmte Länge besitzen dürfen. Dazu wird berechnet, wie oft ein Bewehrungsstab durchtrennt werden muss und welche Zeit die Trennvorgänge in Abhängigkeit der Rückbauverfahren beansprucht.

6.3.3 Stahlzusätze

Die Stahlzusätze werden unterschieden zwischen Stahlfaserzusätze, Stahlkugelnzusätze und Einbauteile.

Stahlfaserzusätze

Der Systemnutzer gibt bei Vorhandensein von Stahlfasern im Beton entweder die Höhe des Anteils der Stahlfasern in Volumen-% oder in Gewichts-% an. Stahlfasern im Beton können dazu führen, dass einige Rückbauverfahren nicht mehr die angegebene Rückbauleistung erbringen. Deshalb ist in der Wissenskomponente die Möglichkeit gegeben,

verfahrensspezifisch die Rückbauleistung zu reduzieren.

Stahlkugelnzusätze

Stahlkugelnzusätze werden verwendet, um dem Beton eine höhere Abschirmwirkung zu geben. Wenn Stahlkugelnzusätze vorhanden sind, kann der Systemnutzer dies analog den Stahlfaserzusätzen angeben. Stahlkugelnzusätze führen bei einigen Rückbauverfahren zu einer Verringerung der Rückbauleistung oder in Extremfällen zu sehr hohen Störanfälligkeiten, so dass diese nicht verwendet werden können. Beispiel hierfür sind die Sägeverfahren, da beim Schleifvorgang die Stahlkugeln aus dem Betonverbund herausgetrennt werden und sich ein Kugellager zwischen dem Werkzeug und dem zu bearbeitenden Beton ausbildet. Die Rückbauleistung wird hierbei so eingeschränkt, dass eine weitere Bearbeitung mit diesen Verfahren unmöglich ist.

Einbauteile

In Industriebauten allgemein und speziell in kerntechnischen Anlagen werden z.B. maschinentechnische Einrichtungen, die am Bauwerk befestigt werden, nicht ausschließlich über Dübel, sondern über im Bauwerk verankerte Einbauteile mit dem Bauwerk verbunden bzw. an diesem befestigt. Des Weiteren werden noch z.B. Kabel, Rohre durch das Bauwerk geführt, welche mit Hilfe von Metalleitungen Wände, Decken, etc. durchdringen. Im Fragebogen werden diese Einbauteile erfasst, so dass Rückschlüsse darüber zu ziehen sind, welche zusätzlichen Anforderungen sich beim Rückbau des betrachteten Bauteils ergeben. Die Abfragedetails werden in Anhang A, Tabelle A.1 aufgezeigt.

Bei allen Einbauteilen ist festzustellen, ob sie vorab, d.h. bevor der Beton zurückgebaut wird, ausgebaut werden sollen. Diese Daten werden für die Auswahl der Rückbauverfahren und die anschließende Berechnung der Ausbauzeit verwendet. Um eine effektive Auswahl der Rückbauverfahren zu ermöglichen, ist es aufgrund der unterschiedlichen Bearbeitungsreichweiten der Verfahren erforderlich, die Lage der Einbauteile zu erfassen.

Die Erfassung der Stahlträger erfolgt über bereits vorgefertigte Tabellen, in denen der Systemnutzer den betreffenden Stahlträger auswählt.

Falls im Bauteil Einbauteile einer anderen Art als der oben genannten vorhanden sind, besteht für den Systemnutzer die Möglichkeit, sonstige Einbauteile zu erfassen. Diese sonstigen Einbauteile können große Einbauten im Beton wie z.B. Verankerungen des Schalungstanks, Reaktordeckelverankerungen, Hinterlüftungskanäle etc. sein.

6.3.4 Zusatzfragen

Mit den Zusatzfragen wird die Erfassung der Betonstruktur abgeschlossen. Die Zusatzfragen beinhalten zum einen die Abfrage, ob in der Bauteilstruktur Asbest vorhanden ist, und ob dieses vorab ausgebaut werden muss. Zum anderen erfolgt eine Abfrage, ob Fugen im Bauteil vorhanden sind und diese vor eindringender Flüssigkeit, wie z.B. Prozesswasser geschützt werden müssen, weil z.B. die Gefahr besteht, dass das Prozesswasser eine Kontaminationsverschleppung hervorruft.

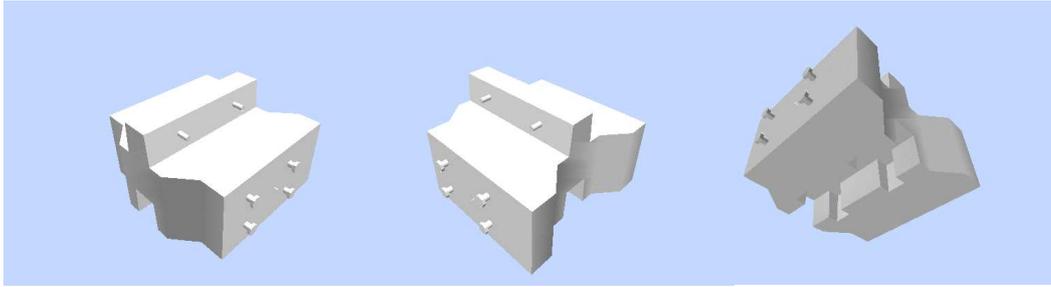


Abbildung 6.5: Beispiel eines Abschirmsteines [Quelle: WAK]

6.4 Bearbeitungskriterien

Im Fragenkomplex der Bearbeitungskriterien werden Punkte bezüglich einer eventuell notwendigen fernbedienten Bearbeitung, dem Schutz umliegender Bauteile, der zulässigen Einleitung von Vibrationen / Stoßbelastungen, einer bündigen Trennung zu umliegenden Bauteilstrukturen, der zulässigen Verwendung von Prozesswasser, der zulässigen Einleitung von Staub in den betreffenden Raum, der Notwendigkeit von glatten Schnittkanten, der eventuell notwendigen Vermeidung von Überschritten und der allgemeinen Bearbeitungskriterien wie der Vor-Ort-Trennung von kontaminierten/aktivierten Beton vom Restbeton etc. geklärt.

6.4.1 Fernbediente Bearbeitung

Aufgrund des radiologischen Zustands des Einsatzortes wird zunächst geklärt, ob eine manuelle Bearbeitung des Bauteils möglich ist. Hierzu wird abgefragt, ob das Bauteil fernbedient zurückgebaut werden soll. Für eine fernbediente Bearbeitung ergeben sich Modifikationen an den Rückbaugerätschaften, welche exemplarisch im Anhang B dargestellt sind.

Falls das Bauteil ausschließlich fernbedient oder semi-fernbedient bearbeitet werden soll, ist zudem zu klären, ob das Bauteil zunächst von seiner aktivierten bzw. kontaminierten Seite aus zurückgebaut wird. Diese und die folgenden Fragen werden allerdings nur gestellt, wenn das Bauteil aktiviert bzw. kontaminiert ist. Bei der fernbedienten oder semi-fernbedienten Bearbeitung erhöht sich die Bearbeitungszeit des Rückbauverfahrens. Des weiteren müssen eventuelle Umbaukosten für eine fernbediente Nutzung der Verfahren berücksichtigt werden. Zudem werden alle Verfahren darauf hin überprüft, ob mit ihnen überhaupt eine fernbediente oder semi-fernbediente Nutzung möglich ist.

In einem weiteren Schritt wird geprüft, ob Abschirmmaßnahmen oder Kontaminationsschutzmaßnahmen getroffen werden sollen. Abschirmmaßnahmen sind hierbei z.B. Abschirmsteine (vgl. Abbildung 6.5) oder Bleimatten, mit denen es möglich ist, das zeitweise vorhandene, sich im betreffenden Raum / Zelle befindliche Personal vor einer hohen Strahlenbelastung zu schützen.

Abschirmmaßnahmen wie Abschirmsteine oder Bleimatten werden den Subsystemen zugeordnet, welche in Kapitel 7.2 näher erläutert werden.

Ebenso wie die Abschirmmaßnahmen, deren vorangiges Ziel es ist, das am Bauteil

tätige Personal vor Strahlung zu schützen, werden Kontaminationsschutzmaßnahmen ergriffen, um umliegende Bauteile vor einer möglichen Querkontamination zu schützen, die beim Rückbau des Bauteils auftreten kann. Beispiel hierzu ist die Bildung von Staub bei der Bearbeitung des Bauteils mit z.B. dem Fräs- oder Meißelverfahren. Um die umliegenden Bauteile vor Kontamination zu schützen, können diese z.B. mit einer Folie abgedeckt oder der Arbeitsplatz mit einem Folienzelt abgeschirmt werden, um so eine Staubausbreitung zu verhindern. Die Kontaminationsschutzmaßnahmen gehören wie die Abschirmmaßnahmen zu den Subsystemen, welche in Kapitel 7.2 näher erläutert werden.

Selbst bei einem fernbedienten Einsatz der Rückbauverfahren ist es unter Umständen möglich, zeitweilig Personal für unterschiedliche Zwecke einzusetzen. Falls ein zeitweiliger Personaleinsatz möglich ist bzw. gewünscht wird, muss geklärt werden, für welche Zwecke Personal eingesetzt werden soll (vgl. Anhang A).

Wenn Ein- und Ausschleusvorgänge des Materials mit Hilfe von Personal vorgenommen werden sollen, wird vom System die Zeitdauer, die ein Ein- / Ausschleusvorgang benötigt, und die Anzahl der Personen, die für diesen Einsatz verwendet werden, erfasst. Über die Berechnung der gesamten Ein- und Ausschleusvorgänge wird die Gesamtzeit der Schleusvorgänge und die Kollektivdosis des Personals für diese Maßnahme ermittelt.

In Bereichen niedriger Ortsdosisleistung kann es vorteilhaft sein, kleinere Reparaturarbeiten an den Geräten bzw. Arbeiten bzgl. des Verschleißteilersatzes vor Ort durchzuführen. Der Verschleißteilersatz ist vom Rückbauverfahren abhängig. Dieser Punkt dient der Klärung, ob diese Tätigkeiten vor Ort ausgeführt werden sollen oder nicht.

Rückbaugerätedefekte können durch einen Ausfall eines Trägergerätes, durch Seil- / Sägeblattverklemmungen in der Bauwerksstruktur, durch Abbrechen von Bohrkronen etc. entstehen. Solche Gerätedefekte werden im Zuge einer Gefährdungsanalyse, welche sich an die DIN 954-1 anlehnt, analysiert und bewertet, um Aufschlüsse darüber zu geben, welche Maßnahmen bei einem Gerätedefekt ergriffen werden müssen und um zu prüfen, ob diese Defekte bei einem fernbedienten Einsatz beherrschbar sind. Dabei kann abgeschätzt werden, wie lange, mit wie viel und mit welchem Personal die unterschiedlichen Arten von Gerätedefekten behoben werden können. Des Weiteren wird die Zeitdauer ermittelt, die benötigt wird, die Geräte aus dem Gefahrenbereich zu transportieren. Hierbei lassen sich auch Erkenntnisse über die Kollektivdosis gewinnen, wenn Personal über einen bestimmten Zeitraum am Arbeitsplatz tätig ist.

Über den Punkt „kurzzeitige sonstige Arbeiten“ sollen alle sonstigen Arbeiten abgedeckt werden, die bauteilspezifisch bzw. anlagenspezifisch erforderlich sind. Der Systemnutzer trägt die Art der Tätigkeiten, die Anzahl der Tätigkeitswiederholungen, die einmalige Dauer der Tätigkeit und die Personenanzahl ein. Die Ermittlung der jeweiligen Zeitdauer der kurzzeitigen sonstigen Tätigkeiten wird, wie bei den anderen oben aufgeführten Tätigkeiten, für die Bestimmung der Kollektivdosis benötigt.

Der Fragenkomplex schließt ab mit der Frage bzgl. Vorkehrungen, die den Arbeitsschutz betreffen. Es wird hierbei unterschieden, ob Vorkehrungen bzgl. des Arbeitsschutzes unternommen worden sind oder ob diese Maßnahmen noch eingeleitet werden müssen. Je nach Bearbeitungsstand kann der Systemnutzer Handlungsanweisungen, die

Vibrationsklassen	Details
Sehr schwach	Es werden keine Vibrationen ins Bauteil abgegeben. Vibrationen werden nur durch die Eigenschwingungen des Gerätes erzeugt
Schwach	Vibrationen sind nur in unmittelbarer Nähe des Arbeitsbereichs spürbar
Mittel	Angrenzende Gebäudeteile erfahren leichte Vibrationen
Stark	Erschütterungen sind bis in 20 m Entfernung deutlich spürbar
Sehr stark	Erschütterungen sind in Entfernungen von über 20 m noch deutlich spürbar. Angrenzende Gebäudeteile werden in Schwingungen versetzt

Tabelle 6.5: Klassifizierung der maximal zulässigen Vibrationen / Stoßbelastungen in das Bauwerk

den Arbeitsschutz betreffen, vom System abrufen.

6.4.2 Schutz umliegender Strukturen

Je nach eingesetztem Rückbauverfahren entstehen bei der Bearbeitung des Bauteils Bruchstücke aus Beton, Bewehrung, Stahlplatten, etc. Deshalb muss geprüft werden, ob durch das Herabfallen von Bruchstücken umliegende Bauteile beschädigt werden können. Ist dies der Fall, ist weiter zu prüfen, ob eine Beschädigung der umliegenden Bauteile zulässig bzw. akzeptabel ist.

Falls Beschädigungen der umliegenden Bauteile nicht akzeptiert werden, sind Bauteilschutzmaßnahmen zu ergreifen. Diese Bauteilschutzmaßnahmen gehören wie die Abschirm-, Kontaminationsschutz- und Arbeitsschutzmaßnahmen zu den Subsystemen, welche im Kapitel 7.2 erläutert werden.

Ein Beispiel für eine Bauteilschutzmaßnahme ist der Schutz eines Bodenliners vor herabfallenden Betonbruchstücken. Dieser Schutz kann beispielsweise durch Verlegung von zusätzlichen Stahlplatten in der Fallzone erfolgen. Die Dicke der Stahlplatten ergibt sich aus Erfahrungswerten oder einem statischen Nachweis.

6.4.3 Vibrationen / Stoßbelastung

Bei der Wahl der Rückbauverfahren muss geprüft werden, ob Vibrationen / Stoßbelastungen in das Bauwerk eingeleitet werden dürfen. Die Prüfung erfolgt differenziert, d.h. es finden Unterscheidungen statt, wie hoch die Stoß- / Vibrationsbelastung maximal sein darf, da die Rückbauverfahren Stoßbelastungen / Vibrationen in unterschiedlichen Stärken ins Bauwerk einleiten. Die Differenzierung erfolgt nach Tabelle 6.5.

Die Anforderungsanalyse erfolgt bewusst unscharf, da hierdurch zum einen eine erleichterte Eingabe ermöglicht wird und zum anderen aufwendige, verfahrensseitige Vibrationsmessungen nicht erforderlich sind.

6.4.4 Bündige Bauteiltrennung

Eine bündige Bauteiltrennung zu einer bestehenden Wand oder zum Boden kann beispielsweise erforderlich sein, wenn ein Raum oder eine Zelle erschlossen und hierzu ein Durchbruch hergestellt werden soll. Wird dieser Durchbruch für Ein- und Ausschleusvorgänge verwendet und mit fahrbahren Geräten wie Stapler oder Bagger durchfahren, sollte die Zugänglichkeit des Raumes ermöglicht werden, ohne Höhendifferenzen überwinden zu müssen. Ob zusätzlich noch glatte Schnittkanten erforderlich sind, ist in dieser Eingabephase zunächst nicht relevant. Die Anforderungen an glatte Schnittkanten wird in Kapitel 6.4.8 erläutert.

Nicht alle Rückbauverfahren erlauben es, eine bündige Bauteiltrennung zu einer bestehenden Wand herzustellen. Je nach der prinzipiellen Bearbeitungsweise der Rückbauverfahren bleiben Stege oder Absätze stehen, die mit anderen Verfahren weiterbearbeitet werden müssen.

6.4.5 Funkenerzeugende Arbeitsmethoden

Für eine sichere Arbeitsweise ist es unter Umständen erforderlich, dass funkenerzeugende Arbeitsmethoden aufgrund der Sicherheitsbestimmungen und Schutzziele der Anlage und brandschutztechnischen Anforderungen keine Verwendung finden dürfen.

6.4.6 Prozesswasser

Für eine effiziente Bearbeitung des Bauteils benötigen einige Rückbauverfahren Wasser für den Bearbeitungsprozess. Dieses Prozesswasser wird je nach Verfahren in unterschiedlicher Menge benötigt, da das Wasser entweder als Trägermedium zum Ausspülen des Bohrkleins oder lediglich als Kühlwasser Verwendung findet. Eine offene Wasserhaltung dieses Kühl- und Spülwassers ist in kerntechnischen Anlagen je nach radiologischen Gegebenheiten nicht zulässig, so dass Spül- und Kühlwasser in einer Auffangwanne aufgefangen und einem geschlossenen Kreislauf zugeführt werden muss. Wasserauffangvorrichtungen sind den Subsystemen zugeordnet, welche in Kapitel 7.2 erläutert werden.

Wenn prinzipiell mit Verfahren gearbeitet werden kann, die Prozesswasser benötigen, muss aus radiologischer- und Entsorgungssicht geklärt werden, wie viel Prozesswasser höchstens für den Rückbau verwendet werden darf. Aus Entsorgungssicht besteht unter Umständen die Möglichkeit, das Prozesswasser im Raum zwischenzulagern und zum Teil oder ganz verdunsten zu lassen, so dass das trockene Bohrklein übrig bleibt. Damit lassen sich aufwendige und teure Trocknungsprozesse vermeiden. Je nach Wassermenge kann dieser Prozess einige Monate dauern.

Wenn Prozesswasser aus radiologischer Sicht unter keinen Umständen verwendet werden darf, sind alle Rückbauverfahren, die Wasser für den Prozess benötigen, auszuschließen. Damit wird verhindert, dass bei der Rückbautätigkeit eine Kontaminationsverschleppung oder der Transport von Radionukliden durch das Transportmedium Wasser erfolgt.

Beispielsweise reagiert das Radionuklid Tritium, welches in Siede- und Schwerwasserreaktoren vorkommt, mit Wasser zu Tritiumoxid oder überschwerem Wasser. Auf-

Staubklassen	Details
Staubfrei	Keine Staubbildung
Schwach	Staub ist deutlich mit dem Auge sichtbar
Mittel	Sichtbar dichter Staub
Stark	Hohe Staubentwicklung ohne Beeinträchtigung der Sicht
Sehr stark	Staubentwicklung bis hin zu Beeinträchtigung der Sicht

Tabelle 6.6: Klassifizierung der Staubbelastung am Arbeitsplatz

grund seines hohen Diffusionsvermögens ist überschweres Wasser in gasförmiger Form für Lebewesen besonders gefährlich, da es sämtliche Organe bei Exposition gleichmäßig mit radioaktiver Strahlung (β -Strahler) belastet. Die Ausbreitung gasförmigen überschweren Wassers ist kaum zu kontrollieren und es existiert auch praktisch keine Möglichkeit, normales Wasser von Tritiumoxid zu trennen⁵. Aus den genannten Gründen ist der Einsatz von Prozesswasser in Gebäudestrukturen, die Tritium enthalten können, nicht zu empfehlen, auch im Hinblick darauf, dass dieser Wassereinsatz gegen das ALARA-Prinzip verstößt.

6.4.7 Staubemissionen

Bei der Bearbeitung eines Bauteils kann es bei Verwendung von bestimmten Rückbauverfahren zu Staubemissionen kommen. Durch diese Staubemissionen können die umliegenden Gebäudestrukturen kontaminiert werden, falls kontaminiertes Material abgetragen wird. Diese Kontamination gilt es durch passive oder aktive Schutzmaßnahmen wie Staubabsaugung und/oder Einhausungen zu vermeiden oder zu begrenzen. Das vor Ort tätige Personal muss bei einer Staubausbreitung Schutzanzüge tragen, um eine Inkooperation von kontaminierten Staub zu verhindern. Die Staubausbreitung ist auch deshalb zu begrenzen, da durch Staubemissionen bei einem fernbedienten Rückbau die Medientechnik in Mitleidenschaft gezogen wird. Hierbei kommt es zu Verunreinigungen der Kameralinsen, welche dann in zu definierenden Zeitabständen gereinigt werden müssten.

Aus diesen Gründen muss zunächst geprüft werden, ob Rückbauverfahren, die Staub emittieren, Verwendung finden dürfen. Hierzu wird auch geklärt, ob diese Staubausbreitung mit einer Staubabsauganlage eingedämmt oder verhindert werden soll. Die unterschiedlichen Staubabsauganlagen gehören zu den Subsystemen, welche in Kapitel 7.2 erläutert werden. Ein weiterer Aspekt bei der Wahl einer Staubabsauganlage ist der benötigte Platzbedarf und der vorgesehene Aufstellungsort der Anlage. Es ist zu prüfen, ob eine solche Anlage aus Platzgründen aufgestellt werden kann. Des Weiteren muss der Luftvolumenstrom der Anlage bestimmt werden. Hierbei ist zu unterscheiden, ob die Anlage lediglich den entstehenden Staub oder auch Abbruchmaterial absaugen soll. Die Größe des Raumes / der Zelle bestimmt zudem den maximal zulässigen Luftvolumenstrom der Sauganlage, da die Räume und Zellen in kerntechnischer Anlagen mit einem Unterdruck beaufschlagt sind und dieser durch eine Sauganlage beeinträchtigt

⁵gefunden in Wikipedia, die freie Enzyklopädie: <http://de.wikipedia.org/wiki/Tritiumoxid>

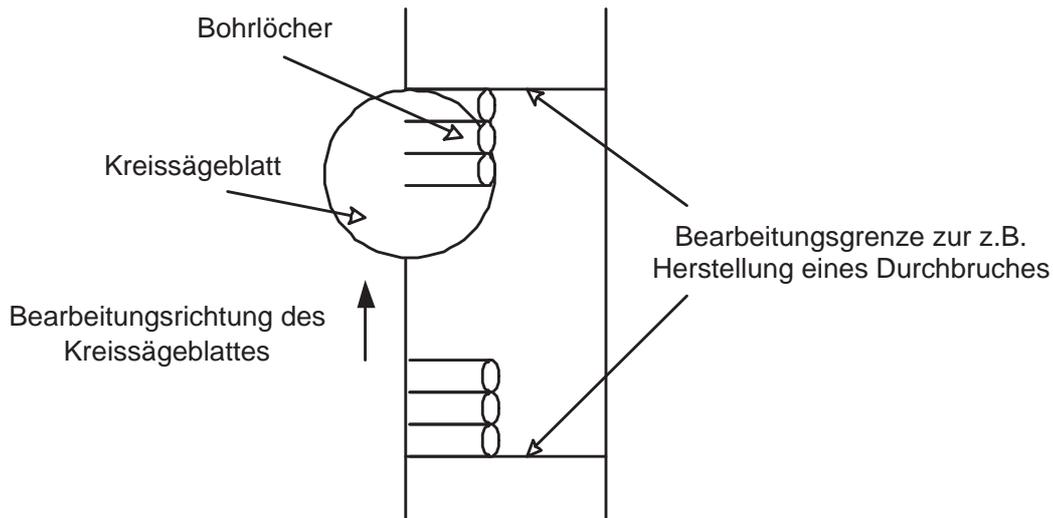


Abbildung 6.6: Elimination von Überschnitten durch Kernbohrungen

werden kann.

Die lüftungstechnischen Anlagen in kerntechnischen Anlagen sind beim Rückbau mit Entstehung von Staubemissionen einer besonderen Belastung ausgesetzt. Deshalb wird beim Einsatz einer Staubabsauganlage deren höchst zulässiger Reststaubgehalt angegeben und überprüft, ob dieser in einem nach den Nutzerangaben zulässigen Bereich liegt.

Zudem wird in diesem Schritt der Befragung darauf eingegangen, ab welcher Staubbelastung nach Tabelle 6.6 ein erhöhter Filterwechsel im betrachteten Raum / Zelle erforderlich ist und um welchen Faktor dieser höher ist als der im normalen Betrieb. Alternativ besteht die Möglichkeit, den zeitlichen Abstand des Filterwechsels anzugeben. Daran schließen sich Fragen an, wie viele Filter gewechselt werden müssen und wie hoch die Kosten für einen einmaligen Filteraustausch sind, um so die zusätzliche Zeit, die zusätzlichen Kosten und die Kollektivdosis des Personals für diese Maßnahme zu ermitteln (vgl. Kapitel 8.4.19).

6.4.8 Glatte Schnittkanten

Wenn ein Teilrückbau eines Bauteils vorgesehen ist, können Anforderungen an die Schnittkanten definiert werden. Gründe hierfür sind, dass z.B. an Durchbruchskanten Türen oder Tore angebracht oder in weiteren, späteren Rückbausritten die Durchbruchskanten dekontaminiert werden müssen.

Die Abfrage der glatten Schnittkanten beinhaltet zunächst, bis in welche Bauwerkstiefe diese gefordert und ob diese glatten Schnittkanten auf beiden Seiten des Bauteils erforderlich sind.

Je nach Bauteillage und verwendetem Rückbauverfahren werden bei der Herstellung von glatten Schnittkanten Überschnitte erzeugt, die unter Umständen nicht zulässig sind. Ein Überschnitt ist eine Bearbeitung über die eigentlichen Abmessungsgrenzen hinaus und entsteht beispielsweise bei der Verwendung einer Kreissäge (vgl. Abbildung 6.6). Soll dieser elimiert werden, muss grundsätzlich entweder mit einem Verfahren

gearbeitet werden, die keine Überschnitte erzeugt, oder es sind an den Bearbeitungsgrenzen wie z.B. Durchbruchsecken Bohrlöcher zu setzen.

6.4.9 Trennungsprinzipien der zurückzubauenden Bauteile

Die Planung des Rückbaus erfordert von den Fachplanern auch eine Betrachtung, wie das kontaminierte / aktivierte Material entsorgt werden soll. Entscheidend ist weiter, wie das Abbruchmaterial nach dem Abbau des betrachteten Bauteils vorliegen soll.

Hierzu werden Fragen gestellt, ob das Abbruchmaterial möglichst großstückig oder möglichst kleinstückig vorliegen soll. Bei möglichst großstückigem Abbruchmaterial werden diejenigen Verfahren favorisiert, welche Betonkuben herstellen können. Diese Verfahren sind vor allem die Sägeverfahren. Bei möglichst kleinstückigem Abbruchmaterial werden diejenigen Verfahren bevorzugt, welche Betonbruchteile herstellen, die dann abgesaugt und in Fässer oder Container geladen werden können, wie z.B. das Fräsen oder Meißeln.

Des weiteren ist zu klären, ob bei einem kleinstückigen Betonabtrag das Abbruchmaterial nebst dem Staub abgesaugt werden soll oder eine reine Staubabsaugung geplant ist. Bei einer zusätzlichen Materialabsaugung sind Absauganlagen mit einem höheren Luftvolumenstrom und einem höherem Platzbedarf erforderlich. Ein entscheidendes Kriterium stellt der Aufstellungsort solcher Anlagen dar, da diese, wenn zwischen der Absaugungsstelle und der Sauganlage eine zu große Entfernung oder eine große Höhendifferenz überwunden werden muss, nicht effektiv einsetzbar sind.

Ein weiterer Betrachtungspunkt ist die Trennung des aktiven / kontaminierten vom restlichen Material. Hierbei ist festzulegen, ob der aktive / kontaminierte Beton beim Rückbau vom Restbeton vor Ort getrennt werden soll. Es folgt eine weitere Unterscheidung, ob eine Trennung in Einbaulage oder erst nach dem Ausbau vollzogen werden soll. Hintergrund ist, dass einige Rückbauverfahren die Trennung in Einbaulage nicht durchführen können. Beispiel hierfür sind die Sägeverfahren, die das Bauwerk in seiner kompletten Dicke durchtrennen. Die hergestellten Blöcke werden anschließend gezogen und einer Nachbehandlung zugeführt, d.h. die Dekontamination bzw. der Abtrag des aktivierten Teils des Betonblocks erfolgt nachgeschaltet mit dem selben oder mit anderen Verfahren. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den aktivierten / kontaminierten Beton vom Restbeton nicht vor Ort zu trennen. Bei der Wahl dieser Alternative wird der Beton transportfähig gemacht, zu einem anderen Ort transportiert und dort dekontaminiert bzw. die aktiven von den inaktiven Bestandteilen getrennt, zerkleinert und verpackt.

In den meisten Situationen ist beim Rückbau eine Querkontamination unzulässig. Sollten besondere Begebenheiten vorliegen und in begründeten Fällen eine Querkontamination genehmigt werden, wird dies im Anforderungskatalog erfasst. Damit ergeben sich weitere Möglichkeiten der Auswahl derjenigen Rückbauverfahren, die bei der Bearbeitung des Bauteils eine Querkontamination verursachen.

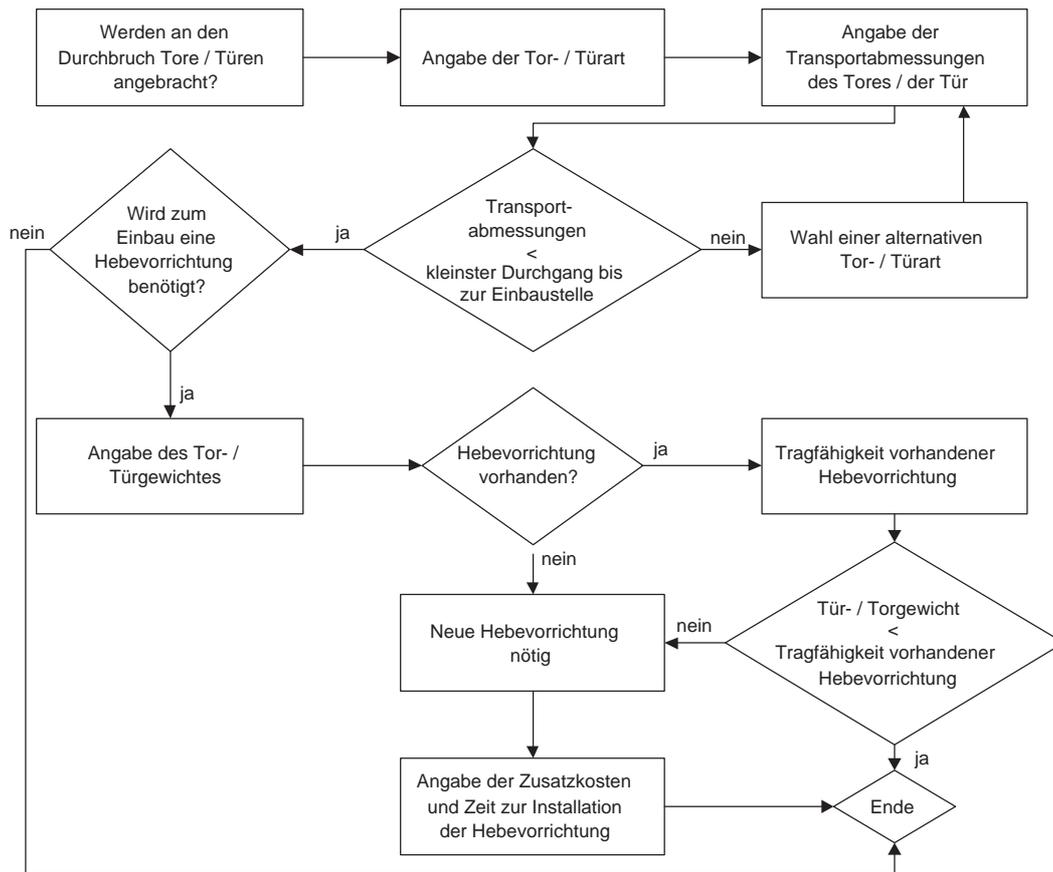


Abbildung 6.7: Flussbild zur Tor- / Türabfrage

6.5 Erfassung zusätzlicher Teile

Unter der Erfassung zusätzlicher Teile sind Maßnahmen zu verstehen, die in einem direkten Zusammenhang mit dem Rückbau des betreffenden Bauteils stehen. Zu diesen Maßnahmen gehören das Anbringen von Türen oder Toren bei einem Teilrückbau, insbesondere bei der Erstellung von Durchbrüchen zur Erschließung einer Zelle / eines Raumes; das zusätzliche Anbringen von Lichtquellen für eine verbesserte Ausleuchtung des Arbeitsplatzes; die Installation von Kameratechnik, falls ein fernbedienter oder semi-fernbedienter Rückbau geplant ist; der Umbau oder die Neuinstallation von lüftungstechnischen Einrichtungen, wenn beispielsweise Brandschutzzonen geändert werden.

6.5.1 Türen und Tore

Bei der Herstellung von Durchbrüchen kann es vorkommen, dass aus unterschiedlichen Gründen Tore oder Türen an den Durchbruch angebracht werden müssen. (Abschirm-)Tore werden bei größeren Durchbrüchen verwendet, wenn der Durchbruch als Großteilschleuse verwendet wird. Durchbrüche, die durch (Abschirm-)Türen verschlossen werden, kommen oftmals dann zum Einsatz, wenn ein kurzzeitiger Personaleinsatz erforderlich ist. Weitere Differenzierungen bzgl. der Toren- oder Türenart ergeben sich dadurch, ob die geplanten Türen oder Tore feuerschutz- oder einbruchhemmende Eigenschaften besitzen müssen.

Abfragen	Daten
Investitionskosten der Lichtquellen	K_{InvLi} [Euro]
Dauer der Installation der Lichtquellen	T_{InsLi} [Tage]
Durchschnittliche Personalstärke	$n_{PInstLi}$ [Mann]
Wartezeit zwischen Beginn der Lichtquelleninstallation und Beginn der Installation der Medientechnik	Δ_{LiMe} [Tage]
Wartezeit zwischen Beginn der Lichtquelleninstallation und Beginn der Installation der Lüftungstechnik	Δ_{LiLu} [Tage]

Tabelle 6.7: Abfragegang zur Lichtquelleninstallation

Je nach geplanter Tür- / Torausführung werden unterschiedliche Transportmittel aufgrund des Tür- / Torgewichts benötigt. Im Anforderungskatalog wird darauf eingegangen, welche Transportabmessungen die Türen / Tore besitzen, um zu prüfen, ob die Transportabmessungen größer oder kleiner sind als der kleinste Durchgang zur Einbaustelle. Des Weiteren findet eine Abfrage statt, ob die Türen / Tore mit Hebemitteln eingebaut werden müssen und ob diese Hebemittel vorhanden sind oder besorgt werden müssen. Dieser Abfragebaum ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

Falls neue Hebemittel benötigt werden, müssen der Zeitaufwand für deren Installation und die zusätzlichen Kosten ermittelt werden. Die Kostenermittlung erfolgt in Kapitel 8.4.20.

6.5.2 Lichtquellen

Bei vielen Rückbaumaßnahmen in geschlossenen Räumen oder Zellen reicht das zur Verfügung stehende, künstlich erzeugte Licht nicht aus, um den Arbeitsbereich zufriedenstellend auszuleuchten. Hinzu kommt, dass in vielen Zellen oder Räumen nur künstliches Licht zur Verfügung steht. Beim Rückbau dieser Gebäudeteile ist es daher oftmals nötig, zusätzliche Lichtquellen im Arbeitsbereich bereitzustellen. Dies gilt insbesondere dann, wenn fernbedient oder semi-fernbedient gearbeitet werden muss. Dabei gehört das Anbringen von zusätzlichen Lichtquellen sowie die Installation der Medien- und Lüftungstechnik zu den vorbereitenden Maßnahmen des Rückbaus.

Im Anforderungskatalog wurde deshalb die Frage, ob zusätzliches künstliches Licht benötigt wird, aufgenommen. Diese Informationen werden in der Entscheidungskomponente mit verarbeitet, da durch die Bereitstellung der zusätzlichen Lichtquellen ein erhöhter Arbeitseinsatz und höhere Kosten entstehen (vgl. Tabelle 6.7).

Falls zusätzliche Lichtquellen bereitgestellt werden müssen, folgen im Anforderungskatalog Fragen bezüglich der Zeit und der Mannstunden, die für die Installation dieser Lichtquellen aufgewendet werden müssen, sowie über die Höhe der Investitionskosten dieser Maßnahmen. Diese Kostenermittlung ist ebenfalls in Kapitel 8.4.20 dargestellt.

Um die Gesamtzeit für die Installationen der Licht-, Medien- und Lüftungstechnik zu ermitteln, ist weiterhin anzugeben, welche Wartezeiten zwischen dem Beginn der unterschiedlichen Maßnahmen einzuhalten sind. Falls der Beginn der Installation der Medien- oder Lüftungstechnik vor der Lichttechnik erfolgt, ist bei den Wartezeiten der Wert 0 einzutragen.

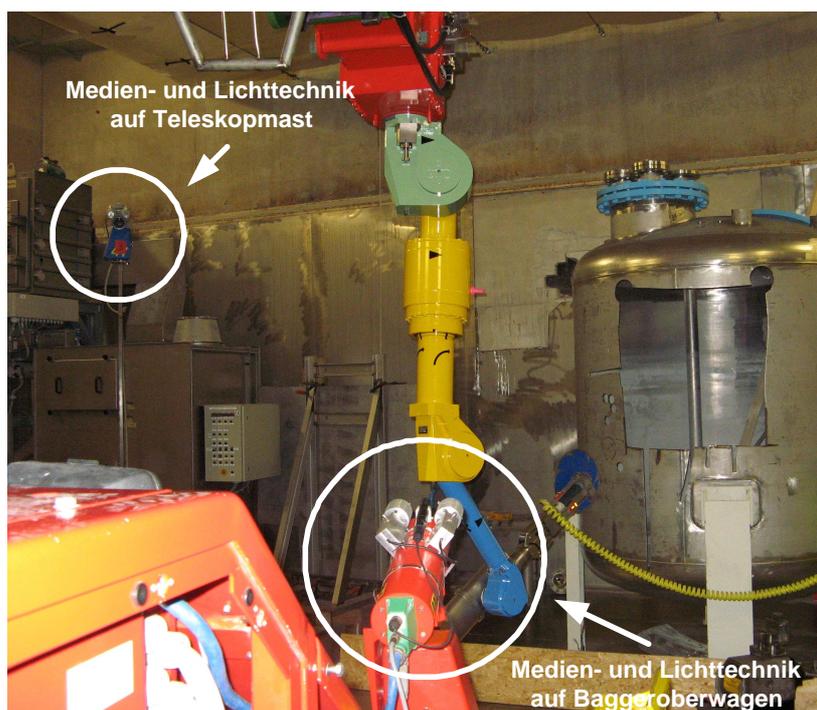


Abbildung 6.8: Beispiel eines fernbedienten Arbeitsplatzes mit Licht- und Medientechnik [Quelle: WAK]

6.5.3 Medientechnik

Bei einer fernbedienten oder semi-fernbedienten Bearbeitung des Bauteils müssen Kameras so um den Arbeitsbereich aufgestellt werden, dass diese aus jedem Blickwinkel eine ausreichende Sicht auf die Bearbeitungsgeräte und den zurückzubauenden Teil des Bauteils ermöglichen. Des Weiteren sind die Kameras so zu positionieren, dass die Arbeiten am Bauteil dadurch nicht behindert werden. Die Kamerabilder werden bei der Bearbeitung zum Leitstand übertragen, aus dem die Geräte gesteuert werden. Einen Arbeitsplatz mit zusätzlicher Licht- und Medieninstallation zeigt Abbildung 6.8.

Im Anforderungskatalog werden die zusätzlichen Zeiten und Kosten für die Installation der Kameratechnik aufgenommen und in der Entscheidungskomponente verarbeitet (vgl. Kapitel 8.4.20). Die Fragen bezüglich der Installation der Medientechnik zeigt Tabelle 6.8 und sind identisch aufgebaut wie die Fragen zur Lichtquelleninstallation. Falls der Beginn der Installation der Licht- oder Lüftungstechnik vor der Medientechnik erfolgt, ist bei den Wartezeiten der Wert 0 einzutragen.

6.5.4 Lüftungstechnische Einrichtungen

Unter Umständen ist es bei der Bearbeitung des Bauteils erforderlich, die lüftungstechnischen Einrichtungen im Vorfeld umzubauen oder neue lüftungstechnische Einrichtungen zu installieren. Dies gilt insbesondere dann, wenn Absauganlagen mit einem hohen Luftvolumenstrom in der betreffenden Zelle / Raum betrieben werden sollen. Der hohe Luftvolumenstrom führt zu einem dazu, dass ein in einer Zelle notwendiger Unterdruck eventuell nicht mehr gewährleistet werden kann und/oder dass sich der Raum aufgrund des zu geringen Luftaustausches bei der Bearbeitung, bedingt durch

Abfragen	Daten
Investitionskosten der Medientechnik	K_{InvMe} [Euro]
Dauer der Installation der Medientechnik	T_{InsMe} [Tage]
Durchschnittliche Personalstärke	$n_{PInstMe}$ [Mann]
Wartezeit zwischen Beginn der Medientechnikinstallation und Beginn der Installation der Lichttechnik	Δ_{MeLi} [Tage]
Wartezeit zwischen Beginn der Medientechnikinstallation und Beginn der Installation der Lüftungstechnik	Δ_{MeLu} [Tage]

Tabelle 6.8: Abfragegang zur Medientechnikinstallation

Abfragen	Daten
Investitionskosten der Lüftungstechnik	K_{InvLu} [Euro]
Dauer der Installation der Lüftungstechnik	T_{InsLu} [Tage]
Durchschnittliche Personalstärke	$n_{PInstLu}$ [Mann]
Wartezeit zwischen Beginn der Lüftungstechnikinstallation und Beginn der Installation der Lichttechnik	Δ_{LuLi} [Tage]
Wartezeit zwischen Beginn der Lüftungstechnikinstallation und Beginn der Installation der Medientechnik	Δ_{LuMe} [Tage]

Tabelle 6.9: Abfragegang zur Lüftungstechnikinstallation

die Rückbaugerätschaften, aufheizt.

Die Neuinstallation oder der Umbau von lüftungstechnischen Einrichtungen ist auch dann erforderlich, wenn mit dem Rückbau von Gebäudeteilen eine Verlegung der Brand-schutzbereiche einhergeht.

Die Zeiten und Kosten für die Modifizierung oder Neuinstallation von lüftungstechnischen Anlagen werden von den Systemnutzern in den Anforderungskatalog eingetragen und in der Entscheidungskomponente (Kap. 8.4.20) mit berücksichtigt. Der Abfragegang der Installation der Licht- und Medientechnik ist dem der lüftungstechnischen Einrichtung ähnlich (vgl. Tabelle 6.9). Falls der Beginn der Installation der Licht- oder Medientechnik vor der Lüftungstechnik erfolgt, ist auch hier bei den jeweiligen Wartezeiten der Wert 0 einzutragen.

6.6 Abweichung vom üblichen Betriebsablauf

Die Abweichungen vom üblichen Betriebsablauf umfassen alle Maßnahmen, die zusätzlich zum üblichen Betriebsablauf getroffen werden müssen. Aufgrund des beim Rückbau höheren Personalaufwands müssen unter Umständen neue Sozialeinrichtungen wie Toiletten, Umkleiden und Aufenthaltsräume geplant und gebaut oder bestehende erweitert werden.

In den kerntechnischen Bereichen, die zum Kontroll- oder Sperrbereich gehören, müssen eventuell neue Strahlenschutzeinrichtungen installiert werden. Wenn fernbedient oder semi-fernbedient gearbeitet werden soll, ist zu entscheiden, ob vorhandene Leitstände genutzt werden können oder neue gebaut werden sollen.

Für den Systemnutzer steht bei der Eingabe auch die Möglichkeit offen, zusätzliche anlagenspezifische Einrichtungen einzugeben.

Um die Kosten dieser Einrichtungen zu erfassen, trägt der Systemnutzer die Kosten der einzelnen Einrichtung in den Anforderungskatalog ein. Diese Kosten werden dann pauschal in der Entscheidungskomponente (Kapitel 8.4.21) mit erfasst.

Die Wissenskomponente bildet den Rahmen für die Erfassung des Wissens über die Rückbauverfahren und die Subsysteme. Dabei werden die unterschiedlichen Rückbauverfahren zunächst nach ihrem Leistungsspektrum untergliedert, d.h. es wird dargestellt, für welche Einsatzzwecke welches Verfahren verwendet werden kann. Des Weiteren wird die Vorgehensweise der Datenaufnahme beschrieben und zusammengestellt, welche Daten aufzunehmen sind, die dann in der Entscheidungskomponente weiterverarbeitet werden.

So sind neben den Daten über Abmessungen, Gewicht, Leistung und Prozessparameter auch die Daten der Subsysteme wie Gerüste, Absauganlagen, Wasserauffang- und Abschirmvorrichtungen etc. aufzunehmen, da diese in der Entscheidungskomponente ebenfalls mit berücksichtigt werden und durch die Verwendung dieser Subsysteme beispielsweise Prozessparameter der Rückbauverfahren beeinflusst werden.

7.1 Rückbauverfahren

7.1.1 Leistungsspektrum

Das Leistungsspektrum der Verfahren bildet diejenigen Aufgaben ab, welche mit einem bestimmten Verfahren durchgeführt werden können und welche weiteren Aufgaben bei der Nutzung einzelner Verfahren zusätzlich bewältigt werden müssen (Erzeugung von Überschnitten, Notwendigkeit von Startlöchern). Zudem sind Leistungsspektrumpunkte definiert, die, je nach Anforderungsdefinition, zu einem Ausschluss von Verfahren führen können (Notwendigkeit der beidseitigen Zugänglichkeit eines Bauteils, Verursachung von Querkontamination, fernbediente Bearbeitung). Je nach der geforderten Aufgabenstellung und den damit verbundenen Zielkriterien kann der Rückbau mit nur einem Verfahren durchgeführt werden oder es kommt eine Verfahrenskombination zum Einsatz. Die prinzipielle Eignung der Verfahren für die definierten und gestellten Aufgaben zeigt Tabelle 7.1. Eine weitere Unterscheidung nach Verfahrenstyp (z.B. Meissel- und Fräskopfgröße, Blattdurchmesser, Lanzenquerschnitt, etc.) erfolgt differenziert.

Rückbauaufgaben	Einsetzbare Verfahren
Dekontamination	Fräsen, Frässhaver, Hochdruckwasserstrahl, Kugelstrahlen, Mikrowellentechnik, Sprengen Schneidladung (in Sonderfällen)
Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage	Fräsen, Frässhaver, Hochdruckwasserstrahl, Induktionsstromverfahren, Hochstromverfahren, Meißeln, Mikrowellentechnik
Vorabausbau von Stahleinbauteilen	Autogenes Brennschneiden, Kernbohren (nass+trocken), Kettensägen, Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden, Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden, Plasmaschneiden, Pulverschneidbrennen, Sauerstoffkernlanzen, Scherschneiden, Sprengen Schneidladung (in Sonderfällen), Tauchkreissägen, Trennschleifen, Wasserabrasivstrahlschneiden
Rückbau von Bewehrung	Abbruchzangen, Autogenes Brennschneiden, Fräsen (bis zu einer bestimmten Bewehrungsstärke), Hydraulisches Spalten, Kernbohren (nass), Kettensägen, Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden, Kreissägen, Laserstrahlschneiden, Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden, Nibbler, Meißeln (bis zu einer bestimmten Bewehrungsstärke), Plasmaschneiden, Pulverschneidbrennen, Sauerstoffkernlanzen, Scherschneiden, Seilsägen (nass+trocken), Tauchkreissägen, Tauchseilsägen (nass+trocken), Trennschleifen, Wasserabrasivstrahlschneiden
Betonrückbau	Abbruchzangen, Fräsen, Hochdruckwasserstrahl, Sauerstoffkernlanzen, Expansivmittel, Hydraulisches Spalten, Kernbohren (nass), Kettensägen, Kreissägen, Laserstrahlschneiden (in Ausnahmefällen), Pulverschneidbrennen, Meißeln, Seilsägen (nass+trocken), Sprengen Explosiv, Tauchkreissägen, Tauchseilsägen (nass+trocken), Wasserabrasivstrahlschneiden
Herstellung von Aussparungen	Fräsen, Meißeln
Erzeugung von glatten Schnittkanten	Kettensägen, Kreissägen, Laserstrahlschneiden, Pulverschneidbrennen, Seilsägen (nass+trocken), Tauchkreissägen, Tauchseilsägen (nass+trocken), Wasserabrasivstrahlschneiden
Bearbeitung an der Luft	Abbruchzangen, Autogenes Brennschneiden, Expansivmittel, Fräsen, Frässhaver, Hochdruckwasserstrahl, Hochstromverfahren, Hydraulisches Fugenausdrücken, Hydraulisches Spalten, Induktionsstromverfahren, Kernbohren (nass+trocken), Kettensägen, Kreissägen, Kugelstrahlen, Laserstrahlschneiden, Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden, Meißeln, Mikrowellentechnik, Nibbler, Plasmaschneiden, Pulverschneidbrennen, Sauerstoffkernlanzen, Scherschneiden, Seilsägen (nass+trocken), Sprengen Explosiv, Sprengen Schneidladung, Tauchkreissägen, Tauchseilsägen (nass+trocken), Trennschleifen, Wasserabrasivstrahlschneiden
Bearbeitung unter Wasser	Abbruchzangen, Autogenes Brennschneiden, Hydraulisches Spalten, Kettensägen, Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden, Kreissägen, Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden, Plasmaschneiden, Sauerstoffkernlanzen, Scherschneiden, Seilsägen (nass), Sprengen Explosiv, Sprengen Schneidladung, Tauchkreissägen, Tauchseilsägen (nass), Trennschleifen, Wasserabrasivstrahlschneiden
Herstellen von Betonkuben	Kernbohren (nass), Kettensägen, Kreissägen, Sauerstoffkernlanzen, Seilsägen (nass+trocken), Tauchkreissägen, Tauchseilsägen (nass+trocken)

Rückbauaufgaben	Einsetzbare Verfahren
Bündige Trennung eines Bauteils zu einer bestehenden Wand	Fräsen, Kettensägen, Kreissägen, Laserstrahlschneiden, Meißeln, Pulverschneidbrennen, Tauchkreissägen, Wasserabrasivstrahlschneiden
Vor-Ort-Trennung von aktiviertem und nicht aktiviertem Beton	Fräsen, Frässhaver (Tiefe = Betondeckung), Hochdruckwasserstrahl, Meißeln, Mikrowellentechnik
Verursachung von Querkontamination	Kernbohren (nass), Kettensägen, Kreissägen, Seilsägen (nass), Sprengen Explosiv, Sprengen Schneidladung, Tauchkreissägen, Tauchseilsägen (nass)
Notwendigkeit der beidseitigen Zugänglichkeit eines Bauteils	Abbruchzangen, Seilsägen (nass+trocken), Sprengen Schneidladung (in Sonderfällen)
Erzeugung von Überschnitten	Kreissägen
Fernbediente Bearbeitung	Abbruchzangen, Autogenes Brennschneiden, Fräsen, Frässhaver, Hochdruckwasserstrahl, Hydraulisches Fugenausdrücken, Hydraulisches Spalten, Induktionsstromverfahren, Hochstromverfahren, Kernbohren (nass+trocken), Kettensägen, Kreissägen, Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden, Laserstrahlschneiden, Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden, Meißeln, Mikrowellentechnik, Nibbler, Plasmaschneiden, Pulverschneidbrennen, Scherschneiden, Sprengen Schneidladung, Tauchseilsägen (nass+trocken), Trennschleifen, Wasserabrasivstrahlschneiden
Rückbau von Metallauskleidungen	Autogenes Brennschneiden, Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden, Laserstrahlschneiden, Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden, Plasmaschneiden, Pulverschneidbrennen, Nibbler, Sauerstoffkernlanzen, Sprengen Schneidladung, Trennschleifen, Wasserabrasivstrahlschneiden
Asbestausbau	Hydraulisches Fugenausdrücken, Kernbohren (nass+trocken), Seilsäge (Zirkelsäge), Tauchkreissägen,
Erzeugung von Startlöchern	Kernbohren (nass+trocken), Sauerstoffkernlanzen,
Notwendigkeit von Startlöchern	Expansivmittel, Hochstromverfahren, Hydraulisches Spalten, Seilsägen (nass,trocken+Zirkelsägen), Sprengen Explosiv, Tauchkreissägen, Tauchseilsägen (nass+trocken)

Tabelle 7.1: Aufgabenspektrum und prinzipiell einsetzbare Verfahren

Somit wird deutlich, bei welchen Arbeitsschritten bzw. Tätigkeiten die unterschiedlichen Rückbauverfahren zum Einsatz kommen können. In der Anforderungskomponente werden diese Arbeitsschritte definiert, wobei bauteilspezifisch zwangsläufig nicht alle Leistungsspektrumspunkte im Anforderungskatalog gefordert werden. Erst durch diesen Schritt wird es in der Entscheidungskomponente möglich, die Anforderungen der Anforderungskomponente mit den unterschiedlichen Leistungsspektren der Rückbauverfahren zu verknüpfen und Verfahrenskombinationen zu bilden.

Dekontamination

Der Arbeitsschritt „Dekontamination“ beschreibt einen Oberflächenabtrag des Betons von einigen Millimetern bis zu wenigen Zentimetern. In der Anforderungskomponente wurde festgelegt, ob eine Dekontamination des Betons erfolgen soll. Zur Klassifizierung der Rückbauverfahren wird für jedes Verfahren angegeben, ob mit diesem eine Dekon-



Abbildung 7.1: Oberflächendekontamination mit einem Wandshaver-Stapler-System [Quelle: WAK]

tamination des Bauteils durchgeführt werden kann. Wenn ein Verfahren zu Dekontaminationszwecken einsetzbar ist, wird dies in der Wissenskomponente mit dem Ausdruck $L_{Deko,tech_i} = true$ berücksichtigt. Ansonsten folgt der Ausdruck $L_{Deko,tech_i} = false$, wobei $L_{Deko,tech_i}$ die Leistungskomponente des Verfahrens i widerspiegelt (Abbildung 7.1 zeigt beispielhaft eine Dekontamination mit einem Wandshaver).

Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage

Zur Freilegung von Bewehrung, beispielsweise bei einer in Situ-Trennung von Beton und Stahl, wird zunächst ein Oberflächenabtrag des Betons bis zur 1. Bewehrungslage durchgeführt. Diejenigen Verfahren, die diese Leistung erbringen können, erhalten in ihrem Leistungsspektrumspunkt den Ausdruck $L_{Rueck-1.Bewl,tech_i} = true$, alle anderen den Ausdruck $L_{Rueck-1.Bewl,tech_i} = false$ (Abbildung 7.2 zeigt beispielhaft einen Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage mit Hochdruckwasserstrahltechnik).

Vorabausbau von Stahleinbauteilen

Zweck der Aufgabe „Vorabausbau von Stahleinbauteilen“ ist es, die im Betonverbund vorhandenen Einbauteile in einem gesonderten Schritt vor dem Betonrückbau auszubauen. Damit besteht die Möglichkeit, diese Metallkomponenten vom Beton getrennt zu entsorgen oder einer definierten, nachgeschalteten Dekontamination zuzuführen, um Endlager- und Entsorgungskosten einzusparen. Zur Bewältigung dieser Aufgabe muss geprüft werden, welche Verfahren für diesen Aufgabentyp geeignet sind. Dies wird mit dem Ausdruck $L_{AusbauEinbauteile,tech_i} = true$ definiert. Diejenigen Verfahren, die dieses Leistungsbild nicht erbringen können, werden mit dem Ausdruck $L_{AusbauEinbauteile,tech_i} = false$ versehen.



Abbildung 7.2: Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage mit Hochdruckwasserstrahlen (WOMA, 2004)

Rückbau von Bewehrung

Der Bearbeitungspunkt „Rückbau von Bewehrung“ dient in erster Linie der Ergänzung des Bearbeitungspunktes „Betonrückbau“. Hintergrund ist, dass einige Verfahren zwar Bewehrung, aber keinen Beton rückbauen können. Des weiteren existieren Verfahren, die zwar Beton rückbauen, die Trennung von Bewehrungsstahl aber bis zu einem bestimmten maximalen Durchmesser begrenzt ist. Der Leistungsspektrumspunkt Rückbau von Bewehrung erhält den Ausdruck $L_{RuekBew,techi} = true$ für alle Verfahren, die prinzipiell Bewehrung rückbauen können, und den Ausdruck $L_{RuekBew,techi} = false$ für alle anderen.

Betonrückbau

Der Betonrückbau umfasst die Tätigkeiten, die mit dem eigentlichen Rückbau des Betons einhergehen. Dabei wird aufgrund der definierten Tätigkeit „Rückbau von Bewehrung“ der Bewehrungsrückbau, der je nach Rückbauverfahren sowohl separat als auch integriert mit dem Betonrückbau durchgeführt werden kann, nicht mit betrachtet. Verfahren, die Beton rückbauen können, erhalten in ihrem Leistungsspektrumspunkt den Ausdruck $L_{RuekBet,techi} = true$. Diejenigen Verfahren, die für einen Betonrückbau nicht geeignet sind, wie z.B. Verfahren, die lediglich Metalle schneiden können, erhalten den Ausdruck $L_{RuekBet,techi} = false$.

Herstellung von Aussparungen

Die Herstellung von Aussparungen ist eine Unterkategorie zum Betonrückbau. Hiermit soll festgelegt werden, ob mit dem betrachteten Verfahren eine Aussparungsherstellung

möglich ist, wenn dies gefordert wurde. Der Ausdruck für das Leistungsspektrum Ausparungsherstellung $L_{Aus,tech_i}$ wird bei den Verfahren auf *true* gesetzt, mit denen dies möglich ist, bei den anderen auf *false*.

Erzeugung von glatten Schnittkanten

Glatte Schnittkanten können nur von Schneid- und Sägeverfahren hergestellt werden. Diese erhalten in ihrem Leistungsspektrum den Bewertungsausdruck $L_{glSchnittk,tech_i} = true$. Alle anderen Verfahren werden in diesem Leistungsspektrumspunkt mit $L_{glSchnittk,tech_i} = false$ bewertet.

Bearbeitung an der Luft

Der Leistungsspektrumspunkt „Bearbeitung an der Luft“ bildet eine grundsätzliche Voraussetzung für den Einsatz eines Verfahrens. Ist das betrachtete Bauteil an der Luft und kann das Verfahren an der Atmosphäre arbeiten ($L_{Atm,tech_i} = true$), kann das Verfahren grundsätzlich weiter in Betracht gezogen werden. Verfahren, die nicht an Atmosphäre arbeiten können ($L_{Atm,tech_i} = false$), werden nicht weiter betrachtet.

Bearbeitung unter Wasser

Der Leistungsspektrumspunkt „Bearbeitung unter Wasser“ ist analog zur „Bearbeitung an der Luft“ definiert. Hierbei erhält das betrachtete Verfahren den Ausdruck $L_{Wasser,tech_i} = true$, falls es unter Wasser arbeiten kann, falls nicht, den Ausdruck $L_{Wasser,tech_i} = false$. Es existiert keine direkte Verknüpfung bzw. Verbindung mit der Bearbeitung an der Luft, d.h. wenn ein Verfahren unter Wasser arbeiten kann, kann es unter Umständen auch an der Luft arbeiten und umgekehrt.

Herstellen von Betonkuben

Das Herstellen von Betonkuben bedingt - der Forderung im Anforderungskatalog nach - einen möglichst großstückigen Betonabtrag oder eine möglichst geringe Rückbaumasse. Müssen diese Forderungen erfüllt sein, muss das Rückbauverfahren die Herstellung von Betonkuben ermöglichen. Diejenigen Verfahren, die diesen Anforderungen genügen, erhalten im Leistungsspektrumspunkt den Ausdruck $L_{Kuben,tech_i} = true$, alle anderen den Ausdruck $L_{Kuben,tech_i} = false$.

Bündige Trennung eines Bauteils zu einer bestehenden Wand

Der Leistungsspektrumspunkt „Bündige Trennung eines Bauteils zu einer bestehenden Wand“ schließt auch die bündige Trennung einer Wand zum bestehenden Boden bzw. der Decke mit ein. Ziel ist u.a., zu erschließende Räume oder Zellen ohne Höhendifferenzen befahren zu können, durch eine bündige Trennung von Wand und Decke zwischen den Räumen Kranbahnschienen für Ein- und Ausschleusvorgänge zu installieren, Störkanten bei der weiteren Bearbeitung eines Bauteils möglichst zu eliminieren etc. Verfahren, die dieser Anforderung genügen, erhalten in diesem Leistungsspektrumspunkt den Wert $L_{Trennungbündig,tech_i} = true$, die anderen den Wert $L_{Trennungbündig,tech_i} = false$.

Vor-Ort-Trennung von aktiviertem und nicht aktiviertem Beton

Die Vor-Ort-Trennung von aktiviertem und nicht aktiviertem Beton bietet die Möglichkeit, nur die kontaminierten bzw. aktivierten Teile des Bauteils vom Bauteilrest abzutragen. Dieser Rest kann dann nach der Freimessung mit konventionellen Methoden zurückgebaut und dem Baustoffkreislauf zugeführt werden. Des Weiteren wird nur der Teil des Bauteils abgetragen, der kontaminiert oder aktiviert ist. Somit ergeben sich Einsparpotenziale bzgl. der zu entsorgenden Rückbauvolumina. Der Ausdruck $L_{Vor-Ort-Trennung,tech} = true$ beschreibt die Möglichkeit eines Rückbauverfahrens, eine Vor-Ort-Trennung durchzuführen. Dagegen kann mit Rückbauverfahren, die den Ausdruck $L_{Vor-Ort-Trennung,tech} = false$ besitzen, diese Anforderung nicht erfüllt werden.

Verursachung von Querkontamination

Verfahren, die eine Querkontamination verursachen, werden in vielen Fällen nicht zur Anwendung kommen können. Eine Querkontamination entsteht, wenn das Verfahren aufgrund seiner spezifischen Arbeitsweise eine vorhandene Kontamination weiter in das Bauteil hineinträgt. Um diese Anforderung bei der Verfahrensauswahl zu berücksichtigen, wurde der Leistungsspektrumspunkt „Verursachung von Querkontamination“ eingeführt und alle Verfahren, die eine Querkontamination verursachen, mit dem Ausdruck $L_{Querkontamination,tech} = true$ belegt. Damit wird ein Ausschluss dieser Verfahren ermöglicht, falls eine Querkontamination nicht zulässig ist.

Notwendigkeit der beidseitigen Zugänglichkeit eines Bauteils

Einige Rückbauverfahren erfordern für eine effiziente Arbeitsweise eine beidseitige Zugänglichkeit des Bauteils. Der Leistungsspektrumspunkt „Notwendigkeit der beidseitigen Zugänglichkeit eines Bauteils“ bildet dann ein Ausschlusskriterium, wenn aus radiologischen, aus Platz- oder anderen Gründen eine beidseitige Zugänglichkeit nicht möglich ist. Somit dürfen bei Vorhandensein dieses Kriteriums diejenigen Verfahren, die in diesem Leistungsspektrumspunkt den Wert $L_{beidseitigZugaenglich,tech} = true$ besitzen, bei der weiteren Betrachtung nicht mehr berücksichtigt werden.

Erzeugung von Überschnitten

Einige Verfahren, wie z.B. das Kreissägen, erzeugen bei der Bearbeitung des Bauteils Überschnitte. Aus radiologischen Gründen sind solche Überschnitte z.B. wegen der sich ergebenden Fugen nicht erwünscht, da das Freimessen einer solchen entstanden Fuge schwierig ist. Die Überschnitte können allerdings durch den Zusatz eines weiteren Verfahrens, z.B. das Kernbohren, eliminiert werden. Aus diesem Grund wurde der Leistungsspektrumspunkt „Erzeugung von Überschnitten“ eingeführt. Diejenigen Verfahren, die Überschnitte erzeugen ($L_{Ueberschnitte,tech} = true$), müssen eine Verfahrenskombination mit einem weiteren Verfahren eingehen, das diesen Überschnitt eliminieren kann. Diese Verfahren sind im Arbeitsschritt „Startlöcher“ unter der Kategorie „Erzeugung von Startlöchern“ aufgenommen.

Fernbediente Bearbeitung

In Sperrbereichen ist eine fernbediente Bearbeitung des Bauteils unumgänglich. Deshalb werden die Verfahren dahingehend überprüft, ob mit ihnen eine fernbediente Bearbeitung möglich ist. Die Verfahren, die fernbedient einsetzbar sind, erhalten in ihrem Leistungsspektrumspunkt „fernbediente Bearbeitung“ den Wert $L_{fernbedient,tech_i} = true$, alle anderen $L_{fernbedient,tech_i} = false$. In Anhang B werden beispielhaft einige Standardgeräte nach ihrem Umbau zu Fernhantierungsgeräten gezeigt.

Semi-Fernbediente Bearbeitung

Eine fernbediente Bearbeitung eines Bauteils impliziert auch immer hohe Kosten für den Umbau des Verfahrens, so dass eine semi-fernbediente Bauteilbearbeitung meist kostengünstiger durchgeführt werden kann. Im Anforderungskatalog wurde definiert, ob ein Bauteil fernbedient oder semi-fernbedient bearbeitet werden soll. Die semi-fernbediente Bearbeitung ist in Kontrollbereichen mit geringer radiologischer Strahlenbelastung durchaus möglich, so dass Verfahren zur Anwendung kommen können, die in diesem Leistungsspektrumspunkt den Wert $L_{semi-fernbedient,tech_i} = true$ besitzen.

Rückbau von Metallauskleidungen

In kerntechnischen Anlagen sind in einigen Räumen oder Zellen Metallliner angebracht, die im Zuge des Bauteilrückbaus mit ausgebaut werden. Für diesen Einsatzzweck wurde der Leistungsspektrumspunkt „Rückbau von Metallauskleidungen“ definiert, in dem alle Verfahren erfasst werden, die Metalle schneiden können ($L_{Metallschneiden,tech_i} = true$). Bei Vorhandensein solcher Metallauskleidungen können somit Verfahrenskombinationen gebildet werden, die z.B. den Rückbau von Linern mit erfassen.

Asbestausbau

Zur brandschutztechnischen Abdichtung von Gebäudeteilen, von Fugen oder Kabel- und Rohrdurchführungen wurde beim Bau von kerntechnischen Anlagen teilweise Asbest verwendet, welcher einer gesonderten Entsorgung zugeführt werden muss. Hierzu wird der Asbest vor dem eigentlichen Rückbau ausgebaut. Falls sich im betrachteten Bauteil Asbest befindet, wird dies im Anforderungskatalog erfasst. In der Wissenskomponente werden die Verfahren aufgeführt, die diesen Asbest ausbauen können. Diese erhalten in diesem Leistungsspektrumspunkt $L_{AusbauAsbest,tech_i} = true$, alle anderen $L_{AusbauAsbest,tech_i} = false$.

Startlöcher

Startlöcher werden hergestellt, wenn Überschnitte nicht erlaubt sind oder Verfahren für ihre prinzipielle Arbeitsweise Startlöcher benötigen (wie z.B. das Seilsägen). Diese Verfahren erhalten in diesem Leistungsspektrumspunkt den Vermerk $L_{Startloecher,noet,tech_i} = true$. Die Entscheidungskomponente berücksichtigt sodann, dass bei der Wahl dieser Verfahren noch weitere Verfahren, die Startlöcher herstellen können, hinzugefügt werden müssen, um eine sinnvolle Verfahrenskombination zu erhalten. Um unterscheiden

Abmessungen und Gewichte	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n
Transportabmessungen						
Länge	$l_{Tr,Typ1}$	$l_{Tr,Typ2}$	...	$l_{Tr,Typi}$	...	$l_{Tr,Typn}$
Breite	$b_{Tr,Typ1}$	$b_{Tr,Typ2}$	...	$b_{Tr,Typi}$	...	$b_{Tr,Typn}$
Höhe	$h_{Tr,Typ1}$	$h_{Tr,Typ2}$	...	$h_{Tr,Typi}$	...	$h_{Tr,Typn}$
Platzbedarf Arbeitsbereich						
Länge	$l_{Arb,Typ1}$	$l_{Arb,Typ2}$	...	$l_{Arb,Typi}$	...	$l_{Arb,Typn}$
Breite	$b_{Arb,Typ1}$	$b_{Arb,Typ2}$	...	$b_{Arb,Typi}$	...	$b_{Arb,Typn}$
Höhe	$h_{Arb,Typ1}$	$h_{Arb,Typ2}$	...	$h_{Arb,Typi}$	...	$h_{Arb,Typn}$
Radius	$r_{Arb,Typ1}$	$r_{Arb,Typ2}$	...	$r_{Arb,Typi}$	...	$r_{Arb,Typn}$
Gewichte						
Gewicht in kg	g_{Typ1}	g_{Typ2}	...	g_{Typi}	...	g_{Typn}
Gewicht in kN	g_{Typ1}	g_{Typ2}	...	g_{Typi}	...	g_{Typn}
Flächenpressung [kN/m^2]	p_{Typ1}	p_{Typ2}	...	p_{Typi}	...	p_{Typn}

Tabelle 7.2: Datentabelle Abmessungen und Gewichte der Verfahren

zu können, ob beim betrachteten Verfahren Startlöcher benötigt (Index = noet) werden oder ob mit diesem betrachteten Verfahren Startlöcher hergestellt werden können ($L_{Startloecher_{her,tech_i}} = true$) (Index = her), wird der Leistungsspektrumspunkt insofern erweitert.

7.1.2 Abmessungen und Gewichte

Die Abmessungen und Gewichte der Rückbauverfahren bilden einen wichtigen Bestandteil für die spätere Entscheidungskomponente (vgl. auch Abbildung 6.1 auf Seite 42). Da der Rückbau von Gebäudeteilen in kerntechnischen Anlagen in teilweise sehr engen, kleinen und schwer zugänglichen Räumen und Zellen erfolgt, kommt dem Transport der Rückbaugerätschaften zur Arbeitsstätte eine entscheidende Bedeutung zu. Zudem muss an der Arbeitsstätte geprüft werden, wie viel Platz für die Rückbaugerätschaften zur Verfügung gestellt werden kann (vgl. Abbildung 6.2 auf Seite 43).

Unter dem Aspekt von Gebäudeum- bzw. -einbauten muss auch der statischen Betrachtung der rückzubauenden Gebäudeteile eine besondere Rolle beigemessen werden. Die statische Unbedenklichkeitserklärung für die Verwendung bestimmter Rückbauverfahren und für die rückzubauenden Bauteile (Abbruchstatik) sollte aus planerischer Sicht möglichst früh vorhanden sein, um die Gesamtplanung nicht zu beeinträchtigen. In der Anforderungskomponente wurden diese Fragestellungen zur Bearbeitung durch den Systemnutzer aufgenommen (vgl. Kap. 6.2.3).

Die einzelnen Transportabmessungen, der Platzbedarf im Arbeitsbereich und die Gewichte der einzelnen Verfahren werden in der Wissenskomponente aufgenommen und mit den Daten der Anforderungskomponente verglichen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass, falls nötig, als Gesamtgewicht das Gewicht des Trägergerätes mit erfasst wird. Die Datentabelle Abmessungen und Gewichte zeigt die Tabelle 7.2.

Für diejenigen Verfahren, die ein Trägergerät (z.B. fernbedienbaren Bagger) benötigen, wird zusätzlich der Schwenkbereich (Radius) des Baggers eingetragen. Um

Kosten	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n
Investitionskosten	$K_{Inv,Typ1}$	$K_{Inv,Typ2}$	...	$K_{Inv,Typi}$	...	$K_{Inv,Typn}$
Umbaukosten für						
fernbediente Bearbeitung	$K_{fern,Typ1}$	$K_{fern,Typ2}$	...	$K_{fern,Typi}$	...	$K_{fern,Typn}$
semi-fernbediente Bearbeitung	$K_{se-fe,Typ1}$	$K_{se-fe,Typ2}$	...	$K_{se-fe,Typi}$	...	$K_{se-fe,Typn}$
Kosten Trägergerät	$K_{Traeg,Typ1}$	$K_{Traeg,Typ2}$	...	$K_{Traeg,Typi}$	...	$K_{Traeg,Typn}$
Gesamtinvestitionskosten	$K_{InvGes,Typ1}$	$K_{InvGes,Typ2}$	...	$K_{InvGes,Typi}$	...	$K_{InvGes,Typn}$

Tabelle 7.3: Datentabelle der Investitionskosten

Schwenkbewegungen des Trägergerätes zu berücksichtigen, werden die vom Systemnutzer angegebenen Daten bezüglich Länge und Breite des Arbeitsbereiches herangezogen und mit dem Schwenkradius des Trägergerätes verglichen.

7.1.3 Ökonomische Daten

Die ökonomischen Daten der einzelnen Rückbauverfahren werden in der Wissenskomponente in Tabellenform angelegt. In der Entscheidungskomponente werden diese Daten weiterverarbeitet, so dass für das betrachtete, rückzubauende Bauteil die jeweiligen Zeiten und Kosten der einzelnen Verfahren oder Verfahrenskombinationen berechnet werden können.

Investitionskosten

Für die einzelnen Verfahren werden in Tabellenform zunächst die Investitionskosten ermittelt. Des Weiteren werden die Umbaukosten der Geräte für eine fernbediente bzw. semi-fernbediente Bearbeitung aufgenommen. Für jene Verfahren, die ein Trägergerät benötigen (z.B. Meißeln und Fräsen), werden zudem die Kosten dieses Trägergerätes ermittelt und zu den Investitionskosten des Verfahrens addiert. Die Gesamtinvestitionskosten ergeben sich dann aus der Addition der oben genannten Teilkosten, aus denen sich sodann der monatliche Satz für Abschreibung und Verzinsung ermitteln lässt.

Die Tabelle 7.3 zeigt die Investitionskosten der unterschiedlichen Verfahrenstypen. Dabei besitzen alle Verfahrenstypen die selben Bearbeitungsmechanismen. Durch diese Typenbildung lässt sich eine Unterscheidung nach der Größe (z.B. große und kleine Meißel oder Fräsen, unterschiedliche Blattdurchmesser bei Kreissägen, unterschiedliche Querschnitte bei den Kernlanzen, etc.) durchführen.

Die Investitionskosten ergeben sich aus den Herstellerangaben oder der Baugeräteleiste. Die Umbaukosten für eine fernbediente oder semi-fernbediente Bearbeitung werden von den Fachingenieuren ermittelt. Dabei ist für eine fernbediente Bearbeitung festzuhalten, dass sich die Umbaukosten vor allem aus dem Umbau für die Fernbedienbarkeit des Trägergerätes und/oder der Möglichkeit des automatischen Werkzeugwechsels zusammensetzen. Diese Kosten werden zu den Gesamtinvestitionskosten nur hinzuaddiert, wenn im Anforderungskatalog eine fernbediente oder semi-fernbediente Bearbeitung gefordert wird.

Typ	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n
Vorhaltemonate	v_{Typ1}	v_{Typ2}	...	v_{Typi}	...	v_{Typn}
Kalkulatorischer Zinssatz	p_{Typ1}	p_{Typ2}	...	p_{Typi}	...	p_{Typn}
Nutzungsjahre	n_{Typ1}	n_{Typ2}	...	n_{Typi}	...	n_{Typn}
monatlicher Satz für						
Abschreibung und Verzinsung	k_{Typ1}	k_{Typ2}	...	k_{Typi}	...	k_{Typn}

Tabelle 7.4: Datentabelle des monatlichen Satzes für Abschreibung und Verzinsung

Zur Berechnung des monatlichen Satzes für Abschreibung und Verzinsung aus den Gesamtinvestitionskosten werden in einer Tabelle die Vorhaltemonate, der kalkulatorische Zinssatz und die Nutzungsjahre eingetragen. Soll ein Verfahren nur einem Projekt zugeordnet werden und kann dieses Verfahren z.B. aus radiologischen Gründen für weitere Projekte nicht mehr verwendet werden, können durch die individuelle Gestaltung der Eingabemaske (Tabelle 7.4) die gesamten Investitionskosten direkt diesem Projekt zugeordnet werden.

Die Berechnung des monatlichen Satzes für Abschreibung und Verzinsung k_{Typi} erfolgt nach der Formel 7.1 :

$$k_{Typi} = a_{Typi} + z_{Typi} = \frac{100}{v_{Typi}} + \frac{p_{Typi} * n_{Typi} * 100}{2 * v_{Typi}} = \frac{100}{v_{Typi}} * \left(1 + \frac{p_{Typi} * n_{Typi}}{2}\right) [\%] \quad (7.1)$$

Dabei bedeutet a_{Typi} die monatliche Abschreibung, z_{Typi} der durchschnittliche Anteil für Verzinsung pro Monat in % vom mittleren Neuwert, v_{Typi} die Vorhaltemonate, p_{Typi} der kalkulatorische Zinssatz und n_{Typi} die Nutzungsjahre der einzelnen Verfahren und Verfahrenstypen. Die Vorhaltemonate sind dabei die Monate, die ein Gerät einem oder mehreren Projekten während der Nutzungsjahre des Gerätes zugeordnet ist. Ein Vorhaltemonat entspricht dabei 30 Kalendertagen oder 170 Vorhaltestunden (im Einschichtbetrieb). Die Nutzungsjahre sind die Jahre vom Anschaffungszeitpunkt des Gerätes bis zu dessen Entsorgung.

Die monatlichen Kosten der Abschreibungs- und Verzinsungsbeträge K_{Typi} ergeben sich aus der Multiplikation des monatlichen Satzes für Abschreibung und Verzinsung k_{Typi} mit den Gesamtinvestitionskosten $K_{InvGes,Typi}$ (vgl. Formel 7.2).

$$K_{Typi} = k_{Typi} * K_{InvGes,Typi} \quad (7.2)$$

Bearbeitungskosten

Die monatlichen Bearbeitungskosten $K_{MoGes,Typi}$ ergeben sich aus der Addition der Vorhalte- V_{Typi} , den Verschleißteil- $K_{Ver,Typi}$, den Energie-/Kraftstoff- $K_{En,Typi}$, den Schmierstoffkosten $K_{Schst,Typi}$ und den sonstigen Kosten $K_{So,Typi}$. Die Kostenanteile werden in Tabellenform angegeben (vgl. Tabelle 7.5).

Die Vorhaltekosten V_{Typi} ergeben sich aus der Addition der Kosten für Abschreibung und Verzinsung K_{Typi} und der Reparaturkosten R_{Typi} . Die Reparaturkosten R_{Typi}

Typ	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n
Abschreibung und Verzinsung	K_{Typ1}	K_{Typ2}	...	K_{Typi}	...	K_{Typn}
Reparaturkosten	R_{Typ1}	R_{Typ2}	...	R_{Typi}	...	R_{Typn}
Vorhaltekosten	V_{Typ1}	V_{Typ2}	...	V_{Typi}	...	V_{Typn}
Verschleißteilkosten	$K_{Ver,Typ1}$	$K_{Ver,Typ2}$	...	$K_{Ver,Typi}$	...	$K_{Ver,Typn}$
Energie-/Kraftstoffkosten	$K_{En,Typ1}$	$K_{En,Typ2}$	...	$K_{En,Typi}$	...	$K_{En,Typn}$
Schmierstoffkosten	$K_{Schst,Typ1}$	$K_{Schst,Typ2}$	...	$K_{Schst,Typi}$	...	$K_{Schst,Typn}$
sonstige Kosten	$K_{So,Typ1}$	$K_{So,Typ2}$	...	$K_{So,Typi}$	...	$K_{So,Typn}$
monatliche Gesamtkosten	$K_{MoGes,Typ1}$	$K_{MoGes,Typ2}$	...	$K_{MoGes,Typi}$	...	$K_{MoGes,Typn}$

Tabelle 7.5: Datentabelle der monatlichen Gesamtkosten

ergeben sich entweder nach einem festgelegten monatlichen Betrag oder einem Prozentanteil der Gesamtinvestitionskosten. Dabei werden die Reparaturkosten als Durchschnittswert für den Einsatz im kerntechnischen Bereich über die gesamte Nutzungsdauer angegeben.

Die Verschleißteilkosten $K_{Ver,Typi}$ werden für jedes Verfahren gesondert in Abhängigkeit der zu bearbeitenden Schnittfläche oder der Masse berechnet. Die Betriebsstoffkosten setzen sich aus den Energiekosten $K_{En,Typ2}$ der Geräte und den Schmierstoffkosten $K_{Schst,Typi}$ zusammen. Die Energiekosten errechnen sich aus der aufgenommenen Leistung der Geräte multipliziert mit den Energiekosten. Die Schmierstoffkosten bilden einen für jedes Verfahren definierten Prozentsatz der Energiekosten. (Gehbauer (2004) in Anlehnung an Baugeräteliste (BGL) 2001.)

Die sonstigen Kosten $K_{So,Typi}$ entstehen durch die Einlagerung, Verladung, den Transport, den Auf- und Abbau der Geräte, die Dekontamination und/oder die Endlagerung der Geräte und sind in einem festen Prozentsatz der Vorhaltekosten verankert.

Die Summe dieser Kosten bildet sodann die monatlichen Gesamtkosten $K_{MoGes,Typi}$ der Verfahren, welche durch Multiplikation mit der Rückbauzeit des Bauteils die Gesamtkosten des Rückbaus des betrachteten Bauteils bildet.

7.1.4 Leistungsdaten

Die Leistungsdaten beziehen sich zum einen auf die eigentliche Bearbeitungsleistung beim Rückbau von Beton und Stahl, zum anderen auf die Bearbeitungsgrenzen hinsichtlich der maximal bearbeitbaren Höhen und Tiefen.

Um das Risiko bei der Auswahl der Rückbauverfahren zu minimieren, werden verfahrensspezifisch Abminderungsfaktoren η für unterschiedliche Betonzusammensetzungen und Betondicken gebildet. Des Weiteren werden die gesamten Arbeitsschritte des Rückbaus in möglichst viele Einzelzeiten zerlegt, so dass ein möglichst hoher Vertrauensbereich des Ergebnisses erzielt werden kann.

Rückbau von Metalllinern

Wenn sich Metallliner vor der rückzubauenden Wand befinden, werden diese zunächst aus dem Verbund herausgeschnitten. In der Wissenskomponente werden hierfür die

Metalldicke [mm]	Schneidzeit [cm/min]		Rüstzeit [min]	Umsetzzeit [min]	Standlänge [m]
	unter Wasser	an der Luft			
d_1	T_{W,d_1}	T_{L,d_1}	$T_{Ruest,MS}$	T_{Umsetz}	$L_{Standlaenge,d_1}$
d_2	T_{W,d_2}	T_{L,d_2}	$T_{Ruest,MS}$	T_{Umsetz}	$L_{Standlaenge,d_2}$
...
d_i	T_{W,d_i}	T_{L,d_i}	$T_{Ruest,MS}$	T_{Umsetz}	$L_{Standlaenge,d_i}$
...
d_n	T_{W,d_n}	T_{L,d_n}	$T_{Ruest,MS}$	T_{Umsetz}	$L_{Standlaenge,d_n}$

Tabelle 7.6: Eingabetabelle der Schnittleistungsdaten der einzelnen Verfahren

Typ	m^3/h		m^2/h	
	von	bis	von	bis
Typ 1	$Q_{11,techi}$	$Q_{12,techi}$	$Q_{13,techj}$	$Q_{14,techj}$
Typ 2	$Q_{21,techi}$	$Q_{22,techi}$	$Q_{23,techj}$	$Q_{24,techj}$
Typ i	$Q_{i1,techi}$	$Q_{i2,techi}$	$Q_{i3,techj}$	$Q_{i4,techj}$
Typ n-1	$Q_{(n-1)1,techi}$	$Q_{(n-1)2,techi}$	$Q_{(n-1)3,techj}$	$Q_{(n-1)4,techj}$
Typ n	$Q_{n1,techi}$	$Q_{n2,techi}$	$Q_{n3,techj}$	$Q_{n4,techj}$

Tabelle 7.7: Eingabemaske für die Leistungsdaten bei mittlerem Bewehrungsanteil

Schnitt-, Rüst- und Umsetzzeiten der einzelnen Verfahren aufgenommen (vgl. Tabelle 7.6). Hier bedeutet d_i die Dicke des Metalliners, T_{W,d_i} die Schneidzeit in cm/min für die Dicke d_i unter Wasser, T_{L,d_i} die Schneidzeit in cm/min für die Dicke d_i an der Luft und $T_{Ruest,MS}$ die Rüstzeit für das Schneiden von Metall und T_{Umsetz} die Umsetzzeit des jeweiligen Verfahrens. Des weiteren wird die Standlänge der einzelnen Verfahren in Abhängigkeit der Dicke angegeben, so dass in der Entscheidungskomponente (Kapitel 8.4.1) die Zeiten für die Werkzeugwechsel berechnet werden können. In der Entscheidungskomponente lassen sich sodann die Gesamtzeiten für den Ausbau des Metalliners berechnen.

Betonrückbau

Im Leistungsangebot der Verfahren werden zunächst die Leistungen in m^2/h oder m^3/h angegeben. Dabei wird die Leistung in gewissen Leistungsgrenzen, je nach Betongüte, abgebildet. Die Schneidverfahren erlauben keine direkte Aussage über die Abbauleistung in der Einheit m^3/h , so dass diese in der Entscheidungskomponente umgerechnet werden müssen. Dabei werden die Angaben der Anforderungskomponente herangezogen (vgl. Kapitel 6.2.3 und 6.4.9). In der Wissenskomponente werden die Leistungsdaten in Abhängigkeit der Betongüte und einem mittleren Bewehrungsanteil (vgl. Tabelle 6.4 und Tabelle 7.7) eingetragen. In der Wissenskomponente besteht die Möglichkeit, diese Leistungsdaten - je nach vorhandener Bauteilstruktur - zu erhöhen oder zu vermindern. Die Leistungsdaten variieren je nach Bewehrungsgrad und eingesetztem Typus des jeweiligen Verfahrens (vgl. Tabelle 7.8).

Leistungsänderungen können sich auch durch die unterschiedlichen Zusammenset-

Typ	Leistungsänderung η_{Bew}		
	bei ... Bewehrungsanteil		
	niedrigem	mittlerem	hohem
Typ 1	$\eta_{Bew,Typ,1}^{low}$	$\eta_{Bew,Typ,1}^{middle}$	$\eta_{Bew,Typ,1}^{high}$
Typ 2	$\eta_{Bew,Typ,2}^{low}$	$\eta_{Bew,Typ,2}^{middle}$	$\eta_{Bew,Typ,2}^{high}$
Typ i	$\eta_{Bew,Typ,i}^{low}$	$\eta_{Bew,Typ,i}^{middle}$	$\eta_{Bew,Typ,i}^{high}$
Typ n-1	$\eta_{Bew,Typ,n-1}^{low}$	$\eta_{Bew,Typ,n-1}^{middle}$	$\eta_{Bew,Typ,n-1}^{high}$
Typ n	$\eta_{Bew,Typ,n}^{low}$	$\eta_{Bew,Typ,n}^{middle}$	$\eta_{Bew,Typ,n}^{high}$

Tabelle 7.8: Leistungsänderung bei unterschiedlichen Bewehrungsanteilen

Typ	Leistungsänderung bei Betonen mit			
	harten	abrasiven	Stahlfaser-	Stahlkugel-
	Betonzusätzen	Betonzusätzen	zusätzen	bewehrung
Typ 1	$\eta_{hart}^{Typ,1}$	$\eta_{abrasiv}^{Typ,1}$	$\eta_{Sf}^{Typ,1}$	$\eta_{Sku}^{Typ,1}$
Typ 2	$\eta_{hart}^{Typ,2}$	$\eta_{abrasiv}^{Typ,2}$	$\eta_{Sf}^{Typ,2}$	$\eta_{Sku}^{Typ,2}$
Typ i	$\eta_{hart}^{Typ,i}$	$\eta_{abrasiv}^{Typ,i}$	$\eta_{Sf}^{Typ,i}$	$\eta_{Sku}^{Typ,i}$
Typ n-1	$\eta_{hart}^{Typ,n-1}$	$\eta_{abrasiv}^{Typ,n-1}$	$\eta_{Sf}^{Typ,n-1}$	$\eta_{Sku}^{Typ,n-1}$
Typ n	$\eta_{hart}^{Typ,n}$	$\eta_{abrasiv}^{Typ,n}$	$\eta_{Sf}^{Typ,n}$	$\eta_{Sku}^{Typ,n}$

Tabelle 7.9: Leistungsänderung bei unterschiedlichen Betonzusätzen

zungen des Betons, d.h. durch harte oder abrasive Betonzusätze, durch Stahlfasern oder Stahlkugelbewehrung ergeben. Diese Zusätze beeinträchtigen z.B. die Bearbeitungsgeschwindigkeit und den Verschleiß der Werkzeuge der Schnittverfahren (vgl. Tabelle 7.9).

Die Leistungsdaten beziehen sich immer auf einen konventionellen Betrieb. Aus diesem Grund sind diese Daten weiter abzumindern, wenn fernbedient oder semi-fernbedient gearbeitet werden muss, da die Verfahren durch die Fernbedienung schwieriger zu steuern sind. Dabei kann für jedes Verfahren eingegeben werden, um wie viel Prozent sich die Leistung bei einer fernbedienten Steuerung vermindert. Bei einer fernbedienten Steuerung müssen die Gerätebediener, um sich einen dreidimensionalen Überblick der gegenwärtigen Situation zu schaffen, mehrere Monitore, die jeweils mit Hilfe der Medientechnik ein zweidimensionales Bild liefern, überwachen, was die Bearbeitungsleistung im Vergleich zu einer manuellen Steuerung vor Ort verringert.

Einige Verfahren besitzen unterschiedliche Bearbeitungsgrenzen für die Bearbeitung von Bauteilen mit großen Wand- oder Deckenstärken. Bei diesen Verfahren ist eine maximale Bearbeitungstiefe nach wirtschaftlichen Kriterien angegeben. Mit einigen dieser Verfahren ist es aber aus technischen Gesichtspunkten möglich, tiefer als die angegebene wirtschaftliche Bearbeitungstiefe in das Bauteil einzudringen. Diese Verfahren werden weiter betrachtet, wenn die Bauteildicke größer ist als die wirtschaftliche, aber kleiner als die technische Bearbeitungstiefe, was sich ebenfalls leistungsmindernd auswirkt. Hierzu wird vom Nutzer die Leistungsminderung für diesen Fall eingetragen (vgl. Tabelle 7.10).

Typ	Leistungsminderung η_{DB} bei Überschreitung der wirtschaftli- chen Bearbeitungstiefe
Typ 1	$\eta_{DB}^{Typ,1}$
Typ 2	$\eta_{DB}^{Typ,2}$
Typ i	$\eta_{DB}^{Typ,i}$
Typ n-1	$\eta_{DB}^{Typ,n-1}$
Typ n	$\eta_{DB}^{Typ,n}$

Tabelle 7.10: Leistungsminderung bei Überschreitung der wirtschaftlichen Bearbeitungstiefe

Typ	m^2/h	
	von	bis
Typ 1	$Q_{Deko,11}$	$Q_{Deko,12}$
Typ 2	$Q_{Deko,21}$	$Q_{Deko,22}$
...
Typ i	$Q_{Deko,i1}$	$Q_{Deko,i2}$
...
Typ n-1	$Q_{Deko,(n-1)1}$	$Q_{Deko,(n-1)2}$
Typ n	$Q_{Deko,n1}$	$Q_{Deko,n2}$

Tabelle 7.11: Eingabemaske der Dekontaminationstabelle

Dekontamination

Wenn das Bauteil ausschließlich dekontaminiert werden soll oder im Zuge der Rückbautätigkeit eine Dekontamination des Bauteils erfolgt, sind die Leistungsdaten der Rückbauverfahren aus den Dekontaminationstabellen zu entnehmen (vgl. Tabelle 7.11). Dabei bedeutet $Q_{Deko,i1}$ die geringste Flächenleistung des gesamten Leistungsspektrums des Verfahrenstyps i eines Verfahrens. Diese angegebene Leistung erhält je nach Bauteilstruktur Abminderungsfaktoren, falls sich harte oder abrasive Zusätze im Bauteil befinden (vgl. Tabelle 7.9) und/oder fernbedient gearbeitet werden muss.

Ein weiterer Betrachtungspunkt bildet die Dekontamination bzw. die Dekontaminationsmöglichkeit der eingesetzten Verfahren, welche bei Rückbautätigkeiten in Kontroll- und Sperrbereichen zwangsläufig kontaminieren. Hierzu werden den Systemnutzern in der Wissenskomponente Informationen zur Verfügung gestellt, ob eine Dekontaminierung des eingesetzten Verfahrens möglich ist und ob an die Dekontaminierung hohe technische Anforderungen gestellt werden. Die Möglichkeit und der Aufwand der Dekontamination der Rückbauverfahren bildet kein Auswahlkriterium, da sich der Dekontaminationsaufwand indirekt in den Investitions- und Entsorgungskosten der Verfahren widerspiegelt und dort mitberücksichtigt wird.

Bewehrungs- durchmesser [mm]	Typ 1	Typ 2	...	Typ j	...	Typ n-1	Typ n
6	$t_{Bew,11}$	$t_{Bew,12}$	...	$t_{Bew,1j}$	...	$t_{Bew,1(n-1)}$	$t_{Bew,1n}$
8	$t_{Bew,21}$	$t_{Bew,22}$	...	$t_{Bew,2j}$	...	$t_{Bew,2(n-1)}$	$t_{Bew,2n}$
10	$t_{Bew,31}$	$t_{Bew,32}$	...	$t_{Bew,3j}$	...	$t_{Bew,3(n-1)}$	$t_{Bew,3n}$
...
i	$t_{Bew,i1}$	$t_{Bew,i2}$	...	$t_{Bew,ij}$	...	$t_{Bew,i(n-1)}$	$t_{Bew,in}$
...
40	$t_{Bew,(n-1)1}$	$t_{Bew,(n-1)2}$	...	$t_{Bew,(n-1)j}$	...	$t_{Bew,(n-1)(n-1)}$	$t_{Bew,(n-1)n}$
50	$t_{Bew,n1}$	$t_{Bew,n2}$	...	$t_{Bew,nj}$	...	$t_{Bew,n(n-1)}$	$t_{Bew,nn}$

Tabelle 7.12: Eingabemaske der Trennzeiten von Bewehrung der Rückbauverfahrenstypen

Rückbau von Bewehrung

Der Bearbeitungspunkt „Rückbau von Bewehrung“ kommt nur dann zur Anwendung, wenn ein betrachtetes Rückbauverfahren entweder keine Bewehrung rückbauen kann oder die vorhandene Bewehrung mit dem betrachteten Verfahren z.B. aufgrund zu dicker Bewehrungsstäbe nicht bearbeitet werden kann und somit eine Verfahrenskombination mit einem Verfahren, das die geforderte Aufgabe bewältigen kann, gebildet werden muss.

Hierzu wird eine Tabelle generiert, in welcher der Zeitaufwand der Trennvorgänge der unterschiedlich dicken Bewehrungsstäbe inklusive Umsetzen des Gerätes eingetragen wird (vgl. Tabelle 7.12). Hierbei bedeutet $t_{Bew,ij}$ die Zeitdauer des Trennvorgangs der Bewehrung einschließlich der Ansetzzeit mit dem Durchmesser i und des Verfahrenstyps j eines Verfahrens bei einer konventionellen, nicht fernbedienten Nutzung.

Bei der späteren Berechnung der Gesamttrennzeit wird die Anzahl der Schnitte über den Bewehrungsabstand, die Bewehrungslagen, die maximal zulässigen Längen der einzelnen, abgetrennten Bewehrungsseisen und die Bauteilabmessungen ermittelt.

Einbauteile

Beim Vorabausbau von Stahleinbauteilen ist zunächst zu unterscheiden, um welche Art von Einbauteile es sich handelt. Bei Ankerplatten werden die Ausbauzeiten pro m^2 Ankerplattenfläche und die damit im Zusammenhang stehende Anzahl an Kopfbolzen zugrunde gelegt. Die Ausbauzeiten von Stahlträgern und Stahlschienen sind abhängig von den Dimensionen der Träger und Schienen. Hier erfolgt zunächst eine Berechnung, welche Gesamtschnittlänge pro Trennvorgang erzeugt werden muss. Diese Gesamtschnittlänge wird mit der Schnittzeit in „cm/min“ der einzelnen Verfahren in Abhängigkeit der maximalen Materialstärke des Trägers / der Schiene multipliziert. Stahlträger und Stahlschienen werden im Zuge des Betonrückbaus mit anderen Verfahren freigelegt und dann mittels Trennverfahren getrennt. Je nach Angaben im Fragenkatalog über die maximal zulässige Länge des Trägers / der Schiene wird die Anzahl der Trennvorgänge bestimmt. (vgl. Formeln 7.3 und 7.4). Dabei bedeutet $n_{V,trenn,SchTr}$

bzw. $n_{H,trenn,SchTr}$ die Anzahl der Schnitte in vertikaler bzw. horizontaler Richtung, falls die Träger/Schienen vertikal bzw. horizontal eingebaut sind. H_{Bt} und B_{Bt} bezeichnen die Höhe bzw. Breite des zurückzubauenden Bauteils, $L_{trenn,max}$ die maximale Länge der Träger/Schienen, damit diese entweder noch zu hantieren sind oder zwischen-/endlagerfähig verpackt werden können. Die Konstante 1 bzw. 2 besagt, dass ein oder zwei Schnitte mehr als der Quotient $H_{Bt}/L_{trenn,max}$ hergestellt werden müssen, um die Träger/Schienen aus dem Verbund zu lösen. Da $n_{V,trenn,SchTr}$ und $n_{H,trenn,SchTr}$ natürliche Zahlen sein müssen, ist der Wert der Formeln auf die nächst höhere natürliche Zahl aufzurunden. Aus diesen Formeln ergeben sich, je nach zurückzubauender maximaler Bauteillänge/-breite, unterschiedlich hohe Trennvorgänge.

$$n_{V,trenn,SchTr} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{H_{Bt}}{L_{trenn,max}} + 1 \right\rfloor & \text{für } \frac{H_{Bt}}{L_{trenn,max}} \in \mathbb{N} \\ \left\lfloor \frac{H_{Bt}}{L_{trenn,max}} + 2 \right\rfloor & \text{für } \frac{H_{Bt}}{L_{trenn,max}} \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (7.3)$$

$$n_{H,trenn,SchTr} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{B_{Bt}}{L_{trenn,max}} + 1 \right\rfloor & \text{für } \frac{B_{Bt}}{L_{trenn,max}} \in \mathbb{N} \\ \left\lfloor \frac{B_{Bt}}{L_{trenn,max}} + 2 \right\rfloor & \text{für } \frac{B_{Bt}}{L_{trenn,max}} \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (7.4)$$

Die erforderliche Trennanzahl der Stahlträger und Schienen wird nun mit der einmaligen Trennzeit für den Träger / die Schiene multipliziert (vgl. Kapitel 8.4.9). Einige Rückbauverfahren besitzen eine Einschränkung bzgl. der maximalen Schneidtiefe von Stählen, so dass diese bei Vorhandensein von Schnitttiefen, die größer als die maximal bearbeitbaren Schnitttiefen sind, aus der Betrachtung auszuschließen sind.

Bei der Gesamtzeitberechnung wird die Anzahl der Schnitte mit der Zeitdauer eines Trennvorgangs und der jeweiligen Umsetzzeit multipliziert. Hinzu wird die Rüstzeit für den Werkzeugwechsel addiert.

Herstellung von Startlöchern

Für eine effektive Bearbeitung eines Bauteiles benötigen einige Verfahren Startlöcher, die in das Bauteil durch Trennen, Bohren oder Brennen hineingearbeitet werden müssen. Diese Verfahren werden in der Wissenskomponente durch den Leistungsspektrumspunkt „Verfahren benötigt Startlöcher“ markiert.

Diejenigen Verfahren, die diese Startlöcher herstellen können, werden in diesem Leistungsspektrumspunkt mit „Verfahren stellt Startlöcher her“ markiert. Somit werden in der Wissenskomponente Verfahrenspaare gebildet, mit denen eine effektive Bearbeitung des Bauteils möglich ist.

Für Verfahren, die Startlöcher herstellen können, werden Tabellen mit Leistungswerten Q_i , maximaler Bohrlochtiefe $L_{max,i}$ und Rüstzeiten $t_{ruest,i}$ in Abhängigkeit des Bohrlochdurchmessers d_i generiert (vgl. Tabelle 7.13), so dass im Kalkulationstool in der Wissenskomponente (vgl. Kapitel 8.4) Zeiten und Kosten für die Herstellung von Startlöchern ermittelt werden können. Verfahren, die Startlöcher benötigen, besitzen gewisse Anforderungen an diese Startlöcher. Somit werden auch für diese Verfahren die benötigten Anforderungen an die Startlöcher in Tabellenform (vgl. Tabelle 7.14)

Durchmesser [mm]	Bohrleistung [lfm/min]	maximale Bohrlochtiefe	Rüstzeit pro Bohrung
d_1	Q_1	$L_{max,1}$	$t_{ruest,1}$
d_2	Q_2	$L_{max,2}$	$t_{ruest,2}$
...
d_i	Q_i	$L_{max,i}$	$t_{ruest,i}$
...
d_{n-1}	Q_{n-1}	$L_{max,(n-1)}$	$t_{ruest,(n-1)}$
d_n	Q_n	$L_{max,n}$	$t_{ruest,n}$

Tabelle 7.13: Leistung- und Zeitangaben der Bohrlochherstellung einzelner Verfahren

Typ	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n-1	Typ n
Bohrlochdurchmesser [mm]	d_{Typ1}	d_{Typ2}	...	d_{Typi}	...	$d_{Typ(n-1)}$	d_{Typn}
(Säge-)Blattdurchmesser/Bohrlochabstand [mm]	a_{Typ1}	a_{Typ2}	...	a_{Typi}	...	$a_{Typ(n-1)}$	a_{Typn}
Länge Bohrloch	$l_{Bl,1}$	$l_{Bl,2}$	...	$l_{Bl,i}$	...	$l_{Bl,(n-1)}$	$l_{Bl,n}$
Bewehrungsanteil							
von	min_{Typ1}	min_{Typ2}	...	min_{Typi}	...	$min_{Typ(n-1)}$	min_{Typn}
bis	max_{Typ1}	max_{Typ2}	...	max_{Typi}	...	$max_{Typ(n-1)}$	max_{Typn}
Bohrlöcher pro qm Rückbaufläche	$n_{Bl,1}$	$n_{Bl,2}$	...	$n_{Bl,i}$	...	$n_{Bl,(n-1)}$	$n_{Bl,n}$

Tabelle 7.14: Verfahrensseitige Anforderungen an die Bohrlochherstellung

generiert.

Die Anforderungen, die an die Bohrlöcher gestellt werden, werden in zwei unterschiedliche Bereiche gegliedert. Der eine Bereich beinhaltet diejenigen Verfahren, die für den Rückbau ein bestimmtes Bohrlochraster (Bohrlöcher pro qm Rückbaufläche $n_{Bl,i}$) benötigen, das flächendeckend im Bauteil hergestellt werden muss. Zu diesen Verfahren gehören z.B. das hydraulische Sprengen und Sprengen mit Quellmitteln. Das festzulegende Bohrlochraster ist vom Bewehrungsanteil des Bauteils abhängig, so dass sich unterschiedliche „Anforderungstypen“ in Abhängigkeit der vorhandenen Bewehrung ergeben.

Der andere Bereich bildet diejenigen Verfahren ab, die entweder einen bestimmten maximalen Bohrlochabstand für eine effektive Bearbeitung benötigen (wie z.B. das Seilsägen) oder die Sägeblätter für die Bearbeitung einsetzen (wie z.B. der Einsatz der Kreissäge als Tiefensäge). Im letzteren Beispiel wird der Bohrlochabstand mit dem Sägeblattdurchmesser gleichgesetzt. Über die Gesamtschnittfläche lässt sich hieraus die Anzahl der Bohrlöcher errechnen (vgl. Kapitel 8.4).

Für beide Bereiche werden zudem die Anforderung nach dem gewünschten Bohrlochdurchmesser d_{Typi} und der gewünschten Länge des Bohrloches $l_{Bl,i}$ aufgenommen.

Die Tabelle 7.14 ist als umfassende Tabelle zu verstehen, damit jedes einzelne Verfahren seine Anforderung an die Bohrlochherstellung stellen kann. So wird z.B. die Zeile „(Säge-) Blattdurchmesser / Bohrlochabstand“ für Verfahren, die ein Bohrlochrastrer benötigen, nicht benutzt und bleibt daher leer. Ebenso bleibt die Spalte „Bewehrungsanteil“ und „Bohrlöcher pro qm Rückbaufläche“ für Verfahren, die einen maximalen Bohrlochabstand benötigen, leer.

Bearbeitungsgrenzen

Aufgrund der technischen Reichweite sind den Verfahren natürliche Bearbeitungsgrenzen für die Bearbeitung eines Bauteils gesetzt. Diese Bearbeitungsgrenzen sind z.B. die Reichweite des Trägergerätes (z.B. fernbedienter Bagger), welche in horizontaler und vertikaler Richtung begrenzt ist. Des weiteren können die Bearbeitungsgrenzen aus dem Verfahren selbst herrühren, da einige Verfahren, wie z.B. die Hochdruckwasserstrahltechnik, Beton nur bis zu einer bestimmten Dicke durchtrennen können.

Diese technischen Bearbeitungsgrenzen werden in der Wissenskomponente aufgenommen und in der Entscheidungskomponente mit den Daten der Anforderungskomponente weiterverarbeitet, da diese Bearbeitungsgrenzen ein Ausscheidungskriterium der betrachteten Rückbauverfahren darstellen.

7.1.5 Prozessparameter

Die Prozessparameter der einzelnen Rückbauverfahren beinhalten alle Eigenschaften, die bei der Nutzung eines bestimmten Verfahrens zu berücksichtigen sind. Diese Eigenschaften sind die Vibrationen und Stoßbelastungen, die bei der Verfahrensnutzung auf das Bauteil wirken, die Funkenerzeugung, die Staubentwicklung, die bei einigen Verfahren entsteht und die es zu beherrschen gilt, der Wasserbedarf derjenigen Verfahren, die ohne den Einsatz von Prozesswasser nicht effektiv eingesetzt werden können und die Fernbedienbarkeit der einzusetzenden Verfahren.

Vibrationen und Stoßbelastungen

Analog zur Anforderungskomponente (vgl. Kapitel 6.4.3) erfolgt die Beurteilung der einzelnen Verfahren, die Vibrationen / Stoßbelastungen in das Bauwerk einleiten, unscharf. Dabei wird in Analogie zur Anforderungskomponente die Tabelle 6.5 zugrunde gelegt, welche Aufschlüsse darüber enthält, in welchem Maße ein Verfahren Vibrationen / Stoßbelastungen generiert. Der Vergleich zwischen den maximal zulässigen Vibrationen / Stoßbelastungen der Anforderungskomponente und den generierten Vibrationen / Stoßbelastungen der Wissenskomponente erfolgt in der Entscheidungskomponente und wird dort als Ausscheidungskriterium definiert.

Funkenerzeugung

Rückbauverfahren, die bei der Bearbeitung des Bauteils Funken erzeugen, können nicht zur Anwendung kommen, wenn dies aufgrund von Sicherheitsbestimmungen und Schutzziele der Anlage oder brandschutztechnischen Anforderungen ausgeschlossen ist

(vgl. Kapitel 6.4.5). Verfahren, die Funken erzeugen, sind z.B. Autogenes Brennschneiden, Hochstromverfahren, Mikrowellentechnik (wenn das Verfahren direkt auf Metall trifft), Plasmaschneiden, Pulverschneidbrennen, Lichtbogen-Wasserstrahl-Drahtschneiden und Sauerstoffkernlanzen.

Staubentwicklung

Ebenfalls in Analogie zur Anforderungskomponente (vgl. Kapitel 6.4.7) wird die Staubentwicklung eines Verfahrens anhand einer Tabelle (vgl. Tabelle 6.6) unscharf beurteilt. Dabei lassen sich allerdings die erzeugten Staubemissionen eines Verfahrens durch Absauganlagen eindämmen bzw. verhindern, so dass kein direkter Abgleich zwischen maximal zulässiger Staubemission und tatsächlicher Staubentwicklung erfolgt. Dem Nutzer steht also die Möglichkeit offen, Absauganlagen zu wählen, mit deren Hilfe ein Verfahren, das ohne diese Absauganlagen zu einem Ausschluss geführt hätte, weiter Berücksichtigung finden kann. Hierzu wird die Tabelle 6.6 erweitert, so dass eine Beurteilung der Staubentwicklung eines Verfahrens mit und ohne Absauganlagen erfolgt und der Abgleich bzgl. der Staubentwicklung nach der Wahl eines geeigneten Subsystems stattfindet. Somit wird also das Ausscheidungskriterium „Staubentwicklung“ für die Phasen Verfahren mit und Verfahren ohne Absauganlagen definiert.

Wasserbedarf

Für eine effiziente Bearbeitung eines Bauteils benötigen einige Verfahren Prozesswasser. Dieses Prozesswasser wird zum einen als Kühlmedium z.B. von Sägeseielen, Bohrkronen, Kreissägeblätter etc. eingesetzt. Zum anderen wird der Transport von Bohrklein und Bohrmehl aus der Bearbeitungsfuge vom Prozesswasser übernommen.

Die notwendige Verwendung von Prozesswasser bildet ein Ausscheidungskriterium eines Verfahrens in dreifacher Hinsicht: zum einen für diejenigen Verfahren, die Prozesswasser benötigen, aber kein Wasser für die Bauteilbearbeitung verwendet werden darf, des weiteren für diejenigen Verfahren, die Wasser als Hauptbestandteil der Bearbeitung benötigen (wie z.B. Wasserstrahlschneiden), jedoch mehr Wasser benötigen als im Anforderungskatalog (vgl. Kapitel 6.4.6) definiert wurde. Schließlich scheidet auch diejenigen Verfahren aus, bei deren Verwendung das Prozesswasser aufgrund seiner Kinematik (z.B. Wasserstrahlsprengen) nicht oder nur schwer kontrolliert aufzufangen und einem definierten Kreislauf zuzuführen ist.

Fernbedienbarkeit

Als ein weiterer Prozessparameter wird die Fernbedienbarkeit der einzelnen Verfahren in die Betrachtung mit aufgenommen, da die Fernbedienbarkeit ein wichtiges Kriterium bei der Bearbeitung in den Kontroll- und Sperrbereichen von kerntechnischen Anlagen darstellt. Hierbei wird differenziert, ob hohe oder niedrige Aufwendungen für den fernbedienten Einsatz des Verfahrens nötig sind (vgl. Kapitel 7.1.3).

7.2 Subsysteme

Zu den Subsystemen gehören alle Hilfsmittel, die die Eigenschaften der Rückbauverfahren vorteilhaft verändern. Dazu zählen z.B. die Bühnen und Gerüste, welche die Reichweite des Verfahren erhöhen, die Absauganlagen, welche den Prozessparameter „Staubentwicklung“ positiv beeinflussen, die Wasserauffangwannen, mit deren Hilfe Prozesswasser in einem definierten Kreislauf fließen kann, Abschirmwände, mit denen eine temporäre oder dauerhafte Bearbeitung des Bauteils mit vor Ort tätigem Personal ermöglicht wird und Kontaminationsschutzzelte, um eine Ausbreitung von Kontaminationen zu verhindern.

7.2.1 Bühnen und Gerüste

Bühnen und Gerüste dienen der Erhöhung der Reichweite der eingesetzten Verfahren. Im Anforderungskatalog wurde hierzu dem Systemnutzer die Möglichkeit geschaffen, Rückbauverfahren auf unterschiedlichen Höhenniveaus einzusetzen (vgl. Kapitel 6.2.3). Hierzu werden Arbeitsbühnen, Hebebühnen und Gerüste verwendet, welche der Systemnutzer entweder aus vorhandenen oder neu zu konstruierenden Systemen auswählen kann. Bei den neu zu konstruierenden Systemen werden die Anforderungen an das System definiert und die Kosten hierfür ermittelt. Hierzu werden dem Systemnutzer Tabellen zur Verfügung gestellt, in denen die wichtigsten Daten über Arbeitsbühnen, Hebebühnen und Gerüste aufgelistet sind (vgl. Tabelle 7.15).

Arbeitsbühnen

In die Tabelle 7.15 werden die unterschiedlichen vorhandenen oder neu zu konstruierenden Arbeitsbühnen eingetragen. Das Gesamtgewicht $G_{T_{ypi}}$ der Bühnen dient in Verbindung mit dem Gewicht des Rückbauverfahrens der Berechnung der statischen Unbedenklichkeit bei der Aufstellung eines Bühnentyps. Mit der Belaghöhe $H_{T_{ypi}}$ und der Anzahl der Beläge $n_{T_{ypi}}$ lässt sich in Verbindung mit den unterschiedlichen Reichweiten der Rückbauverfahren überprüfen, ob mit der betrachteten Arbeitsbühne und des betrachteten Rückbauverfahrens das Bauteil in seiner Höhe vollständig zurückgebaut werden kann. Für die Betrachtung der Rückbauverfahren ist die lichte Höhe $h_{T_{ypi}}$ zwischen den Ebenen von Bedeutung, da für eine effektive Arbeitsweise eine Mindesthöhe einzuhalten ist und Störkanten, die von der Arbeitsbühne erzeugt werden, zu vermeiden sind. Der Bodenbelag der Arbeitsbühne spielt eine entscheidende Rolle, da auf eine ausreichende Reibung zwischen Rückbauverfahren und Bodenbelag geachtet werden muss, so dass ein Rutschen aufgrund zu geringer Reibungskräfte zwischen Belag und Rückbauverfahren, welches eine Horizontalkraft auf eine Wand ausübt, ausgeschlossen werden kann. Des Weiteren ist der Bodenbelag im Hinblick auf das Abbruchmaterial von Bedeutung, da beispielsweise bei Verwendung von Gitterrosten kleinstückiges Abbruchmaterial nicht definiert gesammelt und abtransportiert werden kann. Das Material fällt dann auf die darunter liegende Ebene. Die Belastbarkeit der Arbeitsbühne dient der Überprüfung, ob diese die unterschiedlichen Rückbauverfahren nebst eventuell entstehendem Rückbaumaterial aufnehmen kann. Mit den

Arbeitsbühnentyp	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n-1	Typ n
Gewicht [kg]	G_{Typ1}	G_{Typ2}	...	G_{Typi}	...	$G_{Typ(n-1)}$	G_{Typn}
Belaghöhe über Boden [m]	H_{Typ1}	H_{Typ2}	...	H_{Typi}	...	$H_{Typ(n-1)}$	H_{Typn}
Lichte Höhe zwischen den Ebenen [m]	h_{Typ1}	h_{Typ2}	...	h_{Typi}	...	$h_{Typ(n-1)}$	h_{Typn}
Anzahl Beläge	n_{Typ1}	n_{Typ2}	...	n_{Typi}	...	$n_{Typ(n-1)}$	n_{Typn}
Material	a_{Typ1}	a_{Typ2}	...	a_{Typi}	...	$a_{Typ(n-1)}$	a_{Typn}
Bodenbelag	B_{Typ1}	B_{Typ2}	...	B_{Typi}	...	$B_{Typ(n-1)}$	B_{Typn}
Belastbarkeit							
kN	Q_{Typ1}	Q_{Typ2}	...	Q_{Typi}	...	$Q_{Typ(n-1)}$	Q_{Typn}
kN/m^2	q_{Typ1}	q_{Typ2}	...	q_{Typi}	...	$q_{Typ(n-1)}$	q_{Typn}
Arbeitslänge	l_{Typ1}	l_{Typ2}	...	l_{Typi}	...	$l_{Typ(n-1)}$	l_{Typn}
Arbeitsbreite	b_{Typ1}	b_{Typ2}	...	b_{Typi}	...	$b_{Typ(n-1)}$	b_{Typn}
Feldlänge	$l_{f,Typ1}$	$l_{f,Typ2}$	...	$l_{f,Typi}$	...	$l_{f,Typ(n-1)}$	$l_{f,Typn}$
Pläne, Datenblätter, Dateien, etc.	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n-1	Typ n

Tabelle 7.15: Datentabelle des Subsystems Arbeitsbühnen

Abmessungen der Arbeitsbreite und -höhe wird schließlich der neue, zur Verfügung gestellte Arbeitsplatz für die Rückbauverfahren definiert. Die Transportabmessungen der Arbeitsbühnen spielen eine untergeordnete Rolle, da diese vor Ort montiert werden.

Hebebühnen

Zu den Hebebühnen gehören die Hubarbeitsbühnen, die Scherearbeitsbühnen, die Hubtische etc. Wie bei den Arbeitsbühnen werden die Daten in einer Tabelle (vgl. Tabelle 7.16) eingetragen. Die Arbeitshöhe H_{Typi} entspricht dabei der Belaghöhe über Boden der Tabelle 7.15, wobei diese Arbeitshöhe als Maximalwert zu verstehen ist. Die Plattformabmessungen entsprechen der Arbeitslänge bzw. der Arbeitsbreite, also dem zur Verfügung stehenden Arbeitsplatz. Da Hebebühnen als Stückware geliefert werden, wurden in Tabelle 7.16 die Transportabmessungen aufgenommen, welche mit den Angaben des Anforderungskataloges (vgl. Kapitel 6.2.3) verglichen werden. Für die Erklärung der weiteren Daten wird auf das vorstehende Unterkapitel Arbeitsbühnen verwiesen.

Gerüste

Das Subsystem „Gerüste“ findet vor allem dann Verwendung, wenn ein Raum oder eine Zelle mit handgeführten Rückbauverfahren dekontaminiert werden soll. Hierzu werden die in der Bautechnik üblichen Standardgerüste verwendet. Die benötigten

Hebebühnentyp	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n-1	Typ n
Gewicht [kg]	G_{Typ1}	G_{Typ2}	...	G_{Typi}	...	$G_{Typ(n-1)}$	G_{Typn}
Arbeitshöhe [m]	H_{Typ1}	H_{Typ2}	...	H_{Typi}	...	$H_{Typ(n-1)}$	H_{Typn}
Material	a_{Typ1}	a_{Typ2}	...	a_{Typi}	...	$a_{Typ(n-1)}$	a_{Typn}
Bodenbelag	B_{Typ1}	B_{Typ2}	...	B_{Typi}	...	$B_{Typ(n-1)}$	B_{Typn}
Belastbarkeit							
kN	Q_{Typ1}	Q_{Typ2}	...	Q_{Typi}	...	$Q_{Typ(n-1)}$	Q_{Typn}
kN/m^2	q_{Typ1}	q_{Typ2}	...	q_{Typi}	...	$q_{Typ(n-1)}$	q_{Typn}
Plattformabmessungen							
Länge	l_{Typ1}	l_{Typ2}	...	l_{Typi}	...	$l_{Typ(n-1)}$	l_{Typn}
Breite	b_{Typ1}	b_{Typ2}	...	b_{Typi}	...	$b_{Typ(n-1)}$	b_{Typn}
Transportabmessungen							
Länge	$l_{tr,Typ1}$	$l_{tr,Typ2}$	...	$l_{tr,Typi}$	...	$l_{tr,Typ(n-1)}$	$l_{tr,Typn}$
Breite	$b_{tr,Typ1}$	$b_{tr,Typ2}$	...	$b_{tr,Typi}$	...	$b_{tr,Typ(n-1)}$	$b_{tr,Typn}$
Pläne, Datenblätter, Dateien, etc.	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n-1	Typ n

Tabelle 7.16: Datentabelle des Subsystems „Hebebühnen und Gerüste“

Daten sind dabei den Datenblättern der Hersteller zu entnehmen und können in eine Tabelle eingegeben werden, deren Aufbau der Tabelle 7.16 entspricht.

Das Subsystem „Gerüste“ wird noch um das Portalgerüst erweitert, an welches unterschiedliche Rückbauverfahren angebracht werden können. Ein Portalgerüstsystem besteht dabei aus einem modular aufgebauten Gestell, dessen einzelne Module sich aus mehreren in sich versteiften Ecktürmen zusammensetzen und mittels Verbindungsstreben zu einer Einheit zusammengebaut werden. Die Zerlegbarkeit bietet den Vorteil, dass der Transport bis zum Arbeitsplatz auch durch enge Tür- oder Toröffnungen möglich ist. Ein Beispiel eines Portalgerüsts am Rückbauverfahren Fräsen zeigt Abbildung 7.3.



Abbildung 7.3: Portalgerüst (IfM)



Abbildung 7.4: Bild des Saugversuches am TMB (A = Kompakte Seilsägeanlage, B = Staubabsauganlage, C / D = Abgedichtete Schnittfuge mit Moosgummi)

7.2.2 Absauganlagen

Das Subsystem „Absauganlagen“ dient der Verbesserung des Prozessparameters Staub der Rückbauverfahren und wird bei denjenigen Rückbauverfahren eingesetzt, die bei der Bearbeitung des Bauteils Staub emittieren. Bei den Absauganlagen muss unterschieden werden zwischen Absauganlagen, die lediglich den entstehenden Staub absaugen, und Absauganlagen, die sowohl Staub als auch zurückgebauten Beton absaugen können.

Absauganlagen für Staub

Die Absauganlagen für Staub finden Verwendung bei Rückbauverfahren, die lediglich Staub emittieren, und bei der Bearbeitung des Bauteils keine Betonbruchstücke entstehen lassen. Beispiele hierfür sind das trockene Seilsägen und das trockene Kernbohren.

Absauganlagen für Staub erfordern keine hohen Luftvolumenströme und wenig Platzbedarf. Der Staubaustritt ist bei diesen Verfahren örtlich begrenzt und genau definiert, so dass kleine Saugrohrdurchmesser zur Absaugung ausreichend sind. Zur Wahl der unterschiedlichen Absaugsysteme ist in der Wissenskomponente die Tabelle 7.17 implementiert.

Zur Ermittlung der Absaugerfolgsquote beim Rückbauverfahren „trockenes Seilsägen“ wurden am Institut für Technologie und Management Versuche mit einer Absauganlage unternommen (vgl. Abbildung 7.4). Der Staubanteil, der definiert aufgefangen werden konnte, betrug 83 %. Dabei mussten allerdings alle Öffnungen mit einer Moosgummidichtung abgedichtet werden, welche mittels einer Metallschiene formschlüssige

Staubabsauganlage	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n-1	Typ n
Gewicht [kg]	G_{Typ1}	G_{Typ2}	...	G_{Typi}	...	$G_{Typ(n-1)}$	G_{Typn}
Abmessungen [m]							
Länge	l_{Typ1}	l_{Typ2}	...	l_{Typi}	...	$l_{Typ(n-1)}$	l_{Typn}
Breite	b_{Typ1}	b_{Typ2}	...	b_{Typi}	...	$b_{Typ(n-1)}$	b_{Typn}
Höhe	h_{Typ1}	h_{Typ2}	...	h_{Typi}	...	$h_{Typ(n-1)}$	h_{Typn}
Sammelvolumen [l]	V_{Typ1}	V_{Typ2}	...	V_{Typi}	...	$V_{Typ(n-1)}$	V_{Typn}
Saugrohr \emptyset	d_{Typ1}	d_{Typ2}	...	d_{Typi}	...	$d_{Typ(n-1)}$	d_{Typn}
Unterdruck [kPa]	ΔP_{Typ1}	ΔP_{Typ2}	...	ΔP_{Typi}	...	$\Delta P_{Typ(n-1)}$	ΔP_{Typn}
Luftvolumenstrom [m³/h]	\dot{V}_{Typ1}	\dot{V}_{Typ2}	...	\dot{V}_{Typi}	...	$\dot{V}_{Typ(n-1)}$	\dot{V}_{Typn}
max. Reststaubgehalt der Abluft [mg/m³]	$S_{R,Typ1}$	$S_{R,Typ2}$	...	$S_{R,Typi}$	...	$S_{R,Typ(n-1)}$	$S_{R,Typn}$

Tabelle 7.17: Datentabelle des Subsystems „Staubabsauganlage“

am Bauwerk angebracht wurde, so dass die Luftdichtheit gewährleistet werden konnte. Diese Absaugerfolgsquote wurde als Quotient der definiert aufgefangenen Staubmasse durch die beim Schnitt erzeugte berechnete Fugenmasse definiert. Die hohen manuellen Arbeiten für die Abdichtungen an den Fugen, welche auch mit einem sehr hohen Zeitaufwand fernbedient hergestellt werden können, führen zu einer hohen Leistungsminderung des Verfahrens (25 Minuten Rüstzeit für einen manuellen Schnitt).

Absauganlagen für Beton und Staub

Im Vergleich zu den Absauganlagen für Staub erfordern Absauganlagen für Beton und Staub einen hohen Platzbedarf und Luftvolumenströme von mindestens 3500 bis über 10.000 m³/h. Aufbau und Funktionsweise einer Standard-Sauganlage ist der Abbildung 7.5 zu entnehmen. Der von der Vakuumpumpe erzeugte Unterdruck und der damit verbundene Luftvolumenstrom transportiert das Fördergut durch das Saugrohr in einen Sammeltrichter. Dort sinkt die Luftgeschwindigkeit durch die Erweiterung des Querschnitts ab und grobstückiges Abbruchmaterial verbleibt im Behälter (Vorabscheider). Das gesammelte Abbruchmaterial kann von dort direkt in Fässer gefüllt werden. Eine optimale Befüllung der Fässer wird über einen Füllstandsmelder mit einer automatischen Abschaltung der Sauganlage gewährleistet. Durch einen elektrisch angetriebenen Flachschieber lassen sich die Fässer staubdicht befüllen. Das Wechseln der Fässer kann durch eine Hubvorrichtung realisiert werden.

Die Luft, welche einen Staubanteil enthält, strömt durch unterschiedlich feine Filter, welche den Staub von der Luft trennen (Feinfilter). Diese Filter enthalten eine selbstabreinigende elektromechanische Filterreinigung. Die so gereinigte Abluft kann dann in die Atmosphäre abgegeben werden.

Die flexiblen Förderschläuche erhalten bei Richtungswechseln eine Metallverstär-

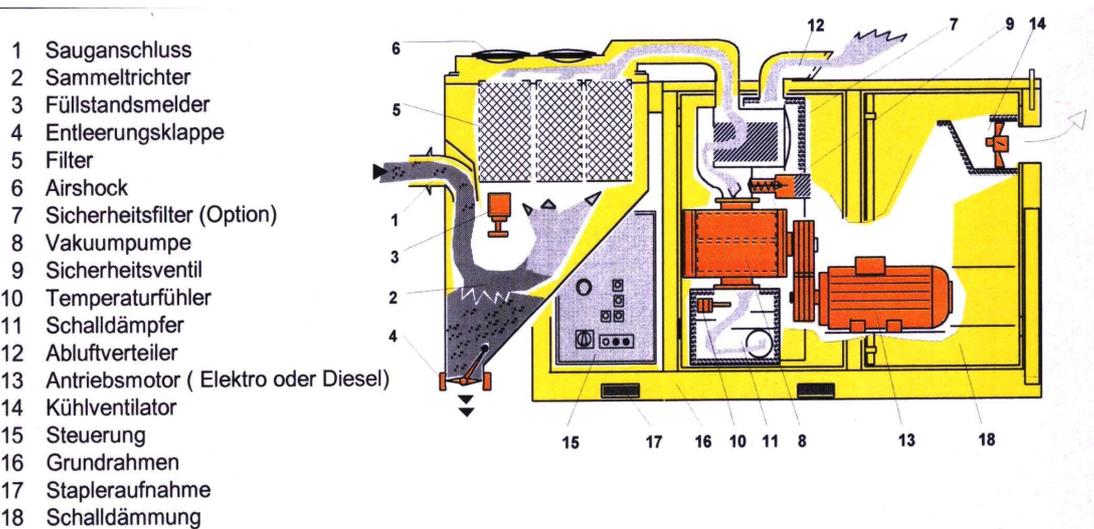


Abbildung 7.5: Funktionsweise einer Sauganlage (Wieland, 2001)

kung aus Blechen, da in diesen Bereichen ein erhöhter Verschleiß durch den vermehrten Kontakt des Förderguts an der Förderschlauchwandung auftritt. Der Förderschlauch wird vom Trägersystem (Bagger) geführt und saugt kontinuierlich die bei den Rückbauarbeiten anfallenden Stäube ab. Der zu Boden gefallene Abraum wird diskontinuierlich abgesaugt. Um eine großflächige Verschmutzung des Arbeitsbereiches zu verhindern, kann vor dem Trägersystem eine Abraumauffangvorrichtung in Form einer Metallwanne installiert werden.

Zur Wahl der unterschiedlichen Absaugsysteme ist in der Wissenskomponente eine Tabelle (vgl. Tabelle 7.18) und ein Berechnungsgang zur Wahl optimaler Luftvolumenströme implementiert (vgl. Anhang C).

7.2.3 Wasserrückgewinnungsanlage

Bei der Bearbeitung des Bauteils mit Verfahren, die Prozesswasser benötigen, wird in den Kontroll- und Sperrbereichen in kerntechnischen Anlagen das Kühl- und Spülwasser aufgefangen, um es in einem definierten Kreislauf betreiben zu können. Damit werden zum einen Entsorgungskosten gesenkt und zum anderen die Gefahr einer Querkontamination deutlich verringert.

Das anfallende Prozesswasser wird dabei zunächst aufgefangen und in einem Behälter direkt an der Arbeitsstelle gesammelt. Aus diesem Behälter wird das mit Bohr- und Sägeschlamm verschmutzte Wasser mit einer Pumpe diskontinuierlich in textile Filtersäcke, welche sich in einem Absetzbecken befinden, gefüllt. Nach Befüllung der Filtersäcke werden diese manuell abgenommen und in ein Stahlrohrgestell gelegt. Dort wird das Restwasser mit hydraulischen Stempeln aus den Säcken gepresst. Die Säcke werden in eine Austrocknungsschale gelegt, wo der Schlamm trocknet. Das verbleibende Wasser im Absetzbecken wird mit einer Pumpe wieder an den Arbeitsplatz gepumpt, wo es erneut als Kühl- und Spülwasser verwendet werden kann.

Die Wasserrückgewinnungsanlage wird bei Bedarf erweitert, so dass eine Kühlung der Motoren der Rückbaugeräten möglich ist. Hierzu wird ein weiterer Wassertank

Materialabsauganlage	Typ 1	Typ 2	...	Typ i	...	Typ n-1	Typ n
Gewicht [kg]	G_{Typ1}	G_{Typ2}	...	G_{Typi}	...	$G_{Typ(n-1)}$	G_{Typn}
Abmessungen [m]							
Länge	l_{Typ1}	l_{Typ2}	...	l_{Typi}	...	$l_{Typ(n-1)}$	l_{Typn}
Breite	b_{Typ1}	b_{Typ2}	...	b_{Typi}	...	$b_{Typ(n-1)}$	b_{Typn}
Höhe	h_{Typ1}	h_{Typ2}	...	h_{Typi}	...	$h_{Typ(n-1)}$	h_{Typn}
Sammelvolumen Grobabscheider [l]	V_{Typ1}	V_{Typ2}	...	V_{Typi}	...	$V_{Typ(n-1)}$	V_{Typn}
Saugrohr \emptyset	$d_{1,Typ1}$	$d_{1,Typ2}$	...	$d_{1,Typi}$	...	$d_{1,Typ(n-1)}$	$d_{1,Typn}$
Entleerungsöffnung DN	$d_{2,Typ1}$	$d_{2,Typ2}$	...	$d_{2,Typi}$	...	$d_{2,Typ(n-1)}$	$d_{2,Typn}$
Unterdruck [kPa]	ΔP_{Typ1}	ΔP_{Typ2}	...	ΔP_{Typi}	...	$\Delta P_{Typ(n-1)}$	ΔP_{Typn}
Luftvolumenstrom [m^3/h]	\dot{V}_{Typ1}	\dot{V}_{Typ2}	...	\dot{V}_{Typi}	...	$\dot{V}_{Typ(n-1)}$	\dot{V}_{Typn}
max. Reststaub- gehalt der Abluft [mg/m^3]	$S_{R,Typ1}$	$S_{R,Typ2}$	...	$S_{R,Typi}$	...	$S_{R,Typ(n-1)}$	$S_{R,Typn}$
Filterfläche [mm]	$A_{F,Typ1}$	$A_{F,Typ2}$	...	$A_{F,Typi}$	...	$A_{F,Typ(n-1)}$	$A_{F,Typn}$

Tabelle 7.18: Datentabelle des Subsystems „Absauganlage für Beton und Staub“

verwendet, der mit Frischwasser versorgt wird. Bei Bedarf wird dieser mit einer Kühlanlage versehen. Das zur Kühlung der Motoren verwendete Wasser wird aus diesem Wassertank entnommen und über einen Kreislauf, betrieben durch eine Tauchpumpe, diesem Wassertank wieder zugeführt. Eine zusätzliche Kühlung der Motoren ist für eine effektive Arbeitsweise vor allem dann notwendig, wenn der Arbeitsraum bzw. die Zelle sehr klein ist und sich bei der Bearbeitung des Bauteils stark erhitzen würde. Ein Prinzipbild einer Wasserrückgewinnungsanlage mit zusätzlicher Kühlung zeigt Abbildung 7.6. (Rachor, 2002)

7.2.4 Abschirmwand

Um Strahlenquellen abzuschirmen, werden Abschirmwände eingesetzt, welche aus einzelnen Abschirmsteinen (Abbildung 6.5 zeigt die vom Verfasser mitentwickelten Abschirmsteine) bestehen. Die Abschirmsteine sind mit Strahlenfallen versehen, damit die radioaktive Strahlung nicht ungehindert durch Fugen, die beim Setzen der Steine entstehen, zum Arbeitsplatz gelangen können. Dazu erhalten die Steine an der Ober- und Unterseite sowie an den Stirnseiten trapezförmige Aussparungen. Die Steine sind an ihrer Oberseite mit zwei Stahlstäben versehen, welche in einem definierten Abstand zum Schwerpunkt des Steins angebracht sind. Beim Versetzen der Steine wird somit kein Moment an die Tragkonstruktion übertragen. An der Unterseite der Steine befinden sich zwei Aussparungen, die diese Stahlstäbe aufnehmen können. Bei Bedarf erhalten die Steine an der Seitenfläche weitere Aufhängepunkte, damit diese, wenn nötig, raum-

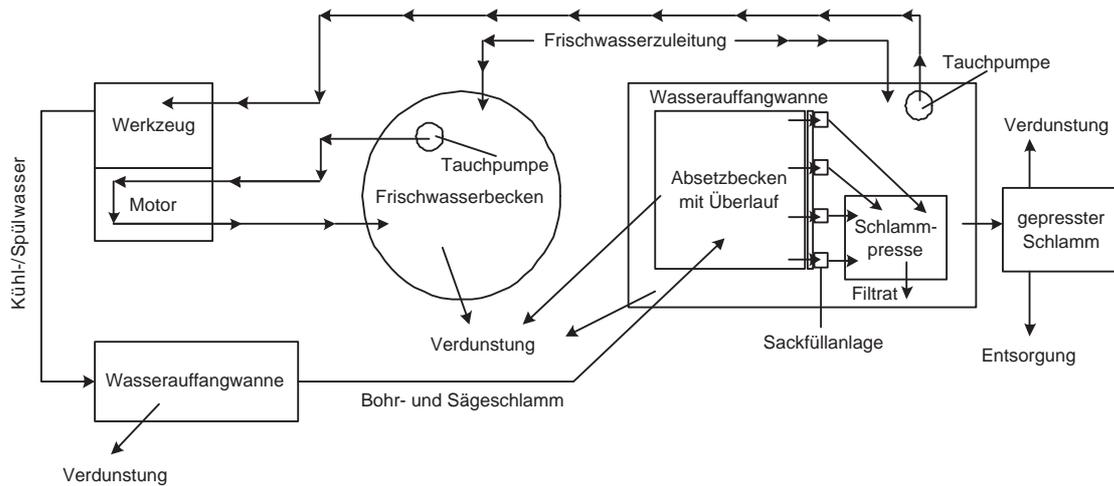


Abbildung 7.6: Prinzip einer Wasserrückgewinnungsanlage mit Kühlung (in Anlehnung an Rachor (2002))

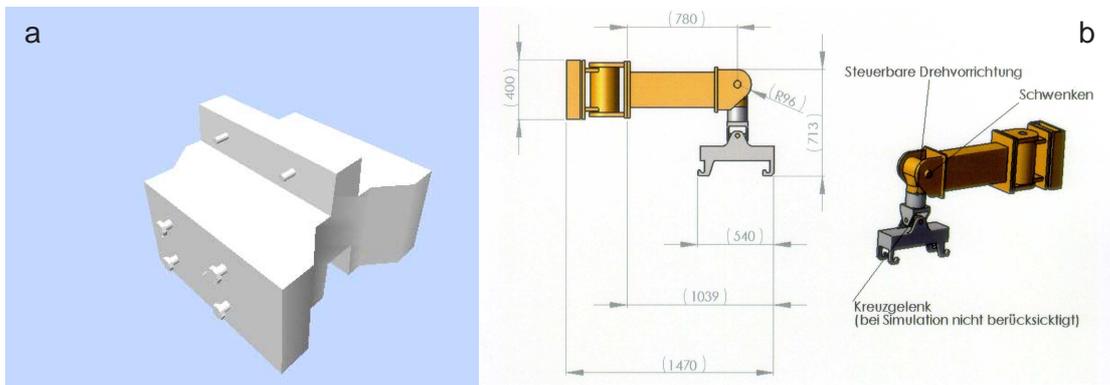


Abbildung 7.7: Abschirmstein (a) und Steingreifer (b) [Quelle: WAK]

bzw. zellenhoch gesetzt werden können.

Die Steine bestehen aus Stahlbeton. Je nach vorhandener Strahlungsenergie werden die Steine unterschiedlich dick ausgeführt, um die gewünschte Abschirmung zu erreichen. Die Abbildungen 7.7 und 7.8 zeigen beispielhaft einen Abschirmstein, einen Steingreifer, welcher an ein Trägergerät angebracht wird und die Abschirmwand, welche durch die einzelnen Steinsetzvorgänge entsteht.

Eine weitere Abschirmmöglichkeit ergibt sich durch die Nutzung von Bleimatten. Hierbei können Strahlenlecks und kontaminierte Teile wie Rohre und Ventile mit flexiblen Bleimatten, welche eine Dicke von 14 oder 20 mm besitzen, abgeschirmt werden. Die Bleimatten bestehen aus einer Aussenhülle aus PVC und sind mit Bleiwolle oder Bleifolie gefüllt. An den Mattenrändern sind Aufhänge-Ösen angebracht, so dass diese flexibel an der geplanten Konstruktion angebracht werden können. Der Abschirmungsgrad der Matten entspricht dem von 6 mm Blei (Pedi, 2001). Eine beispielhafte Anwendung der Abschirmung eines Reaktordruckbehälters mit Bleimatten zeigt Abbildung 7.9.

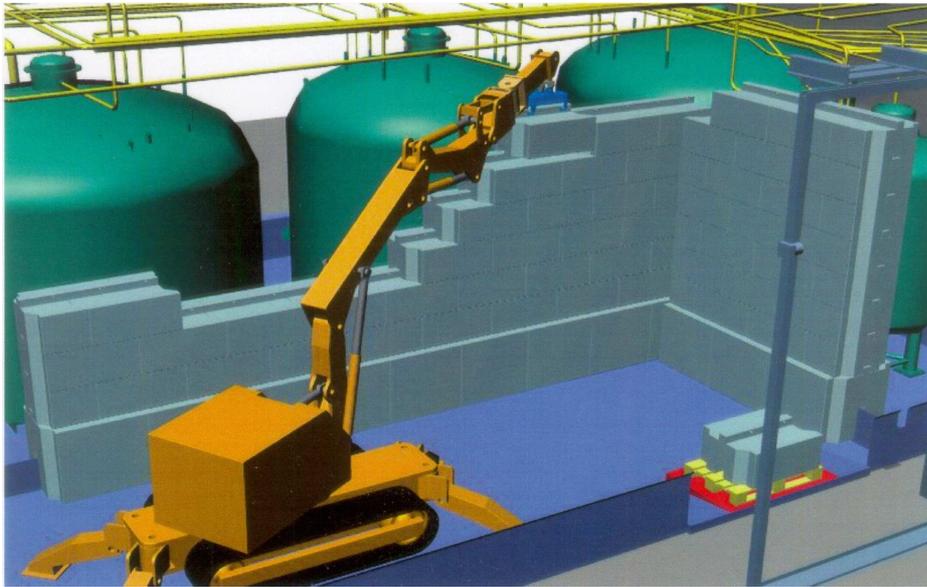


Abbildung 7.8: Setzvorgang der Abschirmsteine (Quelle: CAD-Animation, Fa. Siempelkamp)

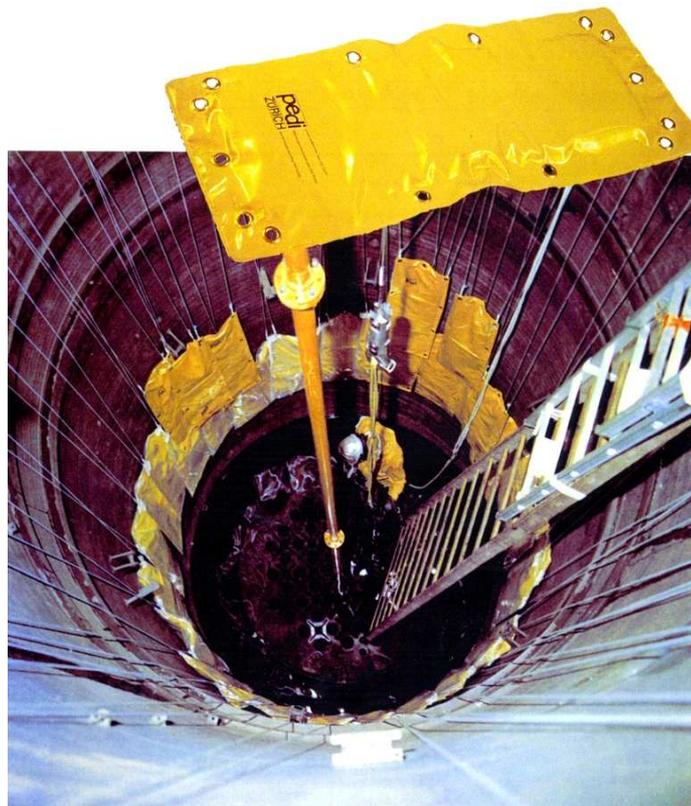


Abbildung 7.9: Abschirmung eines Reaktordruckbehälters mit Bleimatten (Pedi, 2001)



Abbildung 7.10: Kontaminationsschutzzelt bei Rückbauarbeiten (WAK Werkfoto)

7.2.5 Kontaminationsschutzzelte

Um das Freisetzen radioaktiver Stoffe in die Raumluft oder in angrenzende, bereits dekontaminierte Raumbereiche zu vermeiden bzw. zu verhindern, werden Kontaminationsschutzzelte installiert, die den Arbeitsbereich einkapseln. Diese Kontaminationsschutzzelte werden mit Absauganlagen auf Unterdruck gehalten und mit Schuhschwellen versehen. Letztere werden benötigt, wenn Personal vor Ort zum Einsatz kommt. (Rachor, 2002)

Die Zelte selbst bestehen aus handelsüblichen Kunststofffolien, die über eine Tragkonstruktion aus Stahl gespannt werden. Bei Bedarf wird zusätzlich der Boden mit dieser oder stärkerer Folie (z.B. Teichfolie) ausgelegt, welche an den Wandbereichen hochgezogen wird. Damit wird eine zusätzliche Wannenfunktion des Kontaminationsschutzzeltes bei Bearbeitung des Bauteils mit Verfahren, die Prozesswasser benötigen, geschaffen.

Das Bild 7.10 zeigt ein Kontaminationsschutzzelt bei Rückbauarbeiten in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe. Hier wurden für einen Deckendurchbruch die Verfahren Kernbohren und Kreissägen, welche beide Prozesswasser für die Bearbeitung benötigen, eingesetzt. Das Bild zeigt das Setzen des Bohrständers der Kernbohrung durch vor Ort tätiges Personal. Die Tätigkeiten wurden semi-fernbedient durchgeführt.

Entscheidungskomponente

Die Zuordnung der einzelnen Rückbauverfahren zu den Rückbauaufgaben wird von der Entscheidungskomponente übernommen. Ihre Aufgabe ist es, aus der Menge der Rückbauverfahren die für die jeweiligen Aufgaben geeignetsten Verfahren auszuwählen. Dabei ist die Entscheidungsfindung in der Entscheidungskomponente mehrstufig aufgebaut. Die erste Stufe bildet den Prozess des Ausschlusses derjenigen Verfahren, die für die anstehenden Aufgaben nicht geeignet sind. In der zweiten Stufe werden den einzelnen Aufgaben geeignete Verfahren zugeordnet, so dass in der dritten Stufe Ausgangslösungen von Verfahrenskombinationen gebildet werden können. Jede dieser Verfahrenskombination kann die geforderte Gesamtaufgabe lösen. In der vierten und letzten Stufe werden aus den gefundenen Ausgangslösungen die geeignetsten Verfahrenskombinationen je nach Priorisierung der Systemnutzer extrahiert und somit eine optimale Lösung für die Gesamtaufgabe gefunden. Der Gang der Entscheidungsfindung wird in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert.

8.1 Generierung einer Eröffnungsmatrix

Im Fragenkatalog der Anforderungskomponente werden die einzelnen Aufgaben definiert, die für den Rückbau des betreffenden Bauteils bewältigt werden müssen. In der Wissenskomponente werden diesen einzelnen Aufgaben die Rückbauverfahren nebst den Rückbauverfahrenstypen zugeordnet. Diese einzelnen Aufgaben sind, wie in Kapitel 7.1.1 näher erläutert, die Herstellung von Aussparungen, der Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage, der Betonrückbau, der Rückbau von Bewehrung, die Vor-Ort (in Einbaulage) -Trennung von aktiviertem und nicht aktiviertem Beton, die Dekontamination, das Herstellen von Betonkuben, der Vorabausbau von Einbauteilen, die bündige Trennung eines Bauteils zu einer bestehenden Wand, die Erzeugung von glatten Schnittkanten, der Rückbau von Metallauskleidungen und der Asbestausbau.

Die weiteren Aufgaben, die darüber hinaus definiert werden, sind die Erzeugung von Überschnitten, welche je nach Anforderungsprofil mit zusätzlichen Verfahren zu

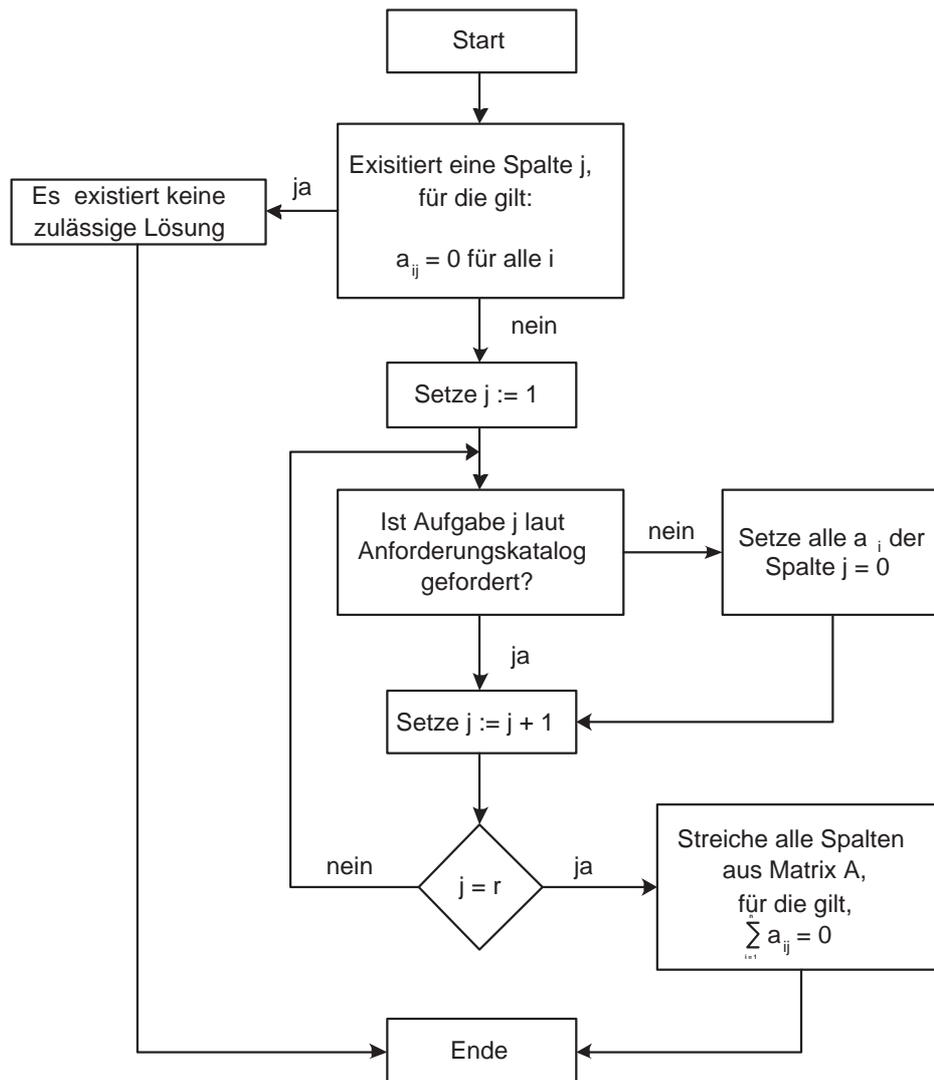


Abbildung 8.1: Flussdiagramm zur Spaltenreduktion der Matrix A

eliminieren sind, und die Notwendigkeit bzw. die Erzeugung von Startlöchern. Die Zuordnung aller Verfahren mit allen Aufgaben wird in einer Binärmatrix vorgenommen (vgl. Formel 8.1).

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{im} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{(n-1)1} & a_{(n-1)2} & \dots & a_{(n-1)j} & \dots & a_{(n-1)m} \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nm} \end{pmatrix} \quad (8.1)$$

Darin bedeutet, dass die j-te Aufgabe vom i-ten Verfahren bewältigt werden kann, falls $a_{ij} = 1$ ist. Diese Matrix bildet das Grundgerüst für den weiteren Verlauf der Verfahrensauswahl. Die Entscheidung, welches Verfahren prinzipiell für die einzelnen Aufgaben angewandt werden kann, wird in der Wissenskomponente definiert.

In der Anforderungskomponente werden die zu bewältigenden Aufgaben definiert, so dass an der Matrix 8.1 Spaltenreduktionen für die Aufgaben vorgenommen werden, die nicht Bestandteil der Aufgabenstellung sind. Dazu wird ein einfacher Algorithmus, der die Spaltenreduktion vornimmt, gestartet (vgl. Abbildung 8.1). Dabei steht r für die Gesamtanzahl aller möglichen, definierten Aufgaben.

Mit Hilfe des Algorithmus aus Abbildung 8.1 kann die Eröffnungsmatrix je nach Aufgabenstellung modifiziert werden. Durch die Nutzung dieser reduzierten Matrix wird der Rechengang vereinfacht. Eine weitere Möglichkeit der Matrixreduktion und damit auch der Reduktion der Rechenleistung, ist die Matrixzeilenreduktion. Diese Zeilenreduktion wird dann vorgenommen, wenn ein Verfahren aufgrund besonderer Anforderungen nicht eingesetzt werden kann. Hierzu werden Regeln aufgestellt, mittels derer festgestellt werden kann, ob ein Verfahren aufgrund von definierten Randbedingungen nicht weiter betrachtet werden kann. Die Grundlagen dieser eingesetzten Regeln im Modell RKA und die Regeln selbst sind in den Kapiteln 8.2 und 8.3 erläutert.

8.2 Regelbasiertes Schließen im Modell RKA

Der erste Teil der Entscheidungskomponente basiert auf Regeln. Diese Regeln legen fest, wie ein Eintrag im Fragebogen mit den Attributen der Verfahren verglichen werden muss. Eine Regel ist dabei die Komponente, die eine Eingabe des Fragebogens mit einem oder mehreren Attributen des Verfahrens vergleicht und danach festlegt, ob das Rückbauverfahren komplett (z.B. Baggeranbaufräsen, da eine Staubbildung unzulässig ist) oder nur ein Verfahrenstyp (z.B. große Baggeranbaufräsen, da diese große Trägergeräte besitzen und aufgrund ihrer Abmessungen nicht zur Anwendung kommen können) für das betrachtete Bauteil ausscheidet oder weiter betrachtet werden kann. Bei der Erzeugung von Regeln werden zunächst die Regeln unterschiedlichen Regelarten zugeordnet, da für manche Entscheidungen mehrere Regeln angewandt werden müssen. Des Weiteren findet eine Zusammenfassung der Regeln in Regelsets statt. Ein Regelset ist dabei zweistufig aufgebaut. Zum einen wird in einem Regelset festgelegt, um welche Art des Abgleichs es sich handelt, zum anderen werden unterschiedliche Regeln diesem Regelset zugeordnet. Die unterschiedlichen Regelarten werden im folgenden erläutert.

- **Statische Regeln**

Hier findet ein „eins zu eins“ Abgleich zwischen zwei statischen Werten statt, d.h. in der Regel wird vorgegeben, dass ein Wert im Anforderungskatalog mit einem Ausdruck der Wissenskomponente korrespondieren muss.

Beispiel: Im Anforderungskatalog erfolgt die Angabe, dass sich das Bauteil in der Luft befindet. Verfahrensseitig erfolgt der Ausdruck, dass eine Bearbeitung in der Luft möglich ist. Daraus folgt, dass das Verfahren weiter betrachtet werden kann.

- **Simple Regeln**

Simple Regeln dienen dazu, einen einzigen Wert abzufragen, ihn mit dem Wert der Vorgabe aus der Regel zu vergleichen und entsprechend dem Ergebnis eine Aktion durchzuführen. Mit der Anwendung von simplen Regeln wird die Voraussetzung eines anschließenden Vergleichs geschaffen.

Beispiel: Im Anforderungskatalog wurde angegeben, dass die Bearbeitung des Bauteils in vertikaler Richtung erfolgt. In der Entscheidungskomponente wird durch die Simple Regel festgelegt, dass der Wert bezüglich der vertikalen Reichweite der Wissenskomponente (Rückbauverfahren) verglichen werden muss. Der eigentliche Vergleich findet im Anschluss mit einer dynamischen Regel statt.

- **Dynamische Regeln**

Mit dynamischen Regeln wird ein Abgleich zwischen einer oder zwei dynamischen Werten erzeugt. In der Regel wird also vorgegeben, dass die Eingabe einer reellen Zahl in der Anforderungskomponente direkt mit dem entsprechenden Wert der Wissenskomponente über einen Operator verglichen und anschließend eine Aktion durchgeführt wird.

Beispiel: In der Anforderungskomponente wurde die Stärke des maximalen Bewehrungsstahls mit 16 mm angegeben. In der Wissenskomponente wurde der maximal zu bearbeitende Bewehrungsstahl des Verfahrens *i* mit 12 mm angegeben. Damit muss dieses Verfahren für die Bearbeitung von Bewehrung ausgeschlossen werden.

- **Dynamische Tabellen Regeln**

Mit dynamischen Tabellen Regeln können dynamische Werte, die in Spalten und Zeilen von Tabellen in der Wissenskomponente vorliegen, mit dynamischen Werten der Anforderungskomponente verglichen werden. Dabei wird der Vergleich so vorgenommen, dass ein bestimmter Wert über einen Operator mit allen Werten einer vorgegebenen Spalte (z.B. den unterschiedlichen Verfahren) verglichen wird. Es besteht auch die Möglichkeit, diese Regel nur mit einer Zeile (einem Verfahren) durchzuführen. Ein Vergleich von zwei Tabellen ergibt sich dann, wenn eine in der Anforderungskomponente vorhandene Tabelle bearbeitet, d.h. eine bestimmte Zeile selektiert wird und diese mit der analogen Tabelle der Wissenskomponente abgeglichen wird. Diese Werte werden wiederum mittels eines Operators verglichen und anschließend eine Aktion ausgeführt.

Beispiel: In der Anforderungskomponente wurde die Breite des kleinsten Durchgangs bis zur Arbeitsstelle mit 80 cm angegeben. Das Verfahren *i* besitzt drei Typen *a*, *b* und *c*, deren Transportabmessungsbreiten 75, 75 und 100 cm betragen. Diese Breiten liegen tabellenförmig vor. Für jeden Typ wird nun geprüft, ob seine Breite größer ist als die angegebene. Falls dies der Fall ist, wird der Rückbauverfahrenstyp für die Rückbauaufgabe ausgeschlossen. In diesem Beispiel wird also der Verfahrenstyp *c* für den Rückbau ausgeschlossen.

Die oben genannten Regeln werden in Regelsets zusammengefasst. Diese Regelsets werden in folgenden Regeltypen untergliedert:

- **Table**

Dieser Regeltyp gibt an, dass es sich um genau eine Regel des Typs Dynamische Regel handelt.

Operator	Erklärung
=	Vergleicht, ob der Inhalt zweier Werte identisch ist.
≠	Vergleicht, ob der Inhalt zweier Werte nicht identisch ist.
>	Vergleicht, ob der Wert der Anforderungskomponente größer ist als der Wert der Wissenskomponente.
≥	Vergleicht, ob der Wert der Anforderungskomponente größer oder gleich ist als der Wert der Wissenskomponente.
<	Vergleicht, ob der Wert der Anforderungskomponente kleiner ist als der Wert der Wissenskomponente.
≤	Vergleicht, ob der Wert der Anforderungskomponente kleiner oder gleich ist als der Wert der Wissenskomponente.
and	Verknüpft zwei Regeln mit dem logischen „und“.
or	Verknüpft zwei Regeln mit dem logischen „oder“.

Tabelle 8.1: Liste der Vergleichsoperatoren, die von Regeln und Regelsets verwendet werden

- **Single**

Dieser Regeltyp gibt an, dass es sich um genau eine Regel des Typs Statische Regel handelt.

- **Multiple**

Das Regelset besteht aus mehreren Regeln, aus den unterschiedlichen Regeltypen. Das Regelset besitzt zusätzlich Anweisungen, wie die Regeln miteinander zu verbinden sind. Diese Verbindungen bestehen entweder aus „and“ oder „or“ Verbindungen. Ist das Ergebnis der Verknüpfung aller Regeln wahr, so wird eine angegebene Aktion ausgeführt.

Beim Anwenden einer Regel werden unterschiedliche Vergleichsoperatoren verwendet, die in Tabelle 8.1 aufgelistet sind.

Nach dem Anwenden einer Regel oder eines Regelsets werden unterschiedliche Aktionen ausgeführt. Diese Aktionen sind „include“, „exclude“ und „next“ und werden anschließend erläutert:

- **Include**

Ist das Ergebnis einer Regel wahr, so wird der logische Wert „true“ zwischengespeichert, andernfalls „false“. Nachdem alle Regeln eines Regelsets ausgewertet wurden, werden diese zwischengespeicherten Werte nach Vorgaben des Regelsets logisch miteinander verknüpft.

Ist das Ergebnis der Verknüpfung wahr, bedeutet das Schlüsselwort *include*, dass das Verfahren weiterhin betrachtet werden kann. Andernfalls wird es ausgeschlossen.

Beispiel: Prüfung des zur Verfügung stehenden Arbeitsplatzes

$L_{Arb} \geq L_{tech,i} \rightarrow \text{wahr} \rightarrow \text{true}$ **und**

$B_{Arb} \geq B_{tech,i} \rightarrow \text{wahr} \rightarrow \text{true}$ **und**

$H_{Arb} \geq H_{tech,i} \rightarrow \text{wahr} \rightarrow \text{true} \rightarrow$ Verfahren kann weiter betrachtet werden.

- **Exclude**

Ist das Ergebnis einer Regel wahr, so wird der logische Wert „false“ zwischengespeichert, andernfalls „true“. Nachdem alle Regeln eines Regelsets ausgewertet wurden, werden diese zwischengespeicherten Werte nach Vorgaben des Regelsets logisch miteinander verknüpft.

Ist das Ergebnis der Verknüpfung wahr, bedeutet das Schlüsselwort *exclude*, dass das Verfahren ausgeschlossen wird. Andernfalls kann es weiterhin betrachtet werden.

Beispiel: Materialstärke des Metallliners (d_{Pl}) ist größer als die maximale Bearbeitungsstärke von Metall des Verfahrens i ($d_{max,Pl,tech,i}$)

$d_{Pl} > d_{max,Pl,tech,i} \rightarrow \text{wahr} \rightarrow \text{false}$ (logischer Wert)

\rightarrow Verfahren wird ausgeschlossen!

- **Next**

Diese Aktion tritt nur bei Regelsets des Typs *multiple* auf. Ist das Ergebnis einer Regel wahr, dann bedeutet dieses Schlüsselwort, dass das Regelset nicht beachtet werden muss. Dann wird zum nächsten Regelset gesprungen.

8.3 Verfahrensausschluss

In einem ersten Schritt werden die Regeln und Regelsets aufgeführt, die zu einem Ausschluss von Rückbauverfahren oder Teilen dieser Verfahren (Typen) führen können und somit eine Zeilenreduktion der Matrix A (vgl. Matrix 8.1) bewirken:

1. Wenn ein Bauteil aktiviert ist und wenn der aktive Beton vom Restbeton vor Ort getrennt werden soll und diese Trennung in Einbaulage durchgeführt werden soll, dann werden alle Verfahren ausgeschlossen, die zwar eine Vor-Ort-Trennung in Einbaulage ermöglichen, deren Reichweite in horizontaler und vertikaler Richtung aber geringer ist als die angegebene Bauteiltiefe des aktivierten Betons.
2. Wenn sich das Bauteil in der Luft befindet, scheiden alle Verfahren aus, mit denen kein Bauteilabtrag in der Luft durchgeführt werden kann.
3. Wenn sich das Bauteil unter Wasser befindet, scheiden alle Verfahren aus, mit denen kein Bauteilabtrag unter Wasser durchgeführt werden kann.
4. Wenn ein Bauteil in vertikaler Richtung, also von oben nach unten bzw. unten nach oben rückgebaut wird, wird die maximale Bearbeitungshöhe des Verfahrens mit der zurückzubauenden Bauteilhöhe nebst verwendeter Subsysteme wie Bühnen, Gerüste, etc. (vgl. Kapitel 7.2.1) verglichen. Ist diese Reichweite kleiner als die Bauteilhöhe, werden die betreffenden Verfahren ausgeschlossen.

5. Wenn ein Bauteil in horizontaler oder in vertikaler Richtung rückgebaut wird (z.B. die Herstellung eines Decken- oder Wanddurchbruchs), wird die maximale technische Bearbeitungstiefe des Verfahrens mit der zurückzubauenden Bauteildicke verglichen. Ist diese Reichweite kleiner als die Bauteildicke, werden die betreffenden Verfahren ausgeschlossen.
6. Wenn die Transportabmessungen nach Länge, Breite oder Höhe der einzelnen betrachteten Rückbauverfahren größer sind als der kleinste Durchgang bis zur Arbeitsstelle (der Transportweg) nach Länge, Breite oder Höhe, werden die betreffenden Verfahren oder Verfahrenstypen ausgeschlossen.
7. Wenn der benötigte Arbeitsplatz nach Länge, Breite oder Höhe der einzelnen betrachteten Rückbauverfahren kleiner ist als der zur Verfügung gestellte Arbeitsplatz nach Länge, Breite oder Höhe, oder geringer ist als die Abmessungen der verwendeten Subsysteme wie Bühnen, Gerüste, etc. nach Länge, Breite oder lichter Höhe, werden die betreffenden Verfahren oder Verfahrenstypen ausgeschlossen.
8. Wenn das Gewicht oder die Flächenpressung der einzelnen betrachteten Rückbauverfahren größer ist als die maximale Belastbarkeit der Decke bzw. des Bodens am Arbeitsplatz, werden die betreffenden Verfahren oder Verfahrenstypen ausgeschlossen.
9. Wenn Subsysteme wie Bühnen, Gerüste, etc. (vgl. Kapitel 7.2.1) verwendet werden und das Gewicht oder die Flächenpressung der einzelnen betrachteten Rückbauverfahren größer ist als die maximale Belastbarkeit der verwendeten Subsysteme, besteht für den Systemnutzer zunächst die Möglichkeit, andere Subsystemtypen zu wählen oder vorhandene Bühnen, Gerüste, etc. zu ertüchtigen. Nach dieser Maßnahme wird wiederum geprüft, ob das Gewicht oder die Flächenpressung der einzelnen betrachteten Rückbauverfahren größer ist als die maximale Belastbarkeit des verwendeten Subsystems. Alle Verfahren oder Verfahrenstypen, deren Belastungsdaten größer sind als die neuen maximalen Belastungsdaten des verwendeten Subsystems, werden ausgeschlossen.
10. Wenn das Bauteil aus Platz-, Strahlenschutz oder anderen Gründen nur von einer Seite aus zugänglich ist, scheidet alle Verfahren aus, die im Leistungsspektrumspunkt „Notwendigkeit der beidseitigen Zugänglichkeit eines Bauteils“ mit *true* markiert wurden.
11. Wenn der Durchmesser des stärksten Bewehrungsstahls oder der stärksten Bügelbewehrung größer ist als der maximal bearbeitbare Stahldurchmesser des betrachteten Verfahrens oder des Verfahrenstypes, muss das Verfahren oder der Verfahrenstyp für den Bearbeitungspunkt „Rückbau von Bewehrung“ ausscheiden.
12. Wenn im Bauteil Fugen vorhanden sind und diese bei der Bearbeitung vor eindringender Flüssigkeit wie z.B. Prozesswasser geschützt werden sollen, müssen

alle Verfahren ausscheiden, die bei der Bearbeitung des Bauteils Prozesswasser benötigen.

13. Wenn das Bauteil ausschließlich fernhantiert bearbeitet werden soll, scheidet alle Verfahren aus, die in ihrem Leistungsspektrumspunkt „fernbediente Bearbeitung“ den Wert *false* besitzen.
14. Wenn das Bauteil ausschließlich semi-fernhantiert bearbeitet werden soll, scheidet alle Verfahren aus, die in ihrem Leistungsspektrumspunkt „semi-fernbediente Bearbeitung“ den Wert *false* besitzen.
15. Wenn keine Vibrationen bzw. Stoßbelastungen in das Bauwerk eingeleitet werden dürfen, scheidet alle Verfahren aus, die bei der Bearbeitung Vibrationen bzw. Stoßbelastungen erzeugen.
16. Wenn Vibrationen bzw. Stoßbelastungen nur in einem bestimmten zulässigen Maße in das Bauteil eingeleitet werden dürfen, müssen alle Verfahren ausscheiden, deren Vibrationen bzw. Stoßbelastungen höher sind als die zulässigen.
17. Wenn bei den Rückbautätigkeiten kein Funkenflug entstehen darf, scheidet alle Verfahren aus, die bei der Bearbeitung Funken erzeugen.
18. Wenn kein Wasser in das Bauwerk eingeleitet werden darf, scheidet alle Verfahren aus, die bei der Bearbeitung Prozesswasser benötigen.
19. Wenn bei den Rückbautätigkeiten kein Staub entstehen darf, scheidet alle Verfahren aus, die bei der Bearbeitung Staub emittieren, wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass bei der Verwendung von Absauganlagen ein Reststaubgehalt anfällt.
20. Wenn Staub bei den Rückbautätigkeiten nur in einem bestimmten zulässigen Maße entstehen darf und keine Absauganlagen verwendet werden, müssen alle Verfahren ausscheiden, deren Staubklasse höher ist als die zulässige.
21. Wenn Staub bei den Rückbautätigkeiten nur in einem bestimmten zulässigen Maße entstehen darf und Absauganlagen verwendet werden, müssen alle Verfahren ausscheiden, deren Staubklasse trotz Verwendung von Absauganlagen höher ist als die zulässige.
22. Wenn beim Rückbau eine Absauganlagen verwendet werden soll, müssen alle Absauganlagen ausscheiden, deren Transportabmessungen nach Länge, Breite oder Höhe größer sind als der kleinste Durchgang bis zur Arbeitsstelle (der Transportweg) nach Länge, Breite oder Höhe.
23. Wenn beim Rückbau eine Absauganlagen verwendet werden soll, müssen alle Absauganlagen ausscheiden, deren Abmessungen nach Länge, Breite oder Höhe größer sind als der zur Verfügung stehende Arbeitsplatz.

24. Wenn beim Rückbau glatte Schnittkanten entstehen sollen, müssen alle Verfahren ausscheiden, die zwar glatte Schnittkanten erzeugen können, deren maximale Bearbeitungstiefe aber kleiner ist als die geforderte Tiefe der glatten Schnittkanten.
25. Wenn glatte Schnittkanten beiderseits des Bauteils erzeugt werden sollen, ist zu prüfen, ob die erreichbare Tiefe des betrachteten Rückbauverfahrens, dessen Leistungsspektrum glatte Schnittkanten erzeugt, größer ist als die Bauteildicke. Ist dies nicht der Fall, ist weiterhin zu prüfen, ob das Bauteil von beiden Seiten aus zugänglich ist. Falls ja, ist zu prüfen, ob die erreichbare Tiefe des betrachteten Rückbauverfahrens mindestens der Hälfte der Bauteildicke entspricht und ob der zur Verfügung gestellte Platz auf der gegenüberliegenden Seite des Bauteils nach Länge, Breite oder Höhe größer ist als der benötigte Platz des betrachteten Verfahrens. Wenn dies nicht der Fall ist, ist das betrachtete Verfahren auszuschließen. Falls das Bauteil nur von einer Seite aus bearbeitet werden kann, ist das betrachtete Verfahren auszuschließen (vgl. Abbildung 8.2).
26. Wenn keine Querkontamination zulässig ist, scheidet alle Verfahren aus, die eine Querkontamination verursachen.
27. Wenn die Materialstärke des Liners größer ist als die maximal angegebene Bearbeitungsstärke des Verfahrens, ist das betrachtete Verfahren auszuschließen.
28. Wenn das betrachtete Verfahren das angegebene Material des Liners nicht bearbeiten kann, ist es auszuschließen.
29. Wenn die Materialstärke von Ankerplatten, Stahlträgern und Schienen größer ist als die maximal angegebene Bearbeitungsstärke des Verfahrens, ist das betrachtete Verfahren auszuschließen.
30. Wenn der Beton eine Stahlkugelbewehrung enthält, scheidet alle Verfahren aus, mit denen eine Bearbeitung von stahlkugelbewehrtem Beton nicht möglich ist.

Durch das regelbasierte Schließen werden alle denkbaren Randbedingungen erfasst, so dass die Verfahren entweder ganz von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen oder ein Ausschluss für eine bestimmte Aufgabe stattfindet. Wenn das Verfahren ganz ausscheidet, bildet sich in der Matrix A eine Leerzeile, die gestrichen werden kann. Wenn lediglich ein Ausschluss eines Verfahrens zu einer bestimmten Aufgabe stattfindet, dann wird nur der Wert a_{ij} von 1 auf 0 gesetzt. Dies bedeutet, dass die prinzipielle Eignung eines Verfahrens j , eine Aufgabe i zu bewältigen, einer näheren Prüfung nicht standgehalten hat. Die Vorgehensweise der Zeilenreduktion zeigt das Flussbild 8.3.

In der reduzierten Matrix A^* befinden sich alle Einzelaufgaben, die in der Summe die Gesamtaufgabe abbilden, und alle Verfahren, die die technischen Randbedingungen zur Lösung der Einzelaufgaben erfüllen. Somit kann durch eine Partition der Matrix A^* eine Lösung für die Gesamtaufgabe gefunden werden (vgl. Matrix 8.2).

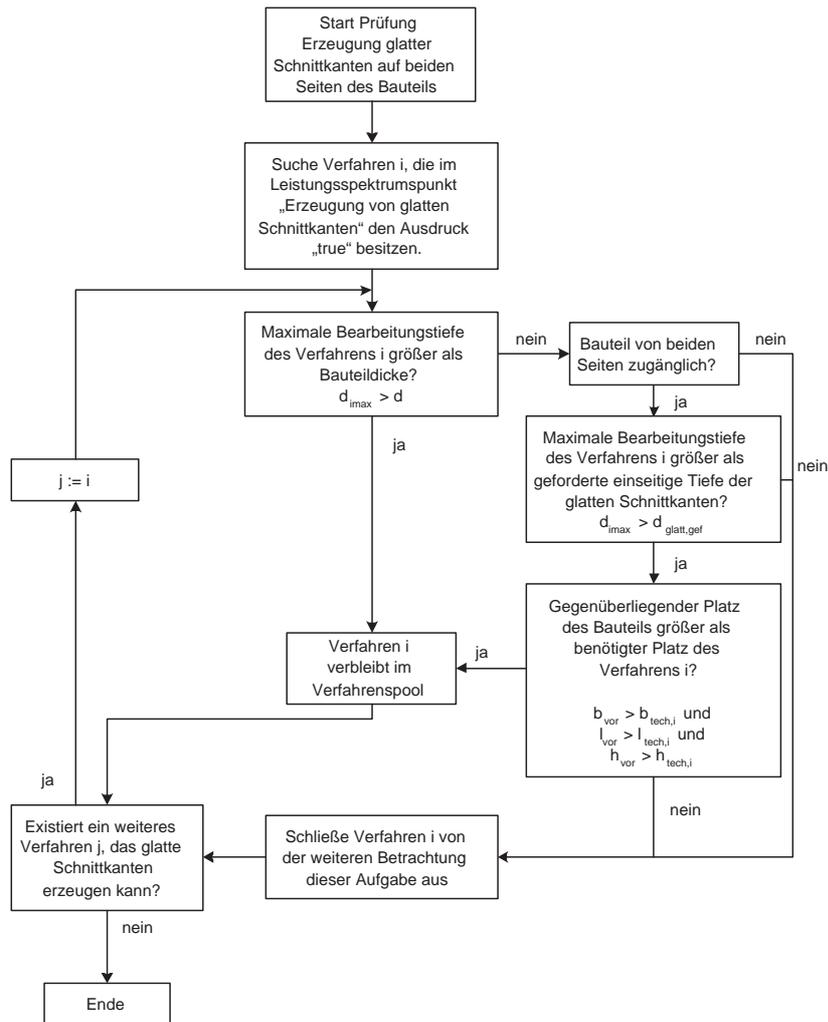


Abbildung 8.2: Regelset zum Ausschluss von Verfahren bei der Aufgabe „Erzeugung von glatten Schnittkanten“

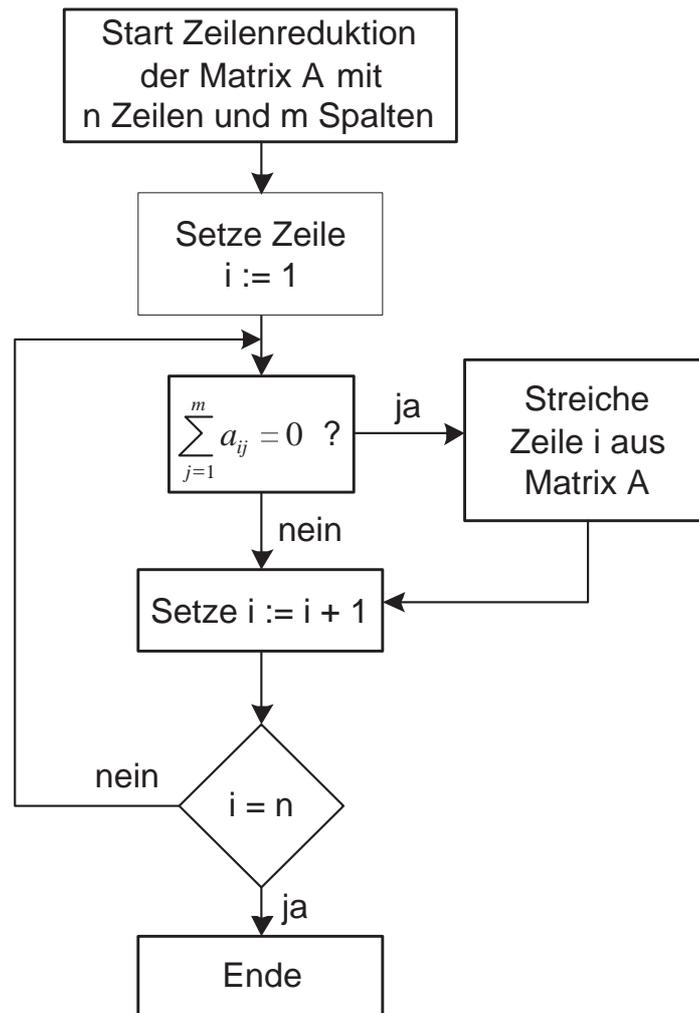


Abbildung 8.3: Vorgehensweise der Zeilenreduktion an der Matrix A

$$A^* = \left(\begin{array}{cccccc|c} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1m} & \sum_{j=1}^m a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2m} & \sum_{j=1}^m a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{im} & \sum_{j=1}^m a_{ij} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{n^*1} & a_{n^*2} & \dots & a_{n^*j} & \dots & a_{n^*m} & \sum_{j=1}^m a_{n^*j} \end{array} \right) \quad (8.2)$$

Um eine Bewertung der einzelnen Verfahren in Abhängigkeit der zu bewältigenden Aufgaben durchführen zu können, werden Wertematrizen generiert, die die identischen Spalten- und Zeilenzuordnung und -anzahl besitzen wie Matrix A^* . Zur Berechnung der Zeiten und Kosten der einzelnen Vorgänge wurde ein Kalkulationstool generiert, welches nachfolgend beschrieben wird.

8.4 Kalkulationstool

In der Wissenskomponente (vgl. Kapitel 7.1.1) wurde erläutert, wie die Investitionskosten in Zeitkosten umgerechnet werden. Aufbauend auf diesen Zeitkosten werden für die Wertematrizen die einzelnen Bearbeitungszeiten für diejenigen Verfahren berechnet, die für die Aufgaben geeignet sind. Dabei werden die Zeiten für jede Aufgabe bestimmt, d.h. für jede Aufgabe wird eine Zeit ermittelt, unabhängig davon, ob das betrachtete Verfahren auch andere Aufgaben bewältigen kann.

Mit den Einzelzeiten und der sich daraus ergebenden Gesamtbearbeitungszeit eines Verfahrens und der benötigten Personalstärke können somit die verfahrensspezifischen Bearbeitungskosten für das Bauteil ermittelt werden.

8.4.1 Rückbau von Metallauskleidungen

Beim Rückbau von Metallauskleidungen wird der Liner so geschnitten, dass die Einzelstücke in die zur Verfügung stehenden Transportbehältnisse eingelegt werden können. Dazu muss ein Schnittmuster angelegt werden, um die Transportbehältnisse optimal zu befüllen. Wenn in der Anforderungskomponente angegeben wurde, dass ein Liner mit zurückzubauen ist, wird zunächst geprüft, aus welchem Material der Liner besteht und welche Materialstärke er besitzt (vgl. Kapitel 8.3). Des Weiteren erfolgt eine Abfrage, in welchen Abmessungen der Liner ausgeschnitten werden soll und ob, z.B. bei einer Durchbruchherstellung, auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls ein Liner zurückzubauen ist.

In einem ersten Schritt wird überprüft, wie viele Einzelplatten aus dem gesamten Bauteil geschnitten werden müssen, um einen möglichst geringen zeitlichen Aufwand zu erzeugen und die Schnittfläche zu minimieren. Dazu wird zunächst ein einfaches Schnittmuster angelegt und überprüft, ob die Einzelteile in „horizontaler“ oder „vertikaler“ Anordnung herausgetrennt werden sollten, um eine möglichst geringe Anzahl $n_{min,Pl}$ Einzelplatten zu erhalten (vgl. Abbildung 8.4).

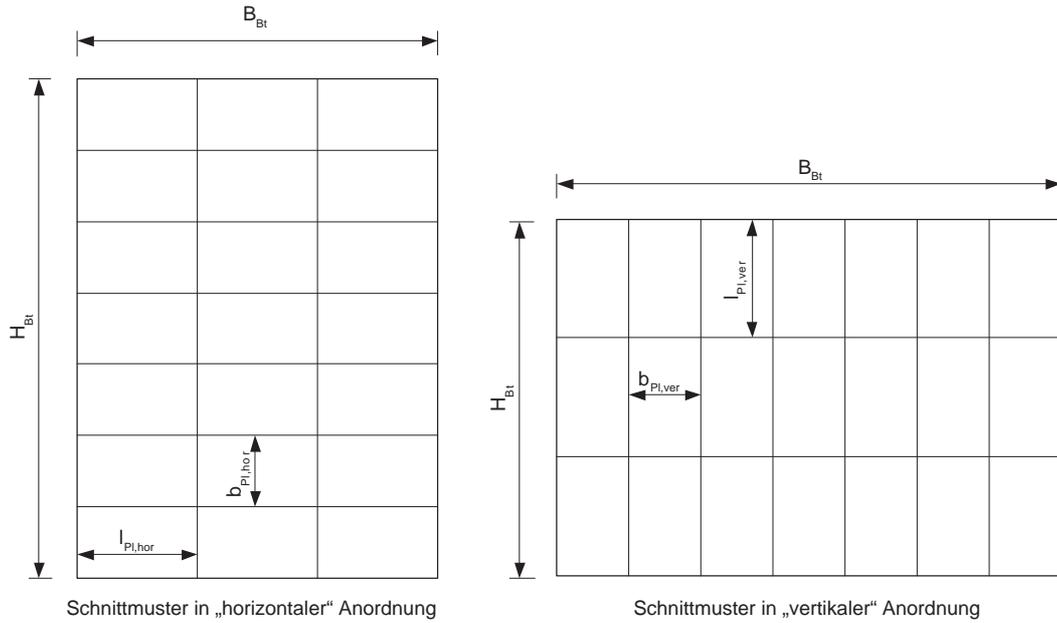


Abbildung 8.4: Schnittmuster in „horizontaler“ und „vertikaler“ Anordnung

Hierzu wird zunächst die Anzahl der Platten ermittelt, die sich durch die maximalen Plattenabmessungen ($b_{Pl,max}$ und $l_{Pl,max}$) ergeben, welche von den Systemnutzern definiert wurden. Dabei wird in Plattenanzahl in „vertikaler“ Anordnung (Formeln 8.4) und in Plattenanzahl in „horizontaler“ Anordnung (Formeln 8.3) unterschieden. Die optimale Anordnung ergibt sich nach Formel 8.5.

$$\begin{aligned}
 n_{Pl,hor}^{hor} &= \left\lfloor \frac{B_{Bt}}{l_{Pl,max}} \right\rfloor + \begin{cases} 1 & \text{für } \frac{B_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{R} \\ 0 & \text{für } \frac{B_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{N} \end{cases} & n_{Pl,hor}^{hor} \in \mathbb{N} \\
 n_{Pl,ver}^{hor} &= \left\lfloor \frac{H_{Bt}}{b_{Pl,max}} \right\rfloor + \begin{cases} 1 & \text{für } \frac{H_{Bt}}{b_{Pl,max}} \in \mathbb{R} \\ 0 & \text{für } \frac{H_{Bt}}{b_{Pl,max}} \in \mathbb{N} \end{cases} & n_{Pl,ver}^{hor} \in \mathbb{N}
 \end{aligned} \tag{8.3}$$

$$n_{Pl}^{hor} = n_{Pl,hor}^{hor} * n_{Pl,ver}^{hor}$$

$$\begin{aligned}
 n_{Pl,ver}^{ver} &= \left\lfloor \frac{H_{Bt}}{l_{Pl,max}} \right\rfloor + \begin{cases} 1 & \text{für } \frac{H_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{R} \\ 0 & \text{für } \frac{H_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{N} \end{cases} & n_{Pl,ver}^{ver} \in \mathbb{N} \\
 n_{Pl,hor}^{ver} &= \left\lfloor \frac{B_{Bt}}{b_{Pl,max}} \right\rfloor + \begin{cases} 1 & \text{für } \frac{B_{Bt}}{b_{Pl,max}} \in \mathbb{R} \\ 0 & \text{für } \frac{B_{Bt}}{b_{Pl,max}} \in \mathbb{N} \end{cases} & n_{Pl,hor}^{ver} \in \mathbb{N}
 \end{aligned} \tag{8.4}$$

$$n_{Pl}^{ver} = n_{Pl,ver}^{ver} * n_{Pl,hor}^{ver}$$

$$n_{Pl,min} = \min \{ n_{Pl}^{hor}; n_{Pl}^{ver} \} \tag{8.5}$$

Als weiteren Optimierungsschritt muss geprüft werden, ob eine gemischte Plattenanordnung eine weitere Reduktion der Plattenzahl ergibt. Dazu wird bei der „vertikalen“

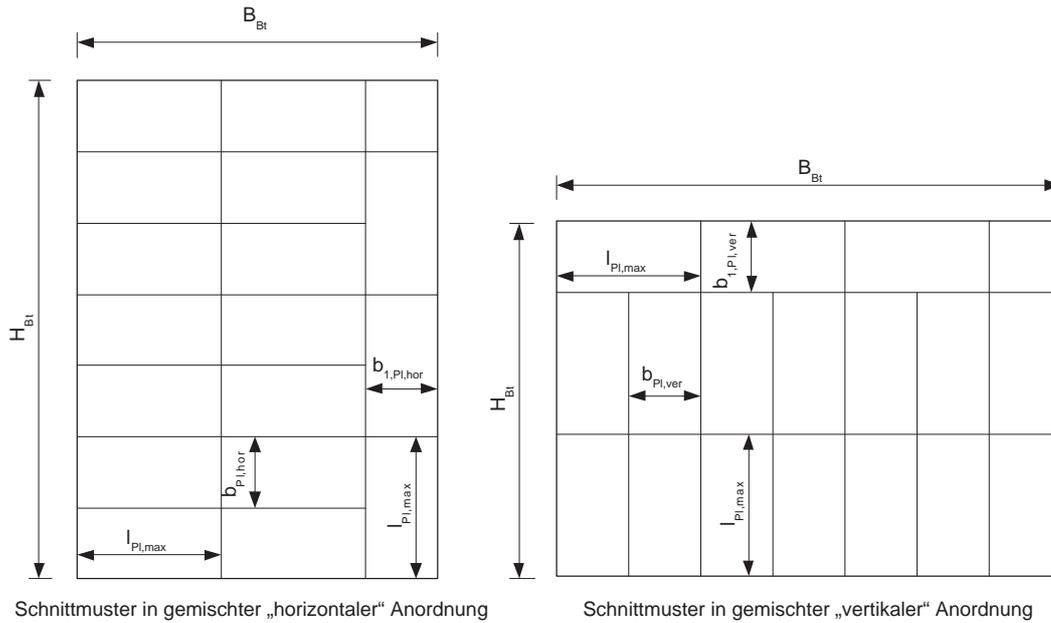


Abbildung 8.5: Schnittmuster in gemischter Anordnung

Anordnung die oberste Reihe gelöscht und die Plattenlänge bis zur Maximalplattenlänge vergrößert. Analog dazu wird bei der „horizontalen“ Anordnung die äußere Reihe gelöscht und ebenfalls die Plattenlänge bis zur Maximalplattenlänge vergrößert (vgl. hierzu Abbildung 8.5). Dabei muss die neu entstandene Plattenbreite geringer sein als die maximal zulässige Plattenbreite (vgl. Formel 8.6). Falls dies nicht zutrifft, ist keine weitere Optimierung mehr möglich.

$$\begin{aligned}
 B_{Bt} - (n_{Pl,hor}^{hor} - 1) * l_{Pl,max} &= b_{1,Pl,hor} \leq b_{Pl,max} && \text{für „horizontale“ Anordnung} \\
 H_{Bt} - (n_{Pl,ver}^{ver} - 1) * l_{Pl,max} &= b_{1,Pl,ver} \leq b_{Pl,max} && \text{für „vertikale“ Anordnung}
 \end{aligned}
 \quad (8.6)$$

Die neu entstehenden, entgegengesetzt auszurichtenden Platten erhalten ebenfalls die maximale Plattenlänge $l_{Pl,max}$. Die Gesamtplattenanzahl dieser gemischten Anordnung ergibt sich dann wie folgt:

1. Bei der gemischten „horizontalen“ Anordnung:

$$n_{Pl}^{gh} = (n_{Pl,hor}^{hor} - 1) * n_{Pl,ver}^{hor} + \left\lfloor \frac{B_{Bt}}{l_{Pl,max}} \right\rfloor + \begin{cases} 1 & \text{für } \frac{B_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{R} \\ 0 & \text{für } \frac{B_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{N} \end{cases} \quad (8.7)$$

2. Bei der gemischten „vertikalen“ Anordnung:

$$n_{Pl}^{gv} = (n_{Pl,hor}^{ver} - 1) * n_{Pl,ver}^{ver} + \left\lfloor \frac{H_{Bt}}{l_{Pl,max}} \right\rfloor + \begin{cases} 1 & \text{für } \frac{H_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{R} \\ 0 & \text{für } \frac{H_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{N} \end{cases} \quad (8.8)$$

Zur Bestimmung der Minimalplattenanzahl wird Formel 8.5 erweitert zu:

$$n_{Pl,min} = \min \left\{ n_{Pl}^{hor}; n_{Pl}^{ver}; n_{Pl}^{gh}; n_{Pl}^{gv} \right\} \quad (8.9)$$

Nach der Berechnung der Plattenanzahl und der -abmessungen wird die gesamte Schnittlänge ermittelt. Dabei ergeben sich durch die vier unterschiedlichen Schnittmuster unterschiedliche Berechnungsweisen für die Schnittlänge.

1. „Horizontale“ Anordnung:

$$L_{Sch}^{hor} = B_{Bt} * (n_{Pl,hor}^{hor} + 1) + H_{Bt} * (n_{Pl,ver}^{hor} + 1) \quad (8.10)$$

2. „Vertikale“ Anordnung:

$$L_{Sch}^{ver} = B_{Bt} * (n_{Pl,hor}^{ver} + 1) + H_{Bt} * (n_{Pl,ver}^{ver} + 1) \quad (8.11)$$

3. Gemischte „horizontale“ Anordnung:

$$L_{Sch}^{gh} = H_{Bt} * (n_{Pl,hor}^{hor} + 1) + (B_{Bt} - b_{1,Pl,hor}) * (n_{Pl,ver}^{hor} + 1) + \left(\left| \frac{H_{Bt}}{l_{Pl,max}} \right| + n \right) * b_{1,Pl,hor} \quad (8.12)$$

$$\text{wobei } n = \begin{cases} 2 & \text{für } \frac{H_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{R} \\ 1 & \text{für } \frac{H_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{N} \end{cases}$$

4. Gemischte „vertikale“ Anordnung:

$$L_{Sch}^{gv} = B_{Bt} * (n_{Pl,ver}^{ver} + 1) + (H_{Bt} - b_{1,Pl,ver}) * (n_{Pl,hor}^{ver} + 1) + \left(\left| \frac{B_{Bt}}{l_{Pl,max}} \right| + n \right) * b_{1,Pl,ver} \quad (8.13)$$

$$\text{wobei } n = \begin{cases} 2 & \text{für } \frac{B_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{R} \\ 1 & \text{für } \frac{B_{Bt}}{l_{Pl,max}} \in \mathbb{N} \end{cases}$$

Unter Berücksichtigung der Plattenstärke und der unterschiedlichen Schnittleistung der einzelnen Rückbauverfahren ergeben sich die Rückbauzeit und die Rückbaukosten für diesen Rückbauschritt.

In der Wissenskomponente wurden dazu für jedes Verfahren Schnittgeschwindigkeiten in cm/min für unterschiedliche Plattenstärken hinterlegt. Diese unterschiedlichen Schnittdauern werden mit der Gesamtschnittlänge L_{sch} multipliziert und die Rüstzeiten (Werkzeugtransport- und Umsetzzeiten) $T_{Ruest,MS}$ und die Verschleißteilwechselzeiten $T_{Verschlwech,Tech_i}$ - die sich aus dem Quotienten der Gesamtschnittlänge und der Standlänge ergibt - hinzuaddiert. Diese Gesamtzeiten lassen sich dann in einer Matrix (vgl. Matrix 8.15) darstellen, welche die Materialstärken und die unterschiedlichen Verfahren abbildet. Um die Lösung zur gegebenen Materialstärke für alle Rückbauverfahren

zu erhalten, wird diese Matrix mit einem Binärvektor, welcher die Ziffer 1 an der gegebenen Materialstärke besitzt, multipliziert (vgl. Formel 8.16). Dieser Binärvektor ist ein Einheitsvektor, d.h. er besitzt nur an dieser einen Stelle die Ziffer 1, ansonsten die Ziffer 0. Der Lösungsvektor v_{Sch}^t wird transponiert und dient sodann als Spalte der Wertezeitenmatrix W_T^* .

$$t_{Tech_i,d_j} = T_{L,d_j} * L_{sch} + T_{Ruest,MS} + L_{sch}/L_{Standlaenge,Tech_i} \quad (8.14)$$

$$T_{Sch} = \begin{pmatrix} t_{tech1,d_1} & t_{tech1,d_2} & \dots & t_{tech1,d_j} & \dots & t_{tech1,d_n} \\ t_{tech2,d_1} & t_{tech2,d_2} & \dots & t_{tech2,d_j} & \dots & t_{tech2,d_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{tech_i,d_1} & t_{tech_i,d_2} & \dots & t_{tech_i,d_j} & \dots & t_{tech_i,d_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{tech_n,d_1} & t_{tech_n,d_2} & \dots & t_{tech_n,d_j} & \dots & t_{tech_n,d_n} \end{pmatrix} \quad (8.15)$$

$$v_{Sch}^t = T_{sch} * v_{d_i}^{Sch} \quad (8.16)$$

Eine weitere Möglichkeit des Linerausbaus besteht darin, aus dem Liner Kreise heraus zu schneiden, falls das Material in Fässer verfüllt werden soll. Der Durchmesser ergibt sich aus dem lichten Fassdurchmesser des zu verwendenden Fasses. Durch Modifikation der in diesem Kapitel genannten Formeln lässt sich die Gesamtzeit ermitteln. Durch die Wahl von kreisförmigen Schnitten erhöht sich u.U. das Abfallvolumen, da sich durch die Stege, die bei dieser Art des Bearbeitungsprozesses anfallen, die Sperrigkeit erhöht und diese auch in den Fässern gestapelt werden müssen.

8.4.2 Dekontamination

Zur Berechnung der Zeitdauern für die Dekontamination wird zunächst die Oberfläche (A_{Bt}) des Bauteils ermittelt, welche sich bei rechteckigen Bauteilen aus der Multiplikation der Bauteilhöhe mit der Bauteilbreite, bei zylindrischen Bauteilen aus der Multiplikation des Bauteilumfanges / -teilumfanges mit der Bauteilhöhe oder bei beliebigen Grundrissformen aus der Multiplikation der abgewinkelte Länge des Bauteiles mit seiner Höhe ergibt.

In der Wissenskomponente wurden die Flächenleistungen der einzelnen Verfahren, die eine Dekontamination durchführen können, in m^2/h angegebenen. Zur Ermittlung der Gesamtzeit für die Dekontamination wird die Flächenleistung mit der zu bearbeitenden Fläche multipliziert. Hierbei ist zu beachten, dass die Bearbeitungstiefe der Verfahren unterschiedlich hoch ($d_{max,Tech_i}$) ist. Diese Tatsache wird dadurch berücksichtigt, dass die Fläche unter Umständen mehrmals bearbeitet werden muss (vgl. Formel 8.17).

$$n_{deko,Tech_i} = \left\lceil \frac{d_{Deko}}{d_{max,Tech_i}} \right\rceil + 1 \quad (8.17)$$

Die Anzahl der Dekontaminationsschritte richtet sich nach dem Quotienten zwi-

schen der Dekontaminationstiefe (d_{Deko}) und der maximal möglichen Dekontaminationsstiefe eines Verfahrens i ($d_{max, Tech_i}$).

Falls sich in der Bauwerksstruktur harte¹ bzw. abrasive² Zusätze ($\eta_{hart, Tech_i}$, $\eta_{abrasiv, Tech_i}$) befinden und/oder fernbedient oder semi-fernbedient ($\eta_{fern, Tech_i}$, $\eta_{semi-fern, Tech_i}$) gearbeitet werden muss, ist die Flächenleistung abzumindern. Damit ergibt sich die Bearbeitungszeit für die Dekontamination der einzelnen Verfahren nach Formel 8.18. Für die Gesamtzeit, welche sich durch Hinzunahme der von Rüst- bzw. Umsetzzeiten ergibt, wird Formel 8.18 erweitert (vgl. Formel 8.19).

$$T_{deko, Tech_i}^{Bearb} = n_{deko, Tech_i} * Q_{deko, Tech_i} * \eta_{hart, Tech_i} * \eta_{abrasiv, Tech_i} * \eta_{fern, Tech_i} * \eta_{semi-fern, Tech_i} \quad (8.18)$$

$$T_{deko, Tech_i} = T_{deko, Tech_i}^{Bearb} + T_{deko, Tech_i}^{Ruest} + T_{deko, Tech_i}^{Umsetz} \quad (8.19)$$

Diese Abminderungsfaktoren sind verfahrens- und projektspezifisch, so dass diese für jedes Projekt neu zu ermitteln sind. Im Falle der semi-fernbedienten Bearbeitung ist der Wert $\eta_{fern, Tech_i}$ gleich 1 zu setzen, im umgekehrten Fall, also bei einer fernbedienten Bearbeitung, wird der Wert $\eta_{semi-fern, Tech_i}$ gleich 1 gesetzt.

Die einzelnen Zeitwerte fließen in die Wertezeitenmatrix W_T^* in die Spalte für die Dekontamination.

8.4.3 Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage

Der Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage ist ein Betonrückbau ohne Rückbau von Bewehrung, so dass auf die Daten der Wissenskomponente für den Betonrückbau aus Kapitel 7.1.4 zurückgegriffen werden kann.

Je nach angegebenem Betontyp werden zunächst die Rückbauleistungsdaten der einzelnen Verfahren ermittelt. Dazu wird ein Einheitsvektor, welcher der Betonklassifikation entspricht, mit den Leistungsdaten, die als Vektor vorliegen, multipliziert (vgl. Formel 8.20).

$$Q_{tech_i}^{Kl} = v^{Betontyp} * v_{tech_i}^Q \quad (8.20)$$

Die Leistungsangabe des Verfahrens i für den vorhandenen Betontyp ($Q_{tech_i}^{Kl}$) liegt als „Leistung für einen mittleren Bewehrungsanteil“ vor. Da der Beton bis zur 1. Bewehrungslage keine Bewehrung enthält, wird diese Rückbauleistung erhöht ($\eta_{Beton, Tech_i}$). Des weiteren erfolgt eine Abminderung für Betone, die harte ($\eta_{hart, Tech_i}$) bzw. abrasive Zusätze ($\eta_{abrasiv, Tech_i}$), Stahlfaserzusätze ($\eta_{Sf, Tech_i}$) und/oder eine Stahlkuglbewehrung ($\eta_{Sk, Tech_i}$) besitzen. Schließlich muss noch eine Leistungsminderung durch eine eventu-

¹Für die Lebensdauer und für den Bearbeitungsfortschritt von Diamantwerkzeugen ist die Härte des Zuschlagstoffes von maßgebender Bedeutung. Die herkömmliche Einteilung der Festigkeitsklassen spielt hierbei eine untergeordnete Rolle. Harte Betonzuschlagstoffe sind z.B. Flussschotter, Basalt, Quarz, Flint, Radiolarit, Quarzit, Basalt. (Quelle: <http://www.dr-schulze.de/deutsch/handbook/02.htm>)

²Beton mit einem erhöhten Schleifwiderstand (Expositionsclassen XM1-XM3) durch Hartstoffeinstreuungen.

ell nötige fernbediente ($\eta_{fern,Tech_i}$) oder semi-fernbediente Bearbeitung ($\eta_{semi-fern,Tech_i}$) berücksichtigt werden. Somit ergibt sich ein Gesamtabminderungsfaktor $\eta_{ges,tech_i}^{Rueck}$ von:

$$\eta_{ges,tech_i}^{Rueck} = \eta_{hart,Tech_i} * \eta_{abrasiv,Tech_i} * \eta_{sf,Tech_i} * \eta_{sk,Tech_i} * \eta_{fern,Tech_i} * \eta_{semi-fern,Tech_i} \quad (8.21)$$

Der Gesamtabminderungsfaktor aus Formel 8.21 bedeutet, dass die angegebene Rückbauleistung mit $\eta_{ges,tech_i}^{Rueck}$ multipliziert werden muss und somit um dieses Maß verringert ist.

Die Rückbaumasse für diesen Rückbauschritt ergibt sich aus der Betondeckung c und der Rückbaufäche:

$$V_{Oberflaeche}^{Rueck} = A_{Bt} * c \quad (8.22)$$

Die Gesamtzeit für diesen Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage ergibt sich somit für die Verfahren wie folgt:

$$T_{Oberflaeche}^{Rueck} = \frac{V_{Oberflaeche}^{Rueck}}{Q_{tech_i}^{Kl} * \eta_{ges,tech_i}^{Rueck} * \eta_{Beton,Tech_i}} \quad (8.23)$$

Zu dieser Zeit werden die Rüst- und Umsetzzeiten für diesen Bearbeitungsschritt hinzuaddiert. Die einzelnen Zeitwerte fließen in die Wertezeitenmatrix W_T^* in die Spalte für den Oberflächenabtrag .

8.4.4 Betonrückbau

Die Berechnung der Zeitdauern für den Betonrückbau gestaltet sich ähnlich der Aufgabe „Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage“. Die Ermittlung der durchschnittlichen Leistung eines Rückbauverfahrens bei Vorhandensein eines bestimmten Betons erfolgt wie bei Formel 8.20. Falls gefordert war, zunächst einen Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage durchzuführen, wird diese Betonmasse von der zu bearbeitenden Betonmasse subtrahiert.

Somit ergibt sich die rückzubauende Betonmasse wie folgt:

$$V_{Beton}^{Rueck} = V_{Beton,gesamt}^{Rueck} - V_{Oberflaeche}^{Rueck} \quad (8.24)$$

Wenn in der Bauwerksstruktur ein hoher Bewehrungsanteil vorhanden ist, muss die mittlere Leistung abgemindert werden; analog dazu muss bei einem geringen Bewehrungsanteil die Leistung erhöht werden. Die Definition, wann eine Betonstruktur einen niedrigen, mittleren oder hohen Bewehrungsanteil hat, wurde in der Tabelle 6.4 in Kapitel 6.3.2 dargestellt. Nach Eingabe des Bewehrungsanteils durch den Systemnutzer wird geprüft, wie hoch der Abminderungsfaktor η_{Bew} ist (vgl. Formel 8.25).

$$\eta_{Bew} = \begin{cases} \eta_{Bew}^{low} & \text{für } \eta_{Bew} \leq 30kg/m^3 \\ \eta_{Bew}^{middle} & \text{für } 30kg/m^3 < \eta_{Bew} \leq 60kg/m^3 \\ \eta_{Bew}^{high} & \text{für } \eta_{Bew} > 60kg/m^3 \end{cases} \quad (8.25)$$

Eine weitere Abminderung der Leistung ergibt sich durch Vorhandensein bestimmter Zusätze in der Bauwerksstruktur und/oder einer fernbedienten Bearbeitung (vgl. Formel 8.21).

Aufgrund der massiven Bauweise einiger Bauteile in kerntechnischen Anlagen stossen einige Verfahren an ihre Bearbeitungsgrenzen. Daher ist es sinnvoll, auch Rückbauverfahren zu betrachten, deren wirtschaftliche Bearbeitungstiefe zwar unter der geforderten Bearbeitungstiefe liegt, die Bearbeitungstiefe aber technisch noch durchaus erreichbar ist. Dafür wird eine Leistungsabminderung bei Überschreiten der wirtschaftlichen Bearbeitungstiefe aufgrund dicker Bauteile η_{DB} vorgenommen.

$$Q_{Tech_i} = Q_{Tech_i}^{Kl} * \eta_{Bew} * \eta_{ges, Tech_i}^{Rueck} * \eta_{DB} \quad (8.26)$$

Durch die unterschiedlichen Abminderungsfaktoren (vgl. Formel 8.26) kann sich die Rückbauzeit, welche sich aus Formel 8.27 ergibt, stark erhöhen.

$$T_{Beton}^{Bearb} = \frac{V_{Beton}^{Rueck}}{Q_{Tech_i}} \quad (8.27)$$

Zur Ermittlung der Gesamtzeit für diesen Vorgang wird Formel 8.27 um die Rüst- und Umsetzzeiten, die sich projektspezifisch ergeben, erweitert:

$$T_{Beton, ges}^{Rueck} = T_{Beton}^{Bearb} + T_{Beton}^{Umsetz} + T_{Beton}^{Ruest} \quad (8.28)$$

Um einen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Rückbauverfahren, welche unterschiedliche Bearbeitungsmechanismen - von schälen bis schneiden - besitzen, vornehmen zu können, wurde die Aufgabe „Herstellen von Betonkuben“ definiert" (vgl. Kapitel 8.4.8). In dieser Aufgabe werden alle Verfahren betrachtet, die eine schneidende Bearbeitungsweise besitzen, da bei diesen Verfahren die Leistungsdaten in m^2/h angegeben sind und damit ein anderer Rechengang für die Rückbautätigkeit zugrunde zu legen ist.

8.4.5 Herstellung von Aussparungen

Die Herstellung von Aussparungen ist eine Sonderaufgabe und gehört zum Betonrückbau. Die Berechnung erfolgt analog zum Betonrückbau. Wenn definiert wurde, eine Aussparung herzustellen, ist zu beachten, dass die Aufgabe Betonrückbau keine Berücksichtigung findet und die Zeiten- und Kostenberechnung für den Betonrückbau über die Aufgabe Herstellung von Aussparungen erfolgt.

8.4.6 Rückbau von Bewehrung

Wie in der Aufgabe Betonrückbau bereits erwähnt, erfolgt der Betonrückbau inklusive dem Rückbau von Bewehrung. Die auf dem Markt befindlichen Rückbauverfahren erlauben aber teilweise nur den Rückbau von Bewehrung bis zu einer bestimmten Stärke.

Aus diesem Grund muss zunächst überprüft werden, ob das betrachtete Verfahren, das den Beton rückbauen soll, auch die Bewehrung zurückbauen kann. Dies drückt sich dadurch aus, dass in der Matrix A^* beide Aufgaben mit der Ziffer „1“ bewertet sind.

Damit sind beide Aufgaben durch den Bearbeitungsschritt Betonrückbau erfüllt.

Falls das betrachtete Verfahren den vorhandenen Bewehrungsstahl nicht rückbauen kann, muss der Stahl mit einem weiteren Verfahren getrennt werden, was zum einen einen zusätzlichen Zeitaufwand bedarf und zum anderen zusätzliche Kosten verursacht.

Zur Berechnung der Zeit für die Trennung von Bewehrungsstahl wird zunächst ermittelt, wie viele Trennvorgänge für den Bewehrungsrückbau erforderlich sind. Ähnlich der Formeln 7.3 und 7.4 aus Kapitel 7.1.4 wird hierzu die erforderliche Trennzahl je vertikal und je horizontal verlegter Bewehrung ermittelt.

$$n_{V,trenn}^{Bew} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{H_{Bt}}{L_{trenn,max}} + 1 \right\rfloor & \text{für } \frac{H_{Bt}}{L_{trenn,max}} \in \mathbb{N} \\ \left\lfloor \frac{H_{Bt}}{L_{trenn,max}} + 2 \right\rfloor & \text{für } \frac{H_{Bt}}{L_{trenn,max}} \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (8.29)$$

$$n_{H,trenn}^{Bew} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{B_{Bt}}{L_{trenn,max}} + 1 \right\rfloor & \text{für } \frac{B_{Bt}}{L_{trenn,max}} \in \mathbb{N} \\ \left\lfloor \frac{B_{Bt}}{L_{trenn,max}} + 2 \right\rfloor & \text{für } \frac{B_{Bt}}{L_{trenn,max}} \in \mathbb{R} \end{cases} \quad (8.30)$$

Im Anschluss daran erfolgt die lagenweise Bestimmung der Anzahl der Bewehrungsstäbe im rückzubauenden Bauteil mit Hilfe des Stababstandes in vertikaler a_{ver} und in horizontaler Richtung a_{hor} . Die Trenndauer ergibt sich aus der Anzahl an Trennvorgängen, der Anzahl an Bewehrungslagen im Baukörper $n_{V,Lagen}^{Bew}$ und $n_{H,Lagen}^{Bew}$, dem Stababstand a und der spezifischen Trennzeit (vgl. Formel 8.31).

$$T_{Trenn}^{Bew} = n_{V,Lagen}^{Bew} * n_{V,trenn}^{Bew} * \left| \frac{B_{Bt}}{a_{ver}} \right| * \vec{t}_{Bew,Tech_i,Typ_i} * \vec{v}_{d_i} + n_{H,Lagen}^{Bew} * n_{H,trenn}^{Bew} * \left| \frac{H_{Bt}}{a_{hor}} \right| * \vec{t}_{Bew,Tech_i,Typ_i} * \vec{v}_{d_j} \quad (8.31)$$

Der Vektor $\vec{t}_{Bew,Tech_i,Typ_i}$ beinhaltet die spezifische Trenndauern von Bewehrungsstahl des Verfahrens i . Die Einheitsvektoren \vec{v}_{d_i} , \vec{v}_{d_j} erhalten die Ziffer „1“ bei der vorhandenen Bewehrungsstärke. Die Gesamtdauer für das Trennen von Bewehrung ergibt sich aus den Geräterüstzeiten, den Umsetzzeiten und der Trenndauer des Gerätes.

$$T_{Trenn,Ges}^{Bew} = T_{Trenn}^{Bew} + T_{Ruest}^{Bew} + T_{Umsetz}^{Bew} \quad (8.32)$$

8.4.7 Vor Ort Trennung von aktiviertem und nicht aktiviertem Beton

Die Vor Ort Trennung von aktiviertem und nicht aktiviertem Beton ist, wie die Herstellung von Aussparungen, eine Sonderaufgabe und gehört zum Betonrückbau (vgl. Kapitel 8.4.4). Die Berechnung erfolgt analog zum Betonrückbau. Wenn der aktivierte vom nicht aktivierten Beton getrennt werden soll, sind bei der Massenberechnung zunächst die Massen des aktivierten Anteils des Betons zu berücksichtigen. Diese Massen wurden in der Anforderungskomponente angegeben. Ebenfalls in der Anforderungskomponente wurde definiert, ob nur der aktivierte Anteil des Betons zurückgebaut wird und der Restbeton in Einbaulage verbleibt. In diesem Fall endet hier die Berech-

nung. Falls der nicht aktive Beton auch zurückgebaut wird, erfolgt eine Berechnung der Zeiten und Kosten für diesen Teil des Betons analog zum aktivierten Teil. Allerdings wird hierbei nochmals geprüft, ob für diesen nicht aktivierten Teil höhere Rückbauleistungen aufgrund einer manuellen oder semi-fernbedienten Arbeitsweise möglich sind. Des weiteren erfolgt eine Unterscheidung der Rückbauvolumina in aktivierte und nicht aktivierte Teile, da sich die Entsorgungskosten erheblich voneinander unterscheiden. Des weiteren unterscheiden sich die Rückbauvolumina je nach eingesetztem Werkzeug erheblich. Sie ergeben sich aus der Multiplikation des Festbetonvolumens mit dem spezifischen Auflockerungsfaktor des eingesetzten Werkzeuges.

8.4.8 Herstellen von Betonkuben

Wie bereits in Kapitel 8.4.7 angesprochen, unterscheiden sich Rückbauvolumina je nach Wahl des Rückbauverfahrens stark. Bei den Säge- und Bohrverfahren sind die Rückbauvolumina und damit auch die Entsorgungskosten geringer als bei den schälenden Verfahren wie z.B. dem Betonfräsen.

Das Herstellen von Betonkuben gehört ebenfalls zum Betonrückbau. Allerdings unterscheidet sich die Berechnung dadurch, dass es sich bei Verfahren, die Betonkuben herstellen können, um Sägeverfahren handelt, deren Rückbauleistungsdaten in m^2/h angegeben sind. Somit wird ein Vergleich unterschiedlicher Verfahren erschwert, da sich die Bearbeitungsprinzipien stark unterscheiden.

Im Anforderungskatalog wurde die Höhe (H_{Bt}), Breite (B_{Bt}) und Dicke (D_{Bt}) des Bauteils angegeben. Der Nutzer gibt im weiteren Verlauf an, welche maximalen Abmessungen die Bauteilsegmente für den Abtransport bzw. die unterschiedlichen Transportbehälter ($L_{BS,max}$, $B_{BS,max}$, $D_{BS,max}$) besitzen dürfen. Die maximale Höhe und maximale Breite der Bauteilsegmente dienen dann der Berechnung des Schnittmusters für das Bauteil.

Die Ermittlung des Schnittmusters erfolgt analog zur Schnittmusterbestimmung aus Kapitel 8.4.1. Die Formelbezeichnungen werden dabei geändert, so dass aus der maximalen Plattenlänge $l_{Pl,max}$ die maximale Länge des Bauteilsegmentes $L_{BS,max}$ wird, aus der maximalen Plattenbreite $b_{Pl,max}$ wird die maximale Breite des Segmentes $B_{BS,max}$, aus den tatsächlichen Plattenabmessungen in horizontaler $l_{Pl,hor}$ und $b_{Pl,hor}$ bzw. vertikaler Richtung $l_{Pl,ver}$ und $b_{Pl,ver}$ werden die Segmentabmessungen $l_{seg,hor}$, $b_{seg,hor}$, $l_{seg,ver}$ und $b_{seg,ver}$, aus den Plattenbreiten $b_{1,Pl,hor}$ und $b_{1,Pl,ver}$ der gemischten Anordnungen werden die Segmentbreiten $b_{1,seg,hor}$ und $b_{1,seg,ver}$ der gemischten Anordnungen. Somit errechnet sich die Segmentanzahl n_{seg} analog zur Plattenanzahl aus Kapitel 8.4.1. Die Indizes Pl aus den Formeln 8.3 bis 8.5, 8.7 und 8.8 werden zu seg geändert.

Die Segmentanzahl bestimmt sich dann zu:

$$n_{seg} = \min \{ n_{seg}^{hor}, n_{seg}^{ver}, n_{seg}^{gh}, n_{seg}^{gv} \} \quad (8.33)$$

Für die Bestimmung der Anzahl der Ausschleusvorgänge des Materials wird die Segmentanzahl herangezogen.

Zur Ermittlung der Schnittfläche wird die Schnittlänge benötigt, welche sich durch die Wahl des Schnittmusters ergibt. Hierbei werden die Formeln 8.10 bis 8.13 aus Kapitel 8.4.1 verwendet, wobei die Indizes wiederum von Pl auf seg geändert werden.

Die Schnittlänge wird dann als $L_{sch,seg}$ definiert. Zur Ermittlung der Schnittfläche wird diese Schnittlänge mit der Bauteildicke multipliziert (vgl. Formel 8.34).

$$A_{sch} = L_{sch,seg} * D_{Bt} \quad (8.34)$$

Die Multiplikation der Schnittfläche A_{sch} mit den Schnittleistungen des Verfahrens ergibt die Schnittzeit T_{sch} . Zu dieser Schnittzeit werden die einzelnen Rüstzeiten der Schnitte hinzuaddiert. Dabei ergibt sich die Anzahl der Schnitte aus dem gewählten Schnittmuster. Diese sind:

- Bei der „horizontalen“ Anordnung:

$$n_{sch}^{hor} = n_{seg,hor}^{hor} + n_{seg,ver}^{hor} + 2 \quad (8.35)$$

- Bei der „vertikalen“ Anordnung:

$$n_{sch}^{ver} = n_{seg,ver}^{ver} + n_{seg,hor}^{ver} + 2 \quad (8.36)$$

- Bei der „gemischten horizontalen“ Anordnung:

$$n_{sch}^{gh} = n_{seg,hor}^{hor} + n_{seg,ver}^{hor} + \left\lfloor \frac{H_{Bt}}{l_{seg,max}} \right\rfloor + 1 \quad (8.37)$$

- Bei der „gemischten vertikalen“ Anordnung:

$$n_{sch}^{gv} = n_{seg,ver}^{ver} + n_{seg,hor}^{ver} + \left\lfloor \frac{B_{Bt}}{l_{seg,max}} \right\rfloor + 1 \quad (8.38)$$

Somit ergibt sich die Gesamtzeit für die Herstellung von Betonkuben aus den Rüst-, Umsetz und Schnittzeiten der einzelnen Verfahren abzüglich der einzelnen Abminderungsfaktoren aus Kapitel 8.4.4:

$$T_{Beton}^{Kuben} = n_{sch} * T_{Umsetz,Tech_i} + T_{Ruest,Tech_i} + \frac{A_{sch}}{Q_{Tech_i}^{Kl} * \eta_{Bew} * \eta_{ges,Tech_i}^{Rueck}} \quad (8.39)$$

Da viele Verfahren, die Betonkuben herstellen können, Startlöcher für eine effiziente Bearbeitung benötigen, kommen zu diesen Zeiten noch die Zeiten zur Erstellung dieser Startlöcher hinzu. Die Bearbeitungsaufgabe „Erzeugung von Startlöchern“ in Kapitel 8.4.14 wird also nicht anwenderseitig gefordert, sondern verfahrensseitig.

8.4.9 Rückbau von Ankerplatten, Schienen und Träger

Diese Aufgabe wurde definiert, um Zusatzzeiten für den Vorabausbau von Ankerplatten, Einbauteilen, Schienen und Trägern zu ermitteln bzw. um festzustellen, mit welchen Verfahren diese Aufgabe bewältigt werden kann.

Stahldurchführungen und Ankerplatten

Unter Stahldurchführungen werden - wie bereits in Kapitel 6.3.3 erläutert - Rohre, Kabeldurchführungen und Stahlkästen verstanden, die das Bauwerk durchdringen. Zum Vorabausbau von Stahldurchführungen muss also auch das Bauteil in seiner vollständigen Dicke durchtrennt werden. Hierbei kommen Säge- und Bohrverfahren zum Einsatz, die die Stahldurchführungen aussägen oder ausbohren.

Um die Zeit für diesen Vorgang zu ermitteln, werden die Durchmesser d bzw. die Abmessungen b, h der Stahldurchführungen nach Angaben des Systemnutzers verwendet. Die Rückbaufläche ergibt sich aus dem Durchmesser bzw. den Abmessungen multipliziert mit der Bauteildicke D_{Bt} . Die Rückbauleistungen der einzelnen Verfahren werden durch die Rückbaufläche dividiert.

$$T_{Rohr, Tech_i}^{Rueck} = \left(\sum_{j=1}^n n_j * \left(\frac{Q_{Tech_i}}{d_j * D_{Bt}} + T_{Tech_i}^{Umsetz} \right) \right) + T_{Tech_i}^{Ruest} \text{ für Rohre / Kabeldurchführungen} \quad (8.40)$$

$$T_{Kasten, Tech_i}^{Rueck} = \left(\sum_{j=1}^n n_j * \left(\frac{Q_{Tech_i}}{(2 * b_j + 2 * h_j) * D_{Bt}} + T_{Tech_i}^{Umsetz} \right) \right) + T_{Tech_i}^{Ruest} \text{ für Stahlkästen} \quad (8.41)$$

In den Formeln 8.40 und 8.41 bedeutet n_j die Anzahl der Rohre bzw. Kästen mit den gleichen Abmessungen, Q_{Tech_i} die - für den vorhandenen Beton - spezifische Rückbauleistung, $T_{Tech_i}^{Umsetz}$ die Umsetzzeit für das betrachtete Verfahren und $T_{Tech_i}^{Ruest}$ die Rüstzeit des betrachteten Verfahrens.

Ankerplatten sind durch Kopfbolzen fest mit dem Bauwerk verbunden. Falls die Ankerplatten vorab ausgebaut werden sollen, sind diese von den Bolzen zu trennen. Die unterschiedlichen Dimensionen der Ankerplatten bedingen auch eine unterschiedliche Anzahl an Ankerbolzen, so dass eine Rückbauberechnung, die Bezug auf die Ankerplattenfläche nimmt, sinnvoll ist.

$$T_{A-Platte}^{Rueck} = t_{A-Platte, Tech_i}^{Trenn, d_i} * A_{A-Platte} + n_{A-Platte} * T_{Tech_i}^{Umsetz} + T_{Tech_i}^{Ruest} \quad (8.42)$$

In der Formel 8.42 bedeutet $t_{A-Platte, Tech_i}^{Trenn, d_i}$ die spezifische Trennzeit für eine Ankerplatte mit der Dicke d_i mit einem Quadratmeter Fläche. Diese Trennzeit wird mit der Fläche der Ankerplatte $A_{A-Platte}$ multipliziert. Im Anschluss werden die Umsetzzeiten $T_{Tech_i}^{Umsetz}$ des Verfahrens und deren Rüstzeit $T_{Tech_i}^{Ruest}$ hinzuaddiert.

Stahlträger, Schienen und sonstige Einbauteile

Ähnlich dem Bewehrungsrückbau muss zunächst ermittelt werden, wie oft Stahlträger und Schienen geschnitten werden müssen. Im Anforderungskatalog (Kapitel 6.3.3) wurde vom Systemnutzer Art, Länge, Position etc. der Stahlträger und Schienen angegeben. Die Gesamtlänge der jeweiligen Art wird durch die maximal zulässige Länge

dividiert. Die Formeln zur Berechnung der Maximallänge und der Anzahl der Schnitte wurden in Kapitel 8.4.6 erläutert.

Die Überprüfung, ob ein Verfahren für diesen Rückbauschritt eingesetzt werden kann, erfolgte bereits in Kapitel 8.2, indem geprüft wurde, ob das einzusetzende Verfahren die stärkste vorhandene Materialstärke trennen kann.

Die benötigte Bearbeitungszeit für einen Träger / eine Schiene ergibt sich aus der angegebenen Trennzeit $t_{SchTr,Tech_i}^{Trenn}$ des Verfahrens in cm/min in Abhängigkeit der maximalen Materialstärke des Trägers / der Schiene multipliziert mit der Gesamtschnittlänge pro Trennvorgang, welche sich aus den Querschnittsabmessungen des Trägers / der Schiene ergibt, der Anzahl der Schnitte (vgl. Formeln 7.3 und 7.4), der Rüstzeit ($t_{SchTr,Tech_i}^{Ruest}$) und den Umsetzzeiten ($t_{SchTr,Tech_i}^{Umsetz}$) (z.B. ergibt sich bei I-Trägern die Schnittlänge aus der Addition der Steglänge mit der doppelten Flanschlänge. Dazu muss ggf. das Schneidverfahren zwei Mal umgesetzt werden).

$$T_{SchTr,Tech_i}^{Rueck} = n_{trenn,SchTr} * (t_{SchTr,Tech_i}^{Trenn} * l_{SchTr} + t_{SchTr,Tech_i}^{Umsetz}) + t_{SchTr,Tech_i}^{Ruest} \quad (8.43)$$

Die Gesamtausbauzeit für alle Träger bzw. Schienen ergibt sich aus der Summe der Einzelausbauzeiten ($T_{SchTr,Tech_i}^{Rueck}$).

8.4.10 Bündige Trennung eines Bauteils zu bestehenden Gebäudeteilen

Die bündige Trennung eines Bauteils zu bestehenden Gebäudeteilen ist eine Sonderaufgabe und gehört zum Betonrückbau. Da nicht alle Verfahren eine bündige Trennung gewährleisten können, ist es erforderlich, diesen Bearbeitungspunkt mit aufzunehmen. Wenn definiert wurde, das rückzubauende Bauteil bündig zum Bestand zu trennen, muss beachtet werden, dass bei Verfahren, die sowohl Beton rückbauen können als auch eine bündige Trennung herstellen können, keine weitere Zeiten- und Kostenberechnung für diesen Bearbeitungsschritt erforderlich ist.

Falls die oben genannte Bedingung nicht erfüllt werden kann, werden Verfahren eingesetzt, die eine bündige Trennung durch zusätzliche Schnitte ermöglichen.

Dabei wird der Nutzer in der Anforderungskomponente befragt, zu welchen Gebäudeteilen eine bündige Trennung erfolgen soll. Dann wird die Länge des erforderlichen Schnittes ermittelt (Formel 8.44). Hierbei steht der Vektor \vec{a} für die Bauteilabmessungen Breite und Höhe, welche jeweils zwei Mal aufgeführt sind. Vektor \vec{v} beinhaltet die Angabe des Systemnutzers, an welchen Seiten eine bündige Bauteiltrennung erforderlich ist.

$$L_{Schnitt,Tech_i}^{Buetr} = \vec{a} * \vec{v}^T \quad (8.44)$$

Mit der Schnittlänge lässt sich mit Hilfe der Bauteildicke die Schnittfläche berechnen. Durch die Angabe der Anzahl der bündig zu trennenden Kanten $n_{Schnitte}^{Buetr}$ sind die Zeiten für die Umsetzvorgänge ($T_{Tech_i}^{Umsetz}$) des betrachteten Verfahrens ebenfalls bekannt. Hinzu kommen noch die Rüstzeiten ($T_{Tech_i}^{Ruest}$), so dass mit Formel 8.45 die Gesamtzeit für diese Aufgabe berechnet werden kann.

$$T_{Tech_i}^{Buetr} = \frac{L_{Schnitt,Tech_i}^{Buetr} * D_{Bt}}{Q_{Tech_i}^{Kl} * \eta_{Bew} * \eta_{ges,Tech_i}^{Rueck} * \eta_{Beton,Tech_i}} + (n_{Schnitte}^{Buetr} - 1) * T_{Tech_i}^{Umsetz} + T_{Tech_i}^{Ruest} \quad (8.45)$$

Da es sich um Schnitte in Beton handelt, sind die Abminderungsfaktoren aus Kapitel 8.4.3 für den Betonrückbau ebenfalls zu berücksichtigen.

8.4.11 Erzeugung von glatten Schnittkanten

Die Erzeugung von glatten Schnittkanten ist eine Sonderaufgabe und gehört zum Betonrückbau. Wenn gefordert wurde, glatte Schnittkanten herzustellen, muss beachtet werden, dass Verfahren, die Betonkuben herstellen können, automatisch glatte Schnittkanten erzeugen und somit keine weitere Zeiten- und Kostenberechnungen für diesen Bearbeitungsschritt erforderlich ist.

Die Berechnung für die Erzeugung von glatten Schnittkanten erfolgt ähnlich der Berechnung der Herstellung der bündigen Trennung eines Bauteils zu einer bestehenden Wand. Die einzigen Unterschiede hierbei sind, dass der komplette Bauteilumfang glatte Schnittkanten besitzen soll und dass die Wahlfreiheit besteht, wie tief diese glatten Schnittkanten ausgeführt werden sollen.

Damit wird Formel 8.44 geändert, so dass sich eine Schnittfläche ergibt:

$$A_{Tech_i}^{glSchnk} = 2 * (H_{Bt} + B_{Bt}) * d_{glSchnk} \quad (8.46)$$

Die Umsetzungvorgänge für die Erzeugung von glatten Schnittkanten sind ebenfalls bekannt, so dass Formel 8.45 geändert werden kann zu:

$$T_{Tech_i}^{glSchnk} = \frac{A_{Tech_i}^{glSchnk}}{Q_{Tech_i}^{Kl} * \eta_{Bew} * \eta_{ges,Tech_i}^{Rueck} * \eta_{Beton,Tech_i}} + 3 * T_{Tech_i}^{Umsetz} + T_{Tech_i}^{Ruest} \quad (8.47)$$

8.4.12 Asbestausbau

Beim Bau von kerntechnischen Anlagen wurde in der Vergangenheit Asbest zur brand- schutztechnischen Abdichtung von Rohr- oder Kabeldurchführungen oder Fugen verwendet. Wenn Asbest in der Bauwerksstruktur vorhanden ist, wird dieser in der Regel vorab ausgebaut.

Die Berechnung von Zeit und Kosten für den Asbestausbau von Rohr- und Kabel- durchführungen erfolgt analog der Berechnung „Vorabausbau von Stahldurchführungen“ aus Kapitel 8.4.9.

Die Ausbauzeit für Fugen wird wie folgt ermittelt: zunächst wird vom Systemnutzer angegeben, wie viele Fugen sich im Bauteil befinden und welche Länge die einzelnen Fugen besitzen. Mit dieser Gesamtfugenlänge L_{Fug} wird die Gesamtausbauzeit berechnet. Hierzu wurde in der Wissenskomponente die Ausbauzeit pro Meter Fuge $Q_{Tech_i}^{AsbestFug}$ eingetragen. Formel 8.48 verdeutlicht den Gang der Berechnung:

$$T_{Tech_i}^{AsbestFug} = Q_{Tech_i}^{AsbestFug} * L_{Fug} + (n_{Fug} - 1) * T_{Tech_i}^{Umsetz} + T_{Tech_i}^{Ruest} \quad (8.48)$$

Zur Berechnung der Gesamtzeit für diesen Vorgang werden noch die Umsetzzeiten $T_{Tech_i}^{Umsetz}$ des Verfahrens sowie deren Rüstzeiten $T_{Tech_i}^{Ruest}$ berücksichtigt.

8.4.13 Überschnitte

Wie bereits in den Kapiteln 6.4.8 und 7.1.1 erläutert, verursachen einige Verfahren bei der Bearbeitung Überschnitte. Zur Elimination dieser Überschnitte müssen weitere Verfahren verwendet werden, wenn nach Maßgabe der Systemnutzer keine Überschnitte im Bauwerk erzeugt werden dürfen.

Die Aufgabe Elimination von Überschnitten wird also nur erzeugt, wenn beim Betonrückbau bzw. bei der Herstellung von Betonkuben Verfahren eingesetzt werden, die Überschnitte erzeugen, die laut Systemnutzer aber unzulässig sind.

Für diese Elimination eignen sich Bohr- und Sägeverfahren, die an den definierten Rändern des rückzubauenden Bauteils eine Bohrreihe bilden bzw. einen Schlitz sägen, so dass die geforderten Bauteilabmessungen erreicht werden und rückgebaut werden können. Die Länge dieser Bohrlochreihe bzw. dieses Schlitzes entspricht dabei der zu bearbeitenden Dicke d_{Bt} des Bauteils und muss für jeden Schnitt, der vom überschnitterzeugenden Verfahren hergestellt wird, zweifach ausgeführt werden. Somit ergibt sich die Anzahl der zu erzeugenden Bohrlöcher:

$$n_{Tech_i}^{Ueberschn} = 2 * n_{sch} * \left| \frac{d_{Bt}}{d_i} \right| \quad (8.49)$$

Dabei entspricht n_{sch} der Anzahl der Schnitte des überschnitterzeugenden Verfahrens aus den Formeln 8.35 bis 8.38.

Bei Verfahren, bei denen eine Wahlfreiheit bzgl. des Bohrlochdurchmessers besteht (wie z.B. beim Kernbohren), wird vom System automatisch ein Durchmesser d_i ausgewählt, welcher der Hälfte bis einem Viertel der zu bearbeitenden Bauteildicke entspricht.

Die erforderliche Gesamtzeit für diese zusätzliche Maßnahme ergibt sich aus der Anzahl der zu erzeugenden Bohrlöcher ($n_{Tech_i}^{Ueberschn}$), der Bohrleistung der betrachteten Verfahren ($Q_{d_i, Tech_i}^{Ueberschn}$) sowie der Umsetz- ($T_{Tech_i}^{Umsetz}$) und der Rüstzeit ($T_{Tech_i}^{Ruest}$) des eingesetzten Verfahrens (Formel 8.50).

$$T_{Tech_i}^{Ueberschn} = n_{Tech_i}^{Ueberschn} * \frac{d_{Bt}}{Q_{d_i, Tech_i}^{Ueberschn}} + (n_{Tech_i}^{Ueberschn} - 1) * T_{Tech_i}^{Umsetz} + T_{Tech_i}^{Ruest} \quad (8.50)$$

Bei Sägeverfahren, die einen Schnitt herstellen, erfolgt die Berechnung nicht über die Anzahl der herzustellenden Bohrlöcher, sondern über die zu erzeugende Schnittfläche, die sich vereinfacht angenommen aus der Hälfte des Quadrates der zu bearbeitenden Bauteildicke ergibt. Die Berechnung der Umsetz- und Rüstzeiten erfolgt analog der Formel 8.50.

$$T_{Tech_j}^{Ueberschn} = \frac{d_{Bt}^2/2}{Q_{Tech_i}^{Ueberschn}} + (2 * n_{sch} - 1) * T_{Tech_i}^{Umsetz} + T_{Tech_i}^{Ruest} \quad (8.51)$$

Da sich bei der Elimination von Überschnitten eine Vielzahl unterschiedlicher Mög-

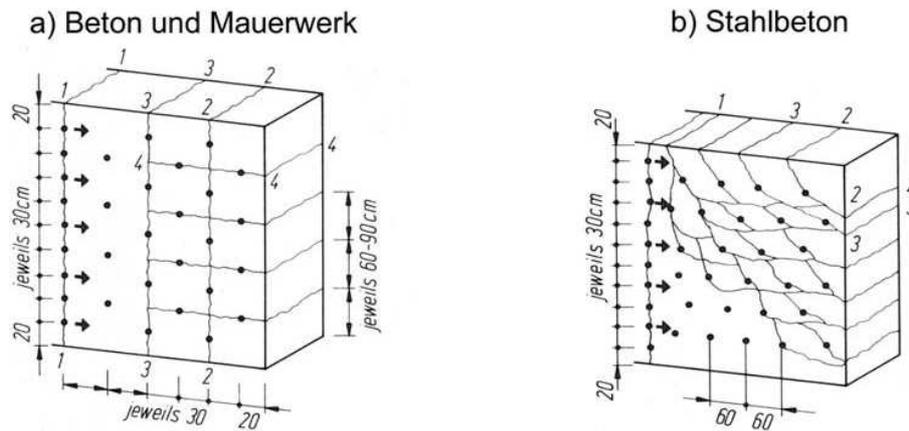


Abbildung 8.6: Bohrlochraster am Beispiel von hydraulischen Spaltgeräten (Lindner, 1982)

lichkeiten hinsichtlich der Verfahrensauswahl und der Wahl des Durchmessers ergeben, wird vom System - je nach Maßgabe der Systemnutzer hinsichtlich Zeit oder Kosten - eine Vorabauswahl eines Verfahrens, das für diesen Zweck am Geeignetsten ist, getroffen.

8.4.14 Erzeugung von Startlöchern

Einige Verfahren - wie z.B. Seilsägen, Tauchsägen, Sprengen mit Quellmitteln, etc. - benötigen für eine effiziente Arbeitsweise Startlöcher, die von anderen Verfahren ausgeführt werden müssen. Dabei ist es verfahrensabhängig, wie diese Startlöcher auszuführen sind. Prinzipiell wird unterschieden, ob die Startlöcher flächendeckend (vgl. Abbildung 8.6, die beispielhaft Bohrlochraster für hydraulische Spaltgeräte zeigt) in bestimmten Abständen in das rückzubauende Bauteil eingebracht werden müssen oder ob nur vereinzelt, d.h. an den Bauteilrändern Startlöcher benötigt werden (vgl. auch Tabelle 8.2).

Diese Bohrlochanforderungen werden verfahrensseitig in der Wissenskomponente eingetragen. In der Entscheidungskomponente erfolgt dann eine Berechnung bzgl. des Zeitbedarfs und der Kosten für diese Aufgabe. Des weiteren wird in der Entscheidungskomponente die kosten- bzw. zeitgünstigste Lösung hinsichtlich eines Verfahrens getroffen.

Für diejenigen Verfahren, die ein bestimmtes Bohrlochraster benötigen, wird zunächst die Gesamtanzahl der Startlöcher ermittelt.

$$n_{Tech_i}^{StartLoeFl} = \frac{A_{Bt}}{n_{Bl_i}} \quad (8.52)$$

Dabei bedeutet n_{Bl_i} die Anzahl an Bohrlocher pro Quadratmeter Rückbaufläche, die ein Verfahren bei einem bestimmten Bewehrungsanteil benötigt, A_{Bt} ist die zurückzubauende Fläche des Bauteils.

Anschließend wird, in Anlehnung an Formel 8.50, die Gesamtzeitdauer $T_{Tech_i}^{StartLoeFl}$ für diesen Bearbeitungsschritt ermittelt.

Erfordernis von Startlöchern	von vereinzelt	Erfordernis von flächendeckenden Startlöchern
Hochstromverfahren		Expansivmittel
Seilsägen (nass + trocken)		Hydraulisches Spalten
Zirkelsägen		
Sprengen Explosiv		
Tauchkreissägen		
Tauchseilsägen (nass+trocken)		

Tabelle 8.2: Unterteilung der Verfahren, die ein flächiges Bohrlochrastrer bzw. vereinzelte Startlöcher benötigen

$$T_{Tech_i}^{StartLoeFl} = n_{Tech_i}^{StartLoeFl} * \frac{l_{Bohrloch}}{Q_{d_i, Tech_i}^{StartLoeFl}} + (n_{Tech_i}^{StartLoeFl} - 1) * T_{Tech_i}^{Umsetz} + T_{Tech_i}^{Ruest} \quad (8.53)$$

Die Gesamtzeitdauer ergibt sich demnach aus der Bohrlochanzahl $n_{Tech_i}^{StartLoeFl}$ multipliziert mit dem Quotienten aus der Bohrlochlänge $l_{Bohrloch}$ und der Bearbeitungsleistung $Q_{d_i, Tech_i}^{StartLoeFl}$ des betrachteten Verfahrens für einen bestimmten Durchmesser d_i in m/min . Hinzuaddiert werden die Umsetzzeiten und die Rüstzeit des Verfahrens.

Für Verfahren, die an den Bauteilrändern für die Erstellung von Schnitten Startlöcher benötigen, muss zunächst überprüft werden, ob die Abmessungen des Bauteils größer oder kleiner sind als der maximale Bohrlochabstand a_{Typi} , der für eine effektive Bearbeitung erforderlich ist.

Die Anzahl der Borlöcher ergibt sich für das Tauchsägen mit der Kreissäge aus der gesamten Schnittlänge $L_{sch, seg}$ dividiert durch den Bohrlochabstand (a_{Typi}). Für alle anderen Verfahren wird die Anzahl der Bohrlöcher wie folgt ermittelt: die Bauteilbreite (B_{Bt}) wird durch den maximalen Bohrlochabstand dividiert. Das Ergebnis wird mit der Schnittanzahl in vertikaler Richtung ($n_{seg, ver} + 1$) multipliziert. Anschließend wird die Bauteilhöhe (H_{Bt}) durch den maximalen Bohrlochabstand dividiert. Dieses Ergebnis wird mit der Schnittanzahl in horizontaler Richtung ($n_{seg, hor} + 1$) multipliziert. Da die Eckbohrungen doppelt genutzt werden können, werden 4 Bohrungen abgezogen. Bei den Quotienten B_{Bt}/a_{Typi} und H_{Bt}/a_{Typi} der Formel 8.54 wurde angenommen, dass diese reelle Zahlen sind. Falls diese Quotienten natürliche Zahlen sind, sind die sich anschließenden Konstanten 1.

$$n_{Tech_i}^{StartLoeEi} = \begin{cases} \frac{L_{sch, seg}}{a_{Typi}} & \text{für Tauchsägen mit Kreissäge} \\ \left(\left\lfloor \frac{B_{Bt}}{a_{Typi}} \right\rfloor + 2 \right) * (n_{seg, ver} + 1) + \left(\left\lfloor \frac{H_{Bt}}{a_{Typi}} \right\rfloor + 2 \right) * (n_{seg, hor} + 1) - 4 & \text{sonst} \end{cases} \quad (8.54)$$

Die Ermittlung der Gesamtzeit für diesen Vorgang erfolgt analog Formel 8.53, wobei als Anzahl der Bohrungen naturgemäß das Ergebnis der Formel 8.54 heranzuziehen ist.

8.4.15 Rückbauvolumina und Ausschleusvorgänge

Mit der Angabe des gesamten Rückbauvolumens bzw. der Anzahl an Betonkuben und der vom Systemnutzer angegebenen Entsorgungsbehältnisse $V_{Behaelter}$ lässt sich das Betonrückbauvolumen $V_{Tech_i}^{Rueck}$ und die dazu korrespondierende Anzahl der Ausschleusvorgänge bestimmen (vgl. Formel 8.55).

$$V_{Tech_i}^{Rueck} = V_{Beton}^{Rueck} * \alpha_{Tech_i} \quad (8.55)$$

Dazu wird das Rückbauvolumen des Festbetons V_{Beton}^{Rueck} mit dem spezifischen Auflockerungsfaktor α_{Tech_i} des jeweiligen Verfahrens multipliziert.

Bei den Sägeverfahren entsteht außer den Betonkuben Bohrklein. Die Menge dieses Bohrkleins lässt sich aus der Fugenbreite $d_{Fuge,Tech_i}$ des Verfahrens multipliziert mit der gesamten Schnittfläche A_{sch} und dem Auflockerungsfaktor $\alpha_{Fuge,Tech_i}$ bestimmen.

$$V_{Tech_i}^{Bohrklein} = A_{sch} * d_{Fuge,Tech_i} * \alpha_{Fuge,Tech_i} \quad (8.56)$$

Die Anzahl der Transportbehältnisse $n_{Tech_i}^{Behaelter}$ ergibt sich aus der Division des Rückbauvolumens $V_{Tech_i}^{Rueck}$ zzgl. des Volumens des eventuell entstandenen Bohrkleins $V_{Tech_i}^{Bohrklein}$ mit dem Volumen der Transportbehältnisse ($V_{Behaelter}$). Transportbehältnisse sind entweder Fässer (z.B. für kleinstückiges Abbruchmaterial) oder Container (für z.B. Betonkuben).

$$n_{Tech_i}^{Behaelter} = \frac{V_{Tech_i}^{Rueck} + V_{Tech_i}^{Bohrklein}}{V_{Behaelter}} + \frac{n_{seg}}{n_{Behaelter/seg}} \quad (8.57)$$

Die Ausschleusvorgänge ergeben sich dann aus der Gesamtanzahl der Transportbehältnisse dividiert durch die Transportbehältnisse pro Ausschleusvorgang.

$$n_{Tech_i}^{Ausschleus} = \frac{n_{Tech_i}^{Behaelter}}{n_{Behaelter/Ausschleus}} \quad (8.58)$$

Die gesamte Ausschleuszeit wird durch die Multiplikation der Ausschleusvorgänge $n_{Tech_i}^{Ausschleus}$ mit der Zeit pro Ausschleusvorgang bestimmt. Die Entsorgungskosten richten sich nach der Behälteranzahl, der Behältergröße und dem Aktivitätsgrad³ - von gering bis hochradioaktiv - des Materials. Des weiteren muss unterschieden werden, ob das Material zunächst vor Ort in einem Zwischenlager verbleibt, ins Endlager transportiert wird oder einer Dekontamination zugeführt wird, um somit die Endlagermasse zu verringern. Die Kostenbestandteile für den Transport ins Zwischen- oder Endlager sind nicht Gegenstand der Betrachtung.

Durch die unterschiedlichen Rückbauvolumina, je nach eingesetztem Verfahren, ergeben sich bei einigen Verfahren Kostenvorteile bzw. Kostennachteile, die Berücksichtigung finden müssen. Hierbei werden vom Systemnutzer die Kosten pro verwendetem Behälter, differenziert nach Füllmaterial - von gering bis hochradioaktiv -, angegeben.

³Hierbei ist die beim radioaktiven Zerfall entstehende Wärme von Bedeutung. Die für die Endlagerung bereitgestellten Abfälle werden aus diesem Grund in wärmeerzeugende Abfälle und solche mit vernachlässigbarer Wärmeerzeugung eingeteilt. (Arbeitskreis-Abfallmanagement, 2004)

$$\vec{k}_{Behaelter,Tech_i}^{Ausschleus} = \vec{v}_{Behaelter,Tech_i}^T * \begin{pmatrix} K_{LW,V_1}^{Behaelter} & K_{MW,V_1}^{Behaelter} & K_{HW,V_1}^{Behaelter} \\ K_{LW,V_2}^{Behaelter} & K_{MW,V_2}^{Behaelter} & K_{HW,V_2}^{Behaelter} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{LW,V_i}^{Behaelter} & K_{MW,V_i}^{Behaelter} & K_{HW,V_i}^{Behaelter} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{LW,V_n}^{Behaelter} & K_{MW,V_n}^{Behaelter} & K_{HW,V_n}^{Behaelter} \end{pmatrix} \quad (8.59)$$

Die erste Spalte der Matrix in Formel 8.59 beschreibt die unterschiedlichen Entsorgungskosten für schwach radioaktives Material, die zweite Spalte die Entsorgungskosten für mittel radioaktives Material und die dritte Spalte die Entsorgungskosten für stark radioaktives Material. Der Vektor $\vec{v}_{Behaelter,Tech_i}^T$ bildet einen Einheitsvektor, der die gewählte Behältergröße widerspiegelt. Der Ergebnisvektor $\vec{k}_{Behaelter,Tech_i}^{Ausschleus}$ beinhaltet die Entsorgungskosten für den gewählten Behälterttyp untergliedert in Kosten für schwach radioaktives bis stark radioaktives Material.

$$K_{Tech_i}^{Ausschleus} = n_{Tech_i}^{Ausschleus} * \begin{pmatrix} a_{LW} \\ a_{MW} \\ a_{HW} \end{pmatrix} * \vec{k}_{Behaelter,Tech_i}^{Ausschleus} \quad (8.60)$$

Die Entsorgungskosten ergeben sich nach Formel 8.60 aus der Anzahl der Entsorgungsbehältnisse $n_{Tech_i}^{Ausschleus}$ multipliziert mit den unterschiedlichen Anteilen von schwach bis stark radioaktivem Material a_{LW}, a_{MW}, a_{HW} in Prozent, wobei die Summe der Anteile 100 % ergibt, multipliziert mit dem Vektor $\vec{k}_{Behaelter,Tech_i}^{Ausschleus}$ aus Formel 8.59.

8.4.16 Ablaufbedingte Zusatzzeiten

Ablaufbedingte Zusatzzeiten ergeben sich dann, wenn eine Aufgabe nicht komplett in einem Schritt abgearbeitet werden kann und zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten ein Werkzeugwechsel erforderlich ist (z.B. wenn ein Verfahren zur Anwendung kommen soll, mit dem keine Bewehrung getrennt werden kann und somit beim fortschreitenden Betonrückbau mit einem anderen Werkzeug die Bewehrung getrennt werden muss). Das System berücksichtigt diese Werkzeugwechsel derart, dass eine bestimmte, verfahrensabhängige Betonbearbeitungstiefe vom Werkzeug bearbeitet werden kann, dann ein Werkzeugwechsel erfolgt, die Bewehrung geschnitten und anschließend mit der Betonbearbeitung fortgesetzt wird. Zur Berechnung dieser zusätzlichen Werkzeugwechselzeiten muss der Systemnutzer lediglich im Fragenkatalog angeben, ob eine Bewehrungstrennung mit fortschreitender Bearbeitungstiefe erforderlich ist.

Des weiteren ergeben sich ablaufbedingte Werkzeugwechsel durch die Aufteilung der Gesamtaufgabe in einzelne Arbeitsschritte. Im System werden diese zusätzlichen Werkzeugwechselzeiten durch Maßgabe des Systemnutzers berücksichtigt. Dabei muss der Systemnutzer im Fragenkatalog angeben, in wie viele Teilschritte ein Bauteil zwingend unterteilt werden muss⁴. Danach gibt der Systemnutzer an, welche Bearbeitungs-

⁴Beim Rückbau eines biologischen Schildes wird beispielsweise wie folgt vorgegangen: Die Rück-

aufgaben dieser Unterteilung unterliegen. Das System berechnet mit diesen Angaben sodann die Anzahl der erforderlichen Werkzeugwechsel für jede Aufgabe, die dazugehörigen Einzelzeiten und die zusätzliche Gesamtzeit der Werkzeugwechsel.

Durch Variationen der oben genannten Anforderungen kann der Systemnutzer vom System unterschiedliche Ergebnisse berechnen lassen und entscheiden, welche Rückbauvorgehensweise bei komplexen Rückbauvorhaben zu favorisieren ist.

8.4.17 Beispielhafte Bestimmung von Zeiten und Leistungsdaten

In diesem Kapitel werden die in den vorstehend genannten Kapiteln aufgeführten Arbeitsaufgaben anhand eines realen Projektes erläutert. Dieses Projektbeispiel zeigt, wie die Zeiten und Leistungsdaten bestimmt wurden.

Die Aufgabenstellung war die Erzeugung eines Durchbruches zur Erschließung eines Raumes. Bedingt durch eine sehr hohe Ortsdosisleistung musste der Durchbruch fernbedient hergestellt werden. Der Durchbruch sollte eine Höhe von 300 cm und eine Breite von 250 cm bei einer Wandstärke von 150 cm besitzen, wobei die Unterkante des Durchbruches 35 cm über dem Raumbodenniveau festgelegt wurde. Die Wände des Durchbruches sollten plan und möglichst glatt sein. Die Wand besaß im unteren Abschnitt bis zu einer Höhe von 78 cm einen Metallliner (Bodenwanne) mit einer Stärke von 3 mm. Ein weiterer Metallliner mit einer Höhe von 250 cm war an der gegenüberliegenden Seite der Wand angebracht. Diese Liner sollten im Zuge der Durchbruchherstellung qualifiziert getrennt werden. Die Größe einer einzelnen herauszutrennenden Platte wurde mit 125 x 43 cm bzw. 125 x 107,5 cm festgelegt. Der Liner war an einem U-Träger (U 100) angeschweißt, welcher an der Lineroberkante horizontal im Beton einbetoniert war.

Zur Herstellung des Durchbruches wurde das Baggeranbaufräsen gewählt, wobei als Trägergerät ein fernbedienbarer Bagger mit einem Dienstgewicht von 5500 kg zur Anwendung kam. Da die Staubausbreitung möglichst eingedämmt werden sollte, wurde eine Staubabsauganlage eingesetzt, welche beim Bearbeitungsprozess den anfallenden Staub kontinuierlich abgesaugt hat. Der bei der Bearbeitung der Wand entstehende Betonabraum fiel zunächst zu Boden und wurde dann charchenweise mit der Absauganlage qualifiziert in Fässer gesaugt. Um beim Bearbeitungsprozess die Bodenwanne (Liner) nicht zu beschädigen, wurde vor den Arbeitsbereich eine Abraumwanne gestellt. Der an der Wand befindliche Liner wurde qualifiziert mit einem Trennschleifer abgetragen, so dass die Wannenfunktion des Liners nach der Herstellung des Durchbruches wieder hergestellt werden konnte.

Um den gesamten Prozess abbilden zu können, wird dieser zunächst in Einzelprozesse zerlegt. Für jeden Einzelprozess werden dann die Zeitdauern ermittelt, so dass eine Datenbasis für weitere Projekte geschaffen werden kann. In diesem Projekt lauten die Einzelprozesse des Gesamtprozess: die Rüstzeit (Baggereinschleusung und Positionierung Bagger sowie Trennschleifer), das qualifizierte Ausschneiden der vorderen Bodenwanne und des Trägers, das Setzen der Abraumwanne, die Bearbeitung des Betons

bauplaner unterteilen den biologischen Schild in n vertikale Lagen. Diese Lagen werden lagenweise komplett zurückgebaut bevor die Bearbeitung der nächste Lage beginnt.

Teilprozess	Abbaufläche/- masse oder Wegstrecke	Zeit	Leistungsdaten
Baggereinschleusung	12 m	12 min	1 m/min
Baggerpositionierung		15 min	
Positionierung Trennschleifer		4 min	
Ausschneiden Bodenwanne (Platten 1250 x 430 mm)	3360 mm	24 min	140 mm/min
Umsetzzeit Trennschleifer		3 min	
Heraustrennen Träger	100 mm	65 sec	95 mm/min
Aufnahme und Transport der Bleche		5 min	
Setzen der Abraumwanne		23 min	
Betonfräsen	3,1 m ³	8 h	0,4 m ³ /h
Absaugen des Betonabraums und Ver- füllen in Fässer (4 Fässer / Charche)	0,8 m ³	76 min	19 min/Fass
Trennen von Bewehrung (d=14mm)	164 Schnitte	6,5 h	143 sec/Schnitt
Aufnahme und Transport der Beweh- rungseisen	128 Stück	10,5 h	5 min
Aufnahme und Transport der Träger- stücke		7 min	
Fernbedienter Werkzeugwechsel mit Schnellwechsler am Bagger		6 min	

Tabelle 8.3: Prozesszeiten im Projekt „Durchbruchsherstellung“

bis zur 1. Bewehrungslage, die Absaugung der bis dahin angefallenen Betonmenge, die Trennung der Bewehrung, die Verpackung der Bewehrung, die Bearbeitung des Betons bis zur hinteren Bewehrungslage, die charchenweise Absaugung des entstandenen Betonabraums, die Verpackung der Bügelbewehrung in Fässer, die Trennung der hinteren Bewehrungslage, die Verpackung der Bewehrung in Fässer, der restliche Betonabtrag, die Absaugung des Restbetons, die qualifizierte Trennung des hinteren Liners und des Trägers und der Abtransport der Abraumwanne (vgl. Abbildung 8.7).

Zur Herstellung dieses Durchbruches wurden die Zeiten im Zuge eines Testbetriebes (kalter Betrieb) aufgenommen, welcher den Bedingungen im heißen Betrieb ähnelt, allerdings ohne radiologische Belastung. Ziel dieses „kalten Betriebes“ ist es, vorhandene Schwachstellen an Geräten und Werkzeugen zu erkennen und zu beseitigen. Des weiteren kann sich das Bedienpersonal mit den Geräten vertraut machen, so dass Bedienungsfehler eingeschränkt werden können. Der im heißen Betrieb notwendige Arbeitsgang „Abtrag der Dekontbeschichtung im Bereich des Durchbruches“ wurde nicht durchgeführt.

Als Rüstzeiten für den Bagger geht die Einschleusezeit als variable Größe und die Positionierungszeit als Fixgröße in die Berechnung ein. Der Trennschleifer konnte mit einer Vorschubgeschwindigkeit von ca. 140 mm/min betrieben werden. Hinzu kommt eine durchschnittliche Umsetzzeit von 3 Minuten pro Schnitt. Die Bleche wurden dann mit einem Magnetgreifer aufgenommen und seitlich gelagert, so dass der Bagger nur eine Schwenkbewegung ausführen musste. Der eigentliche Aufnahmeprozess dauerte 2

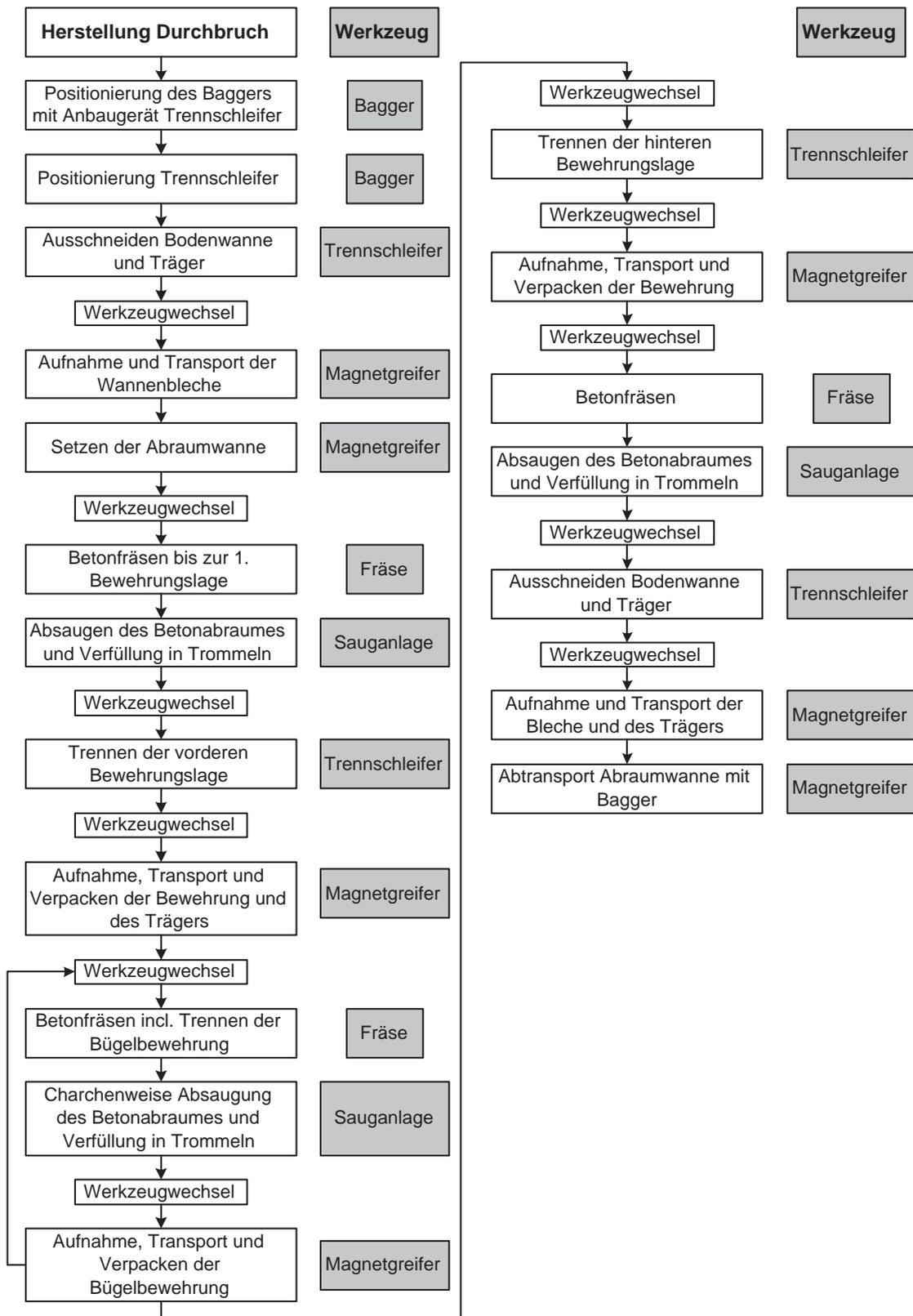


Abbildung 8.7: Schematische Darstellung des Abbauablaufes

Minuten, die Dauer der Schwenkbewegung und das Positionieren des Bleches sowie der Absetzvorgang weitere 3 Minuten. Ein eventuell notwendiger Transport des Bleches mit dem Bagger ist mit der Zeitdauer einer Baggereinschleusung gleichzusetzen.

Für die Heraustrennung des Trägers waren 3 Schnitte erforderlich. Die Trennung erfolgte durch Einstecken des Trennschleifers in den Träger, so dass sich dieser im späteren Arbeitsschritt der Betontrennung mit der Betonfräse löste und in die Abraumwanne fiel, dort aufgenommen und abtransportiert werden konnte.

Der Vorgang des Setzens der Abraumwanne besteht aus der Aufnahme der Wanne mit dem Magnetgreifer, der Positionierung und des Absetzens der Wanne, so dass der Gesamtprozess dem Prozess der Aufnahme und des Absetzens des Bodenwannenbleches entspricht. Für diesen Vorgang wurden 23 Minuten benötigt, wobei der Bagger lediglich Schwenkbewegungen auszuführen hatte.

Für den Abtransport des Betons wurden Reststofffässer R200 gewählt, welche ein Abfallproduktvolumen von $0,2 \text{ m}^3$ besitzen. Da mit wenig Dosisleistung des Betons zu rechnen ist, wird in ein Fass ca. $0,2 \text{ m}^3$ loser Beton gefüllt. Unter Berücksichtigung der Schüttdichte von ca. 16 kN/m^3 und einer Normalbetondichte im eingebauten Zustand von 24 kN/m^3 ergibt sich eine Füllmenge von $0,13 \text{ fm}^3$ pro Fass, so dass für das gesamte Abfallvolumen 87 Fässer benötigt werden. Der Bewehrungsstahl wurde in 75 und 83 cm lange Stücke geschnitten; somit mussten für die vordere Bewehrungslage 164 Trennschnitte ausgeführt werden, welche einen Zeitbedarf von 6,5 Stunden besaßen. Dabei entstanden für die vordere Bewehrungslage insgesamt 128 Stücke, welche in ein Fass gestellt wurden. Die Bewehrungsseisen fielen bei der weiteren Bearbeitung des Betons in die Abraumwanne, wo sie von einem Greifer aufgenommen und in einem Fass abgelegt wurden. Der Zeitbedarf für diese Tätigkeit betrug 10,5 Stunden für die vordere Bewehrungslage, also ca. 5 Minuten pro Stab.

Die Betonfräsarbeiten wurden mit einer Abbauleistung von $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgeführt, wobei die Bügelbewehrung mit einem Durchmesser von 12 mm mit getrennt werden konnten. Einzige Unterbrechung beim Trennvorgang war die Absaugung des zu Boden gefallen Betonabraumes, welcher nach Befüllung der Abraumwanne ($L \times B \times H = 300 \times 80 \times 30 \text{ cm}$) charchenweise abgesaugt wurde. Hierfür war kein Werkzeugwechsel am Bagger erforderlich, da die Fräse den Saugschlauch mitführte bzw. über eine Haken-Öse-Verbindung aufnehmen und ablegen konnte. Der Zeitbedarf für diesen Arbeitsschritt betrug einschließlich der An- und Abdockzeiten eines Fasses an der Absauganlage 19 Minuten, wobei die Befüllungszeit eines Fasses 12 Minuten betrug.

Für einen Werkzeugwechsel wurden bei diesem Projekt ca. 6 Minuten benötigt. Die benötigte Zeit ist aber stark davon abhängig, ob die Werkzeuge in separaten Werkzeuggestellen abgesetzt werden müssen und die Hydraulik abgekoppelt wird oder ob ein Manipulator ein mitgeführtes Werkzeug aufnimmt. Im letzteren Fall dauert ein Werkzeugwechsel lediglich ca. 2 Minuten.

Die erzielten Zeiten bei der Durchbruchsherstellung und die Auswertungen sind in Tabelle 8.3 wiedergegeben.

8.4.18 Besonderheiten der Kostenermittlung

Bei der Kostenermittlung wurde bisher nur auf die Bearbeitungszeitkosten eingegangen. Wenn ein Verfahren für mehrere Aufgaben eingesetzt wird, nach Projektabschluss keine Verwendung mehr findet oder entsorgt werden soll, werden die tatsächlich entstandenen Kosten ermittelt. Dabei werden statt den Vorhaltekosten V_{Typi} die Gesamtinvestitionskosten $K_{invGes,Typi}$ angesetzt. Bei den Verschleißteil- und sonstigen Kosten werden die tatsächlich entstehenden Kosten ermittelt und angesetzt. Die Energie- und Schmierstoffkosten bleiben als monatliche Kosten bestehen.

Um diesen Rechengang durchzuführen, müssen die Systemnutzer diejenigen Verfahren markieren, für die diese Kostenberechnung anzusetzen ist.

Des weiteren wird bei der Kostenermittlung darauf eingegangen, welche Mannschaftsstärke die einzelnen Verfahren für eine effektive Bearbeitung benötigen. Diese Mannschaftsstärke wird dann mit den Lohnkosten und der berechneten Rückbauzeit multipliziert.

8.4.19 Zusatzkosten und -zeiten aufgrund erhöhten Filterwechsels

Rückbauverfahren bzw. -skombinationen, die Staub emittieren, erfordern, falls der entsprechende Raum / Zelle an ein Lüftungssystem angeschlossen ist, einen erhöhten LüftungsfILTERWECHSEL. Dies gilt insbesondere dann, wenn beim genutzten Verfahren keine Staub- bzw. Materialabsauganlage nachgeschaltet wird.

Im Anforderungskatalog (vgl. Kapitel 6.4.7) wurden Angaben gemacht, ab welcher Staubentwicklung ein erhöhter Filterwechsel erforderlich ist und in welchen zeitlichen Abständen dieser Austausch vorzunehmen ist. Des weiteren mussten Angaben über die Kosten und die benötigte Zeit eines einmaligen Filtertausches gemacht werden. Nach der Aufgabenstellung ergibt sich eine definierte Bearbeitungszeit der staubemittierenden Rückbauverfahren. Die Zusatzkosten für den Filterwechsel K_{FW} hängen von der Staubkategorie der Rückbauverfahren ab und ergeben sich nach der Formel 8.61.

$$K_{FW} = \frac{t_{rueck}}{t_{FW}} * n_{Filter} * k_{FW} \quad (8.61)$$

Die Zeit t_{rueck} ist die Rückbauzeit des staubemittierenden Rückbauverfahrens für das betrachtete Bauteil. t_{FW} ist die spezifische Zeit, je nach vorhandener Staubklasse (vgl. Tabelle 6.6), nach der ein Filteraustausch vorgenommen werden muss. Der Quotient t_{rueck}/t_{FW} gibt die Anzahl der Filterwechselforgänge an, n_{Filter} die Anzahl der zu wechselnden Filter und k_{FW} die spezifischen Kosten für einen einmaligen Filterwechsel.

Der erhöhte zeitliche Aufwand der zusätzlichen Filterwechsel wird nach Formel 8.62 erfasst, wobei zu beachten ist, dass sich dieser Aufwand je nach verwendetem Rückbauverfahren unterscheidet. Hierbei wird betrachtet, welcher Staubklasse ein Rückbauverfahren zugeordnet ist (t_{FW}) und wie lange dieses betrachtete Verfahren für den Rückbau benötigt (t_{rueck}).

$$T_{FW} = \frac{t_{rueck}}{t_{FW}} * n_{Filter} * t_{DFW} \quad (8.62)$$

Die Zeit t_{DFW} entspricht dabei der Zeitdauer für einen einmaligen Filterwechsel und T_{FW} der benötigten Gesamtzeit für den Filterwechsel bei der betrachteten Rückbaumaßnahme. Der Quotient t_{rueck}/t_{FW} gibt die Gesamtanzahl der Filterwechsel an.

Bei der Wahl einer Absauganlage ergeben sich naturgemäß andere Staubkategorien der betrachteten Rückauverfahren, so dass sich die zusätzlichen Kosten und Zeiten verringern oder, im günstigsten Fall, entfallen.

8.4.20 Zusatzkosten und -zeiten aufgrund von Zusatzmaßnahmen

Die Zusatzkosten bilden einen festen Bestandteil der Rückbaukosten und sind je nach verwendeten Rückbauverfahren variabel. Variabler Bestandteil der Zusatzkosten sind die Kosten für die Installation oder den Umbau von Lüftungstechnischen Einrichtungen, da diese unter Umständen nicht anfallen, wenn bei den Rückbautätigkeiten keine Absauganlagen verwendet werden.

Tore und Türen

Die Investitionskosten K_{InvT} der Tore und Türen ergeben sich aufgrund einer Preiskalkulation früherer Projekte, einer Kostenschätzung durch das Fachpersonal der Anlage oder einer konkreten Preisanfrage. Hinzu kommen die Kosten für den Einbau $K_{EinbauT}$. Zu diesen fixen Kosten wird noch ein variabler Bestandteil, die Kosten für eine eventuell neu zu beschaffende Hebevorrichtung inklusive deren Einbau K_{Hebev} hinzuaddiert. Die Gesamtkosten K_T der Türen und Tore ergeben sich dann nach Formel 8.63.

$$K_T = K_{InvT} + K_{EinbauT} + K_{Hebev} \quad (8.63)$$

Die Gesamtzeit T_T für den Einbau von Türen und Tore ergibt sich aus der Addition der Einzelzeiten des Einbaus der Türen/Tore $T_{EinbauT}$ und des eventuell notwendigen Einbaus der Hebevorrichtung T_{Hebev} (Formel 8.64).

$$T_T = T_{EinbauT} + T_{Hebev} \quad (8.64)$$

Zur Ermittlung der Kollektivdosis wird die Formel 8.65 so modifiziert, dass sich aus der Gesamtzeit die Arbeitszeit ergibt.

$$T_{KDT} = T_{EinbauT} * n_{PEinbauT} + T_{Hebev} * n_{PHebev} \quad (8.65)$$

Die Personenzeit T_{PT} ergibt sich aus der Einbauzeit der Türen/Toren multipliziert mit der Personalstärke $n_{PEinbauT}$, die hierfür eingeplant ist, und der Einbauzeit der Hebevorrichtung multipliziert mit der Personalstärke für die Installation der Hebevorrichtung n_{PHebev} .

Licht, Medientechnik, Lüftungstechnik

Die Kosten und die Zeiten für die zusätzliche Installation von Licht-, Medien- oder Lüftungstechnik variieren von Projekt zu Projekt. Die einzelnen Kostenbestandteile

werden nur dann berücksichtigt, wenn diese laut Anforderungskatalog gefordert werden (vgl. Kapitel 6.5.2 bis 6.5.4).

Die oben genannten Kosten werden, ähnlich den Kosten der Tore und Türen, durch eine Kostenschätzung, eine Preiskalkulation oder durch konkrete Angebote in das System eingegeben. In einem ersten Schritt können diese Kosten auch vom System bereitgestellt werden, falls diesbezüglich Daten vorhanden sind. Diese Kosten sind in den jeweiligen Kategorien der Subsysteme zu finden (vgl. Kapitel 7.2). Die einzelnen Kostenbestandteile verdeutlicht Formel 8.66:

$$K_{InvLiMeLu} = K_{InvLi} + K_{InvMe} + K_{InvLu} \quad (8.66)$$

Die Investitionskosten für die Licht-, Medien- und Lüftungstechnik $K_{InvLiMeLu}$ ergeben sich aus der Addition der einzelnen Bestandteile Lichtquellen K_{InvLi} , Medientechnik K_{InvMe} und Lüftungstechnik K_{InvLu} .

Für diese zum Rückbau gehörenden, vorbereitenden Maßnahmen werden die benötigten Zeitdauern für die Installation von den Fachkräften der betreffenden Anlage ermittelt. Die Projektzeitdauer der vorbereitenden Maßnahmen wird mit Hilfe der Netzplantechnik berechnet.⁵ Die Systemnutzer geben hierzu im Anforderungskatalog die Zeitdauern für die einzelnen Tätigkeiten und die Abhängigkeiten der Tätigkeiten in Form von Anfang-Anfang-Beziehungen untereinander ein (vgl. Kapitel 6.5.2 bis 6.5.4). Die Projektdauer der vorbereitenden Maßnahmen ergibt sich nach Formel 8.67:

$$T_{LiMeLu} = \max(\max[\Delta_{LiMe}; \Delta_{LiLu}] + T_{InsLi}; \max[\Delta_{MeLi}; \Delta_{MeLu}] + T_{InsMe}; \max[\Delta_{LuLi}; \Delta_{LuMe}] + T_{InsLu}) \quad (8.67)$$

Die Projektzeit T_{LiMeLu} für die vorbereitenden Maßnahmen ergibt sich aus den Zeitdauern der einzelnen vorbereitenden Tätigkeiten zuzüglich den jeweils maximalen Anfang-Anfang-Beziehungen. Die sich hierbei ergebende Maximalzeit bildet die Projektzeit der vorbereitenden Maßnahmen.

Zur Ermittlung der Kollektivdosis wird die Formel 8.67 so modifiziert, dass sich aus der Projektzeitdauer die Arbeitszeit in Mannstunden ergibt (Formel 8.68).

$$T_{KDLiMeLu} = T_{InstLi} * n_{PIInstLi} + T_{InstMe} * n_{PIInstMe} + T_{InstLu} * n_{PIInstLu} \quad (8.68)$$

Die Personenzeit $T_{KDLiMeLu}$ ergibt sich aus den Installationszeiten der Licht- (T_{InstLi}), Medien- (T_{InstMe}) und Lüftungstechnik (T_{InstLu}) multipliziert mit den jeweiligen Personalstärken $n_{PIInstLi}$, $n_{PIInstMe}$ und $n_{PIInstLu}$, die für diese Tätigkeiten geplant sind.

8.4.21 Kosten von zu errichtenden betrieblichen Einrichtungen

In der Anforderungskomponente werden die neu zu errichtenden, betrieblichen Einrichtungen erfasst und mit Kosten bewertet. In der Entscheidungskomponente werden

⁵Zu den Grundlagen der Netzplantechnik vergleiche (Neumann und Morlock, 2002)

diese Kosten zusammengefasst und als Gesamtkostenblock ausgegeben. Die Gesamtkosten hierfür ergeben sich aus den Kosten für den Umbau bzw. der Neuerrichtung der Sozialeinrichtungen K_{SozE} , den Kosten für die zusätzlichen Strahlenschutzeinrichtungen $K_{StrlSchE}$, den Kosten für den Neubau von Leitständen K_{LeitS} und den Kosten der zusätzlichen Einrichtung $\sum_1^n K_{ZEi}$, falls vorhanden (Formel 8.69).

$$K_{BE} = K_{SozE} + K_{StrlSchE} + K_{LeitS} + \sum_1^n K_{ZEi} \quad (8.69)$$

8.5 Matrixpartition

Nachdem in einem ersten Schritt (vgl. Kapitel 8.3) Verfahren aufgrund ihrer technischen Gegebenheit ausgeschlossen wurden, wird in einem zweiten Schritt durch eine Matrixpartition der Matrix A^* eine Ausgangslösung generiert. Diese Ausgangslösung beinhaltet ein Verfahren oder eine Verfahrenskombination, mit der das betrachtete Bauteil zurückgebaut werden kann. Aufbauend auf dieser Ausgangslösung wird durch einen neu entwickelten Suchalgorithmus mit Hilfe des Branch & Bound Verfahren die geeignetste Lösung, je nach Zieldefinition, gefunden.

Ausgehend von der Binärmatrix A^* wird eine Wertematrix W^* (vgl. Matrix 8.70) gebildet, welche die identische Spalten- und Zeilenanzahl sowie die identischen Zuordnungen besitzt wie die Binärmatrix A^* . In der Wertematrix stehen die Kosten oder Zeiten der einzelnen Verfahren. Zur Berechnung dieser Kosten und Zeiten wird auf das Kapitel 8.4 verwiesen.

$$W^* = \left(\begin{array}{cccccc|c} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1j} & \dots & w_{1m} & \sum_{j=1}^m w_{1j} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2j} & \dots & w_{2m} & \sum_{j=1}^m w_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ w_{i1} & w_{i2} & \dots & w_{ij} & \dots & w_{im} & \sum_{j=1}^m w_{ij} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ w_{n^*1} & w_{n^*2} & \dots & w_{n^*j} & \dots & w_{n^*m} & \sum_{j=1}^m w_{n^*j} \\ \hline \min w_1 & \min w_2 & \dots & \min w_j & \dots & \min w_m & \sum_{j=1}^m \min w_j \end{array} \right) \quad (8.70)$$

Durch die Aufgabenzuordnungen, wie sie im Modell RKA definiert wurden, ergeben sich keine betrieblichen Ablauffragen. Erhöhte Werkzeugwechselzeiten ergeben sich z.B. dann, wenn ein ständiger Wechsel zwischen Werkzeugen, die Beton, aber keine Bewehrung rückbauen können und Bewehrungsschneidewerkzeugen stattfindet (vgl. Kapitel 8.4.16).

Die Vorgehensweise bei der Matrixpartition verdeutlicht der Algorithmus in Tabelle 8.4. Wenn der Algorithmus abgearbeitet wurde, ist eine gute Ausgangslösung gefunden, die aber nicht notwendigerweise optimal sein muss. Der Hauptgrund liegt in der Art und Weise, wie die Spalten und Zeilenreduktion erfolgt und somit in der Zuteilung, welche Aufgaben von welchen Verfahren bearbeitet werden.

-
1. Wenn die Matrix A^* leer ist, ist das Problem gelöst. Terminiere.
 2. Andernfalls wähle die Zeile r mit der maximalen Zeilensumme $\sum_{j=1}^m a_{ij}$. Bei Summengleichheit mehrerer Zeilen
 - (a) Wähle die Zeile mit den geringsten Kosten / Zeiten der Wertematrix W^*
 3. Nehme die Zeile r in die Teillösung auf
 - (a) Notiere die Kosten / Zeiten der Zeile r ($\sum_{j=1}^m w_{rj}$).
 - (b) Addiere die Kosten / Zeiten der Zeile r zu den Kosten / Zeiten der vorangegangenen Iterationsschritte.
 4. Für jede Spalte j , für die gilt $A_{r,j} = 1$
 - (a) Lösche Spalte j aus Matrix A^* und Matrix W^* .
 - (b) Lösche Zeile r aus Matrix A^* und Matrix W^* .
 5. Merke den Schritte der Zeilen- und Spaltenreduktion.
 6. Wiederhole den Algorithmus rekursiv an der reduzierten Matrix A^* . Gehe zu 1.
-

Tabelle 8.4: Algorithmus zur Matrixpartition

Dazu muss die Zielfunktion w_0 minimiert werden. Die einzelnen Bestandteile der Zielfunktion ergeben sich aus der Wertematrix W^* (Matrix 8.70) und der darin enthaltenen Zeilenminima $\sum_{j=1}^m w_{rj}$ und der Binärmatrix A^* (Matrix 8.2). Damit ergibt sich der optimale Zielfunktionswert aus:

$$\min w_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \min w_j \quad (8.71)$$

Hierbei besteht die Summe $\sum_{i=1}^n$ aus der Anzahl n der Matrixreduktionen und die Summe $\sum_{j=1}^m \min w_j$ aus den jeweiligen Zeilenminima der gewählten Zeilen. Für $i < n$ ergibt sich die Teillösung W_0^* , da noch keine Gesamtlösung für das Problem gefunden wurde und die Binärmatrix A^* noch nicht leer ist.

Da bislang für die Lösung des Problems kein adäquater Lösungsweg vorhanden war, wurde für das Modell RKA zur Findung der Optimallösung des Problems der Algorithmus 8.5 entwickelt. Dabei verbessert der Algorithmus die Ausgangslösung durch eine Folge von Rückwärtsschritten und endet in der Regel nach endlich vielen Iterationen mit der Bestimmung einer optimalen Lösung bzw. einem Nachweis, dass eine solche nicht existiert.

Hierzu wird zunächst ein Backtracking der gefundenen Ausgangslösung durchgeführt, indem die letzte vorgenommene Matrixreduktion rückgängig gemacht wird. Dieser Rückwärtsschritt wird gemerkt, um bei weiteren Iterationsschritten nicht in Endlosschleifen hängen zu bleiben. Anschließend wird geprüft, ob theoretisch eine Zielfunktionsverbesserung eintreten kann. Wenn die Möglichkeit besteht, eine Zielverbesserung zu erreichen, wird dies mit Hilfe der Matrixreduktionsregeln überprüft. Im Unterschied zum Algorithmus 8.4 für die Findung der Ausgangslösung werden beim Algorithmus

-
1. Gehe einen Schritt der Matrixreduktion zurück.
 2. Merke den Rückwärtsschritt.
 3. Prüfe, ob eine Zielfunktionsverbesserung eintreten kann. Addiere dazu zur Teillösung W_0^* der Matrixreduktion aus der Wertematrix W^* die Spaltenminima $\sum_{j=1}^m \min w_j$ der reduzierten Wertematrix W^* und vergleiche das Ergebnis mit der bereits besten gefunden Lösung.

$$w_{0,neu}^* = W_0^* + \sum_{j=1}^m \min w_j$$

- (a) Kann keine Zielfunktionsverbesserung eintreten ($w_{0,neu}^* > w_{0,alt}$), gehe zu 1.
- (b) Ist der prognostizierte Zielfunktionswert kleiner als der bisher erreichte ($w_{0,neu}^* < w_{0,alt}$), suche eine Zeile nach folgenden Regeln:

- i. Suche die Zeile r der Matrix W^* mit den meisten Spaltenminima.

$$w_{rj,min} = \sum_{j=1}^m w_{rj} \text{ mit } w_{rj} = \begin{cases} 1 & \text{falls } w_{rj} = \min w_j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

- ii. Bei Zeilen mit gleicher Anzahl von Spaltenminima, wähle die Zeile mit der größten Zeilensumme $\sum_{j=1}^m a_{ij} = \max$ aus Matrix A^* . Bei Summengleichheit gehe wie folgt vor

A. Prüfe, ob für die Zeilen gilt: $a_{ij} = a_{rj}$ für alle i, r, j in Matrix A^* .

B. Wenn ja, wähle die Zeile mit $\sum_{j=1}^m w_{rj} = \min$ aus Matrix W^*

C. Wenn nein, wähle eine beliebige Zeile aus ii.

- iii. Nehme die Zeile r in die Teillösung auf.

- iv. Addiere die Zeilensumme $\sum_{j=1}^m w_{rj}$ zur Zwischenlösung.

$$W_0^* + \sum_{j=1}^m w_{rj} = W_1^*$$

- (c) Für jede Spalte j , für die gilt $A_{r,j} = 1$

i. Lösche Spalte j aus Matrix A^* und Matrix W^* .

ii. Lösche Zeile r von Matrix A^* und Matrix W^* .

4. Wenn die Matrix A^* leer ist, ist das Problem gelöst. Gehe zu 5, sonst gehe zu 3.
5. Berechne den neuen Zielfunktionswert W_{k+1} und überprüfe, ob eine Verbesserung der Zielfunktion eingetreten ist.

$$W_{k+1} \leq W_k$$

6. Ist dieser besser als der bereits gefundene, nimm den neuen Zielfunktionswert in die Lösung auf.

$$W_{k+1} := W_k$$

Merke die neue Lösung. Gehe zu 1.

Tabelle 8.5: Algorithmus zur Findung der Optimallösung

8.5 andere Regeln zur Zeilenauswahl angewandt. Zur Findung einer optimalen Lösung werden die Zeilen nach dem Kriterium der meisten Spaltenminima durchsucht. Es wird dann die Zeile ausgesucht, die die meisten Spaltenminima besitzt. Wenn mehrere Zeilen die gleiche Anzahl an Spaltenminima besitzen, wird überprüft, welche Zeile die maximale Zeilensumme $\sum_{j=1}^m w_{rj}$ der Matrix A^* besitzt. Bei Summengleichheit muss geprüft werden, ob die unterschiedlichen Verfahren vergleichbar sind, d.h. ob sie die gleichen Aufgaben bewältigen können. Falls dies der Fall ist, wird die Zeile (Verfahren) gewählt, die das geringste Zeilenminimum $\sum_{j=1}^m w_{rj} = \min$ aus Matrix W^* besitzt. Der Schritt (ii) dient also dazu, ein Verfahren zu wählen, das die meisten Aufgaben mit den geringsten Kosten oder Zeiten bewältigen kann, bei sonst gleicher Anzahl an Spaltenminima. Die gewählte Zeile r wird in die Lösung aufgenommen. Die Zeilensumme $\sum_{j=1}^m w_{rj}$ der gewählten Zeile r wird zur Teillösung W_0^* addiert. Anschließend wird eine Matrixreduktion nach den Regeln aus Algorithmus 8.5 durchgeführt und überprüft, ob die Matrix A^* leer ist und somit eine weitere Lösung gefunden wurde. Wenn dies der Fall ist, wird der neue Zielfunktionswert W_1 berechnet und überprüft, ob dieser kleiner ist als der alte Zielfunktionswert W_0 . Ist der neue Zielfunktionswert nicht kleiner als der alte, wurde keine Verbesserung erreicht. Die alte Lösung bleibt als Optimallösung bestehen.

Falls die Matrix A^* nicht leer ist, wird eine weitere Auswahl der Zeilen nach den oben beschriebenen Schemata vorgenommen, und zwar so lange, bis die Matrix A^* leer ist. Die jeweiligen Zwischenlösungen werden gemerkt, so dass keine Endlosschleifen entstehen. Wenn eine Zielfunktionsverbesserung eintritt, ist eine neue Optimallösung gefunden. Diese Lösung wird anschließend für den weiteren Rechengang verwendet.

Algorithmus 8.5 generiert durch diese Methodik eine Tiefensuche, so dass, im Gegensatz zur Breitensuche, durch die Definition einer unteren Schranke (bisher gefundene Ausgangslösung bzw. beste Lösung) nicht alle möglichen Lösungen gefunden werden müssen. Das Verfahren bricht ab, wenn keine Lösungen mehr existieren, die eine Zielfunktionsverbesserung versprechen.

Die Schemata, die zur Berechnung von Zeiten und Kosten verwendet werden, wurden im Kapitel 8.4 erläutert.

Softwareunterstützung und Auswertung

Zur Anwendung des Modells RKA wurde ein Prototyp in der Programmiersprache Java entwickelt, der die in den Kapiteln 6, 7 und 8 vorgestellten Teilmodelle implementiert. Die Überprüfung der Anwendbarkeit erfolgt anhand von Realdaten eines Rückbauprojektes im Forschungszentrum Karlsruhe. In diesem Rückbauprojekt sollten mehrere Durchbrüche zur Erschließung von Zellen und Räumen mit sehr hohen Ortsdosisleistungen hergestellt werden.

Das folgende Kapitel ist wie folgt gegliedert: Zuerst wird der Iststand und die Anforderungen an den Rückbau beschrieben. Anschließend erfolgt an einem Beispiel die Darstellung der softwaretechnischen Umsetzung der Wissenskomponente. Zum Schluß wird auf die Ergebnisse eingegangen, zu denen einerseits die Rückbauplaner, andererseits das Modell RKA gekommen sind.

9.1 Iststand und Anforderung

Das zu betrachtende Rückbauprojekt erfordert zur Durchführung von Rückbaumaßnahmen einer außer Betrieb befindlichen verfahrenstechnischen Anlage die Herstellung mehrerer Durchbrüche an Betonwänden. Die Herstellung dieser Wanddurchbrüche muss im Umfeld unterschiedlicher - zum Teil hoher - Ortsdosisleistungen durchgeführt werden, wobei die Errichtung und Nutzung von Abschirmungen nur teilweise oder eingeschränkt möglich ist. Aus diesem Grund muss es für die Wanddurchbruchherstellung zur Anwendung von industriebewährten fernbedienbaren Betonbearbeitungsverfahren kommen, die sich von einem verfahrbaren Geräteträger sicher und möglichst effizient einsetzen und steuern lassen.

Es sind mehrere horizontale Wanddurchbrüche in unterschiedlichen Abmessungen herzustellen (vgl. Abbildung 9.1), um an die installierten verfahrenstechnischen Anlagen, die zurückzubauen sind, zu kommen. Alle Durchbrüche erschließen Räume oder Zellen eines ehemaligen Zwischenlagerbereiches für mittel- und hochradioaktive flüssige Abfälle. Die Räume und Zellen besitzen keine Zu- oder Ausgänge, die für die

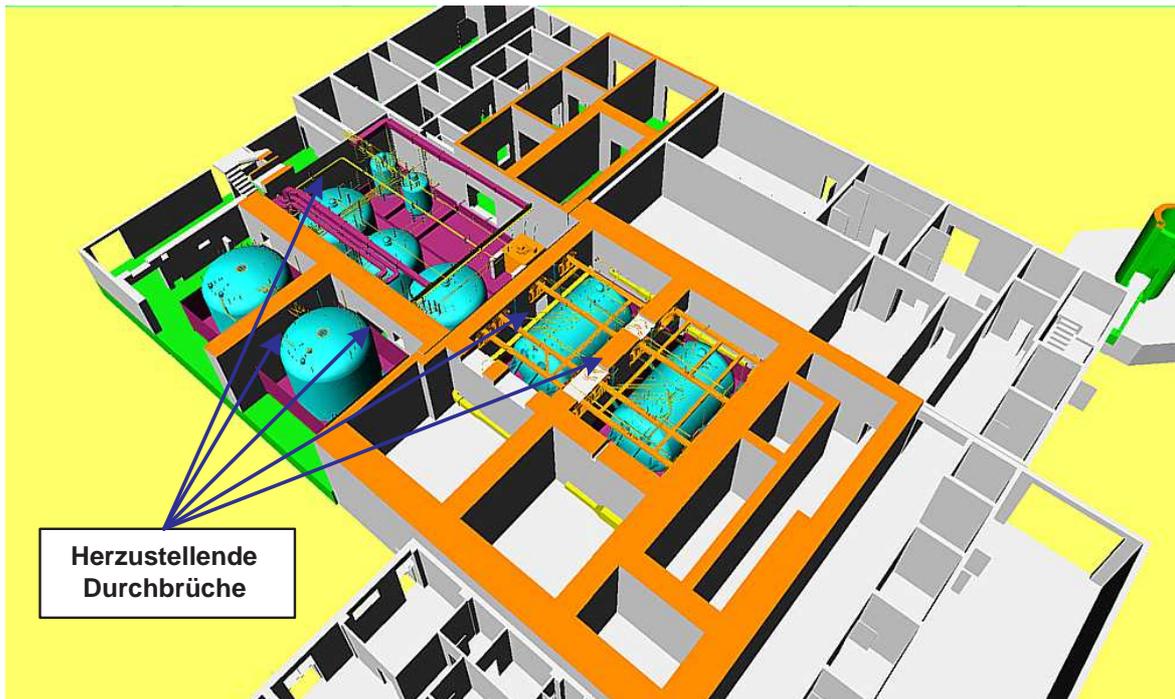


Abbildung 9.1: Virtuelle 3D - Ansicht der zu erschließenden Räume und Zellen [Quelle: WAK]

Nr.	Höhe	Breite	Dicke	Bewehrung	Bewehrungslagen
1	300 cm	250 cm	150 cm	Ø20 a=20cm	4
2	300 cm	250 cm	115 cm	Ø20 a=20cm	4
3	300 cm	250 cm	165 cm	Ø20 a=20cm	8
4	300 cm	250 cm	120 cm	Ø20 a=20cm	4

Tabelle 9.1: Abmessungen und Bewehrungsanteil der herzustellenden Durchbrüche

anstehenden Rückbauaktionen geeignet wären. Während der Betriebszeit war dieser Gebäudekomplex Sperrbereich.

Die Erschließungsmaßnahmen können nicht in einer zeitlich zusammenhängenden Aktion durchgeführt werden, da nach der Erschließung eines Raumes zunächst die verfahrenstechnischen Einrichtungen entfernt werden müssen, bevor der nächste Durchbruch in Angriff genommen werden kann. Dieses etappenweise Vorgehen setzt sich mehrmals fort.

Die Abmessungen und die vorhandene Bewehrung der Durchbrüche sind in Tabelle 9.1 aufgezeigt. Zudem besitzen die Räume und Zellen eine metallische Auskleidung. Naturgemäß sind die Räume und Zellen bei den Erschließungsmaßnahmen nur von der Bearbeitungsseite zugänglich.

Als einzuhaltende Schutzziele seien als wesentliche Ziele der Ausschluss der Gefährdung von Umwelt und Personal, die Beachtung des Minimierungsgebotes der Strahlenschutzverordnung, die Planung sicherer und dosisminimierter Arbeitseinsätze, die Einhaltung/Umsetzung relevanter Arbeitssicherheitsvorschriften, die Einsatzbeschränkung von kühl- und spülwasserverbrauchenden Arbeitsmethoden (Flüssigkeitsanwen-

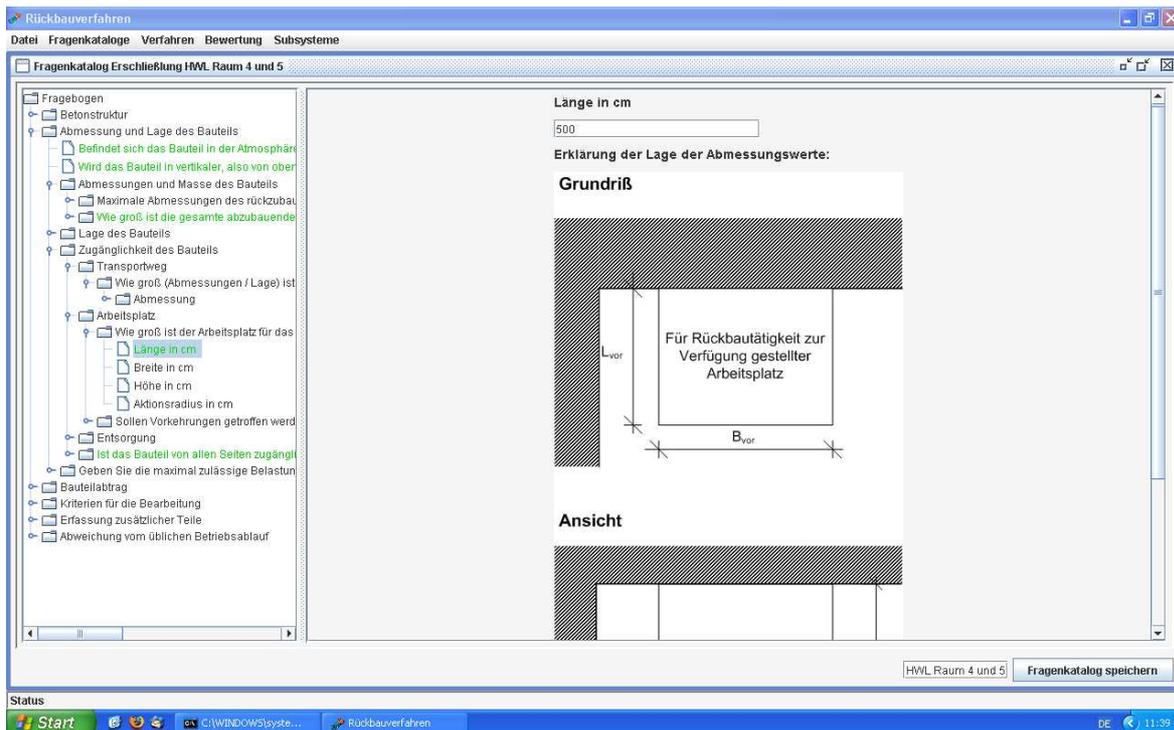


Abbildung 9.2: Fragenkatalog der Anforderungskomponente

dung nur dann, wenn überwachbarer Rücklauf möglich ist) und die Einsatzbeschränkung von funkenerzeugenden Arbeitsmethoden genannt.

Da der herzustellen Durchbruch Nr. 3 die größten Abmessungen besitzt und die übrigen Randbedingungen identisch mit den Randbedingungen der anderen Durchbrüche sind, wird im folgenden nur auf diesen Durchbruch eingegangen. Bei der Verfahrensauswahl wird dann davon ausgegangen, dass alle Durchbrüche mit dem selben Verfahren oder der selben Verfahrenskombination hergestellt werden. Nach Eingabe der gesamten Anforderungsdaten (vgl. Abbildung 9.2) werden diese von der Software zu Kontrollzwecken wiedergegeben:

- **Abmessung und Lage des Bauteils:**

- Das Bauteil befindet sich an der Luft.
- Das Bauteil wird in horizontaler Richtung rückgebaut.
- Das Bauteil hat eine maximale Bearbeitungstiefe von 165 cm, einen maximalen Bearbeitungshöhenbereich von 35 cm bis 335 cm und eine maximale Breite von 300 cm.
- Im Bauteil ist folgende Bewehrung vorhanden: Stabstahl $d = 20$ mm, $a = 20$ cm, 8-Lagen, kreuzweise verlegt.
- Im Bauteil befindet sich ein Stahlträger IPE 200 mit der Länge 250 cm, horizontal verlegt.
- Die gesamte abzubauende Rückbaumasse für das betrachtete Bauteil beträgt $12,38m^3$. Die abzubauende Rückbaumasse aktivierten Betons für das betrachtete Bauteil beträgt $12,38m^3$.
- Das Bauteil befindet sich im Sperrbereich.
- Die Ortsdosisleistung für das betreffende Bauteil beträgt $500000\mu Sv/h$.
- Abmessungen des kleinsten Durchgangs bis zur Arbeitsstelle bzgl. des Transportweges der Rückbaugerätschaften: Länge: 400 cm. Breite: 250 cm. Höhe: 300 cm
- Abmessungen des Arbeitsplatzes für das Rückbauverfahren hinsichtlich des zu bearbeitenden Bauteils: Länge: 500 cm. Breite: 400 cm. Höhe: 500 cm
- Um das Rückbauverfahren in verschiedenen Höhenniveaus einsetzen zu können, sollen keine Arbeitsbühnen, keine Hebebühnen und keine Gerüste eingesetzt werden.
- Die Entsorgung soll über Fässer erfolgen. Die Entsorgung soll **nicht** über Container erfolgen. Monolithische Bauteilsegmente sollen nicht ohne Transportbehälter entsorgt werden. Das abzubrechende aktivierte / kontaminierte Material wird über die angegebenen Entsorgungswege abtransportiert.
- Das Bauteil kann aus Strahlenschutzgründen nur von einer Seite aus bearbeitet werden.
- Die maximal zulässige Belastung der Betondecke, auf der die Rückbaugerätschaften stehen sollen, beträgt $50kN$ bzw. $50kN/m^2$.

- **Bauteilabtrag:**

- Am Bauteil soll ein Durchbruch hergestellt werden.
- Am Bauteil soll kein Oberflächenabtrag durchgeführt werden.
- Das Bauteil ist aktiviert und kontaminiert.
- Umliegende Bauteile müssen nicht vor Kontamination geschützt werden. Aus diesem Grund sind keine Einhausungs- bzw. Abschirmungssysteme erforderlich.
- Die Dicke der Metallauskleidung beträgt 3 mm. Es handelt sich nicht um niedrig legierten Stahl.

- **Kriterien für die Bearbeitung:**

- Das Bauteil soll ausschließlich fernhantiert bearbeitet werden.
- Es sollen keine Abschirmmaßnahmen getroffen werden. Im Umfeld des zu bearbeitenden Bauteils sollen keine Kontaminationsschutzmaßnahmen getroffen werden.
- Die maximale Stoßbelastung darf folgender Kategorie angehören: 3 (Mittel = Angrenzende Gebäudeteile erfahren leichte Vibrationen)
- Die Horizontale Kraft bei der Bearbeitung auf das Bauteil darf maximal 30 kN sein. Sie gehört damit folgender Kategorie an: 2 (Mittel)

- Das Bauteil muss nicht bündig zu einer bestehenden Wand getrennt werden.
 - Beim Rückbau darf kein Wasser verwendet werden.
 - Beim Rückbau darf kein Funkenflug entstehen.
 - Der Staubanteil darf maximal folgender Kategorie angehören: 3 (Mittel = Sichtbar dichter Staub ohne Beeinträchtigung der Sicht)
 - Es darf eine Staubsaugeanlage verwendet werden.
 - Es sind beim Rückbau keine glatten Schnittkanten gefordert.
 - Es dürfen Bruchstücke herunterfallen, aber dadurch keine anderen Bauteile bzw. anderen Konstruktionen geschädigt werden.
 - Die zurückgebaute Masse soll in möglichst kleinstückigen Teilen vorliegen. Das kleinstückige Abbruchmaterial soll abgesaugt werden.
 - Folgende Absauganlagen sollen für das Absaugen von anfallenden Bruchstücke verwendet werden, falls ein Rückbauverfahren gewählt wird, bei der kleinstückiges Abbruchmaterial entsteht: Absauganlage Beton u. Staub.
 - Eine Querkontamination ist nicht zulässig.
- **Erfassung zusätzlicher Teile:**
 - Falls ein oder mehrere Durchbrüche hergestellt werden sollen, soll an dem Durchbruch / den Durchbrüchen folgende Torart angebracht werden: „Abschirmtor“
 - Die Transportabmessungen der Türen bzw. Tore sind kleiner als der kleinste Durchgang bis zur Arbeitsstelle.
 - Es sind Hebevorrichtungen für den Einbau der Tore / der Türen nötig.
 - Die benötigten Hebevorrichtungen sind nicht vorhanden.
 - Es wird eine Hebevorrichtung, die eine Last von 5000 kg tragen muss, für den Einbau des Tors benötigt. Diese muss angeschafft bzw. besorgt werden. Nach Auswahl einer geeigneten Hebevorrichtung muss eventuell ein Statikbüro beauftragt werden, um die Tragfähigkeit des Bodens / der Decke während des Einbauprozesses nachzuweisen.
 - Es müssen zusätzliche Lichtquellen für den Rückbaubereich installiert werden.
 - Es müssen Kameras für den Rückbaubereich installiert werden.
 - Die Lüftungstechnischen Anlagen müssen für den Rückbau des Bauteils nicht verändert werden.

9.2 Bereitgestelltes Rückbauverfahrenswissen

In der softwaretechnischen Umsetzung des Modells RKA kann das Wissen über die Rückbauverfahren abgerufen, geändert und ergänzt werden. Den Rückbauplanern steht somit ein Expertenwissen über die Verfahren zur Verfügung, mit dessen Hilfe schon eine manuelle Verfahrensauswahl erleichtert wird. Die Abbildung 9.3 zeigt exemplarisch am Beispiel Meißeln die softwaretechnische Umsetzung der Wissenskomponente.

Die hierfür erforderliche Datenbasis wurde in Literaturstudien gesammelt, aufbereitet und in Fachgesprächen ergänzt. Des Weiteren konnte in eigenen Versuchen des Verfassers (Zeihner und Gentes, 2005) neues Rückbauverfahrenswissen gewonnen werden. Bei der Literaturstudie wurden die einzelnen Rückbauverfahren zunächst nach ihren Bearbeitungskriterien unterteilt. Diese Unterteilung fand nach den unterschiedlichen Trennungsprinzipien der Verfahren statt. Die Rückbauverfahren können demnach

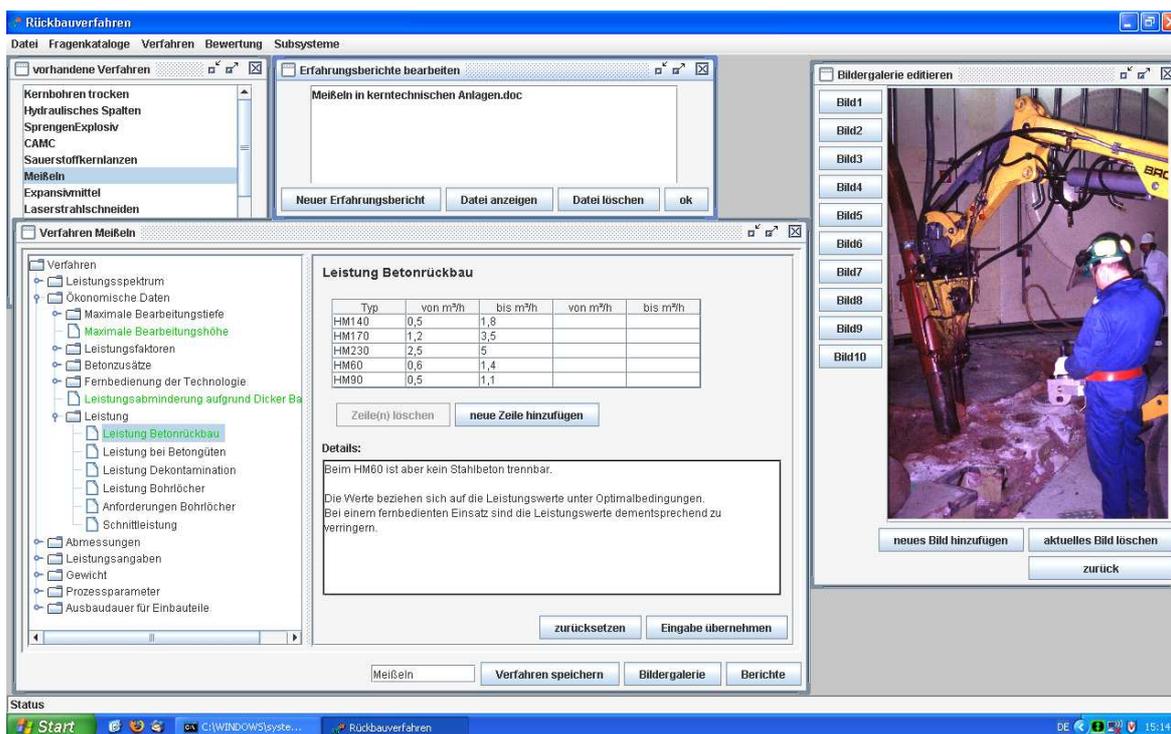


Abbildung 9.3: Darstellung der Wissenskomponente am Beispiel Meißeln

in Verfahren mit mechanischen, thermischen und hydraulischen Trennungsprinzipien unterteilt werden. Die einzelnen Rückbauverfahren und deren Literaturquellen¹ werden nachfolgend aufgelistet.

Verfahren mit thermischen Trennungsprinzipien

Zu den Rückbauverfahren mit thermischen Trennungsprinzipien gehört das autogene Brennschneiden (Bach und Versemann (2001), Neumann (1984), DIN2310 (2003), Priesmeyer (1997), Schreck (1998), Steiner (2001), Bach (1995), Steiner und Priesmeyer (2002)), welches durch ein Gemisch aus Sauerstoff und Brenngas einen Werkstoff auf Zündtemperatur erhitzt und mit dem niedrig legierte Stähle getrennt werden können.

Das Brennbohren mit der Sauerstoffkernlanze ist nach DIN 32 510 Teil 1 ein thermisches Lochstechen für den Einsatz über und unter Wasser. Dieses Verfahren wird zur Trennung von Beton oder Mauerwerk eingesetzt, es findet aber auch bei dicken Metallteilen Anwendung (Bach u. a. (2001), Kloj und Tittel (1984), Osebold (1981), DIN32510 (1979a), Bach u. a. (2001), Bach (1995), Görtz u. a. (1992)).

Beim Pulverschneidbrenner-Verfahren werden mittels Brenngas-Sauerstoff-Flamme und Schneidsauerstoff unter Zuführen metallischer Pulver mineralische Bauteile durch Schmelzschnitten getrennt. Das Metallpulver-Schmelzschnitten ist eine Modifikation des herkömmlichen autogenen Brennschneidens mit Acetylen-Sauerstoff-Brennern. Ein mit Druckluft gefördertes Metallpulvergemisch wird in einer Acetylen-Sauerstoff-Flamme auf Zündtemperatur gebracht und im Schneidsauerstoffstrom verbrannt (Böhme und Hermann (1992), Deubel u. a. (1981), Kloj und Tittel (1984), DIN32510

¹Durch die hier angegebenen Literaturquellen der einzelnen Verfahren konnte das Gesamtwissen über die Verfahren erarbeitet werden.

(1979b), Osebold (1981), Bach u. a. (2001), Bach (1995)).

Das Plasmaschneiden wird vor allem bei nicht brennschneidbaren Metallen, wie Gusseisen, hochlegierten Stählen, Bunt- und Leichtmetallen, aber auch bei un- und niedriglegierten Stählen eingesetzt. Die verschiedenen Verfahrensvarianten sind in DIN 2310 Teil 6 genormt (Bach und Versemann (2001), Bach (1995), Niemeyer (1998), DIN2310 (2003), Priesmeyer (1997), Schreck (1998), Jaeger (1989), Steiner (2001), Engelhardt und Müller-Dietsche (1995)).

Das Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden (LWD) ist ein Schmelzschneidverfahren, das für alle elektrisch leitenden Werkstoffe in der Luft und in nahezu unbegrenzter Wassertiefe geeignet ist. Es lassen sich auch Bauteile mit komplexen Geometrien trennen. Die Trennfuge entsteht in dem zu schneidenden Bauteil dadurch, dass der Werkstoff mit Hilfe eines Lichtbogens geschmolzen und durch einen Wasserstrahl ausgetrieben wird (Bach (1995), Bach u. a. (2001), Priesmeyer (1997), Schreck (1998), Tönshoff (2003)).

Das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (Contact Arc Metal Cutting: CAMC) ist ein Unterwasser-Schneidverfahren, das dem Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden ähnelt. Die Schneidtechnik beruht auf dem Schmelzprozess, der durch diskontinuierliche Kurzschluss-Hochstromlichtbögen hervorgerufen wird. Zum CAMC-Verfahren gehört auch die Verfahrensvariante Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (Contact Arc Metal Grinding: CAMG), die mit einer rotierenden Scheibenelektrode arbeitet, und das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohren (Contact Arc Metal Drilling: CAMD), welches die Herstellung von tiefen Bohrungen und Sacklöchern mit beliebigen Querschnitten ermöglicht (Bach (1995), Bach u. a. (2001), Priesmeyer (1997), Schreck (1998)).

Beim Laserstrahlschneiden handelt es sich nach DIN 2310 Teil 6 um ein Schneidverfahren aus der Gruppe des thermisches Abtragens. Der Werkstoff wird durch den fokussierten Laserstrahl in der Wechselwirkungszone lokal aufgeheizt und direkt oder nach Reaktion mit dem umgebenden Medium bzw. dem Schneidgas als Dampf, Schmelze oder Schlacke mit Hilfe eines zusätzlichen Gasstroms entfernt (Bach (1995), Bach u. a. (2003), Drygalla und Goede (2001), DIN2310 (2003), Schreck (1998), Rümenapp und Lenk (2001), Berend (2002), EWN (2004)).

Der Einsatz von Mikrowellentechnik ist im Gegensatz zu den vorher genannten Verfahren lediglich zur Oberflächenbearbeitung geeignet. Des weiteren handelt es sich nicht „direkt“ um ein thermisches Verfahren, da die Energie mittels elektromagnetischer Wellen übertragen wird. Mit Hilfe dieser Strahlung werden Betonflächen durch den Abtrag der Oberflächenschicht dekontaminiert (Bach (1995), Breitenbücher u. a. (1996), Görtz u. a. (1992)).

Beim Hochstromverfahren werden durch konduktive Erwärmung metallische Werkstoffe unter Nutzung des Joule-Effektes erwärmt. Dabei ist das zu erwärmende Werkstück Teil des Stromkreises und wirkt darin als Ohmscher Widerstand. Beim Stromfluss durch das Werkstück stoßen die bewegten Elektronen die Metallatome an und versetzen sie dadurch in stärkere Schwingungen. Dieser als Joule-Effekt bekannte Vorgang bewirkt somit eine Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme, die direkt im Werkstück freigesetzt wird. Dieses Prinzip wird für die Erhitzung des im Stahlbeton eingebetteten Bewehrungsstahles angewendet (McFarland (1988), Nakagawa (1994), Kasai u. a. (1988), Technische Informationen der Fa. Schüzeichel, Neustadt/Wied).

Bei der induktiven Erwärmung (Induktionsstromverfahren) befindet sich ein metallischer Werkstoff in einem elektromagnetischen Wechselfeld. Dieses Wechselfeld wird von einer Spule oder Windung (sog. Induktor) erzeugt, an der eine Wechselstromquelle angeschlossen ist. In dem metallischen Werkstoff werden Wirbelströme induziert, die ihrer Ursache – der zeitlichen Änderung des magnetischen Feldes – entgegenwirken. Im Vergleich zur konduktiven Erwärmung, die das Herstellen von elektrischen Verbindungen mit dem Werkstoff erfordert, kann mittels induktiver Erwärmung auch ein unzugänglicher, in ein anderes Material eingebetteter metallischer Werkstoff von außen erhitzt werden. Die Wärme entsteht dabei in dem metallischen Werkstoff (Nakagawa (1994), Mashimo u. a. (1988), Technische Informationen der Fa. Schüzeichel, Neustadt/Wied).

Verfahren mit mechanischen Trennungsprinzipien

Meißeln, auch Stemmen genannt, bezeichnet das Lösen und Zerkleinern von Bauteilen mit einem Meißel. Der Vortrieb des Meißels erfolgt durch elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch angetriebene Abbruchhämmer. Als Baggeranbaugeräte werden heute nur noch hydraulisch angetriebenen Hämmer verwendet. Elektrisch betriebene Modelle beschränken sich auf Handgeräte. Das Meißeln ist besonders geeignet für das Lösen und Zerkleinern massiver Bauteile aus bewehrtem und unbewehrtem Beton, Mauerwerk und Asphaltbeton (DIN18007 (2000), Röbenack und Müller (1997), Mansel (2004), Gehbauer und Heppler (2001)).

Mit Abbruchzangen können Bauwerksstrukturen aus Mauerwerk, Beton und Stahl abgebrochen, durchtrennt und zerkleinert werden. Die Zangen arbeiten entweder nach dem Wirkmechanismus des Press- oder Scherschneidens oder benutzen Kombinationen dieser Trenntechniken. Alle in diese Werkzeugkategorie fallenden Abbruchgeräte zeichnen sich durch zangenförmig angeordnete Backen bzw. Scherenschenkel aus, die hydraulisch aufeinander zu bewegt werden. Das sich zwischen den Backen befindliche Bauteil wird entweder zerpresst oder aufgrund der Scherwirkung durchtrennt (DIN18007 (2000), Kotte (1997), Lippok (2004), Bach u. a. (2000)).

Die Technik des Fräsens kann sowohl für eine gezielte Dekontamination als auch für einen großvolumigen Materialabtrag im Sinne einer Zerlegung und Zerkleinerung von Bauwerksstrukturen herangezogen werden. Das Verfahren trägt dabei die Oberfläche schichtweise ab, so dass der Beton definiert und gleichmäßig abgeschält werden kann (DIN18007 (2000), Lippok (2004)).

Für den großflächigen Abtrag dünner Boden-, Wand-, und auch Deckenflächen eignen sich Frässhaver, die in der Lage sind, aufgebrachte Beschichtungen sowie kontaminierte Oberflächen rationell zu entfernen. Die üblichen Geräte zur Bodenbearbeitung haben ihren Ursprung in der Beschichtungsindustrie, wo sie für die Untergrundvorbereitung eingesetzt werden (IfM, Kaw und Hoffmann (1995)).

Das Kugelstrahlen wird zur mechanischen Oberflächenreinigung angewendet. Die überwiegende Zahl der hierfür geeigneten Strahlmaschinen, die mit festem, metallischem Strahlmittel arbeiten, beschleunigen das Strahlmittel durch Schleuderräder. Die Strahlmaschinen werden dem Strahlensystem des Schleuderstrahlens nach DIN 8200 zugeordnet (Kuckelmann (1995), Kirchner (1996), Kotte (1990), Rieche (1995)).

Mit dem Kernbohrverfahren können sehr präzise runde Öffnungen mit einer glatten Bohrlochwand gebohrt werden, ohne das umgebende Gefüge zu stören. Unter diesem Verfahren versteht man das Bohren mit einem Hohlbohrer - der Bohrkronen - wobei lediglich ein Ringspalt aus dem Beton gebohrt wird (Osebold (1981), Lippok (2004), Lindner (1982)).

Die Schneidglieder der Kettensägen arbeiten sich in das zu bearbeitende Material hinein, wobei jeder Zahn kleine Materialmengen abträgt und die Zähne zusammen einen Sägeschlitz durch das Material schneiden. Die Schneidglieder bestehen zumeist aus Sintermetallen mit Diamantsplittern (Lippok (2004), Informationsunterlagen der Fa. Jäckel).

Das Kreissägen wird vor allem zur Herstellung von maßgerechten Trennschnitten für Teilabbrüche (z.B. Wanddurchführungen, selektiver Rückbau etc.) verwendet. Mit diesem Verfahren lassen sich glatte, ebene Schnitte erzeugen. Die Schnitte werden hierbei mit im Durchmesser verschiedenen, rotierenden Diamantsägeblättern erzeugt, wobei Schnitttiefen bis 1030 mm beim Einsatz eines Diamantsägeblattes von 2200 mm möglich sind. Mit diesem Verfahren können nahezu alle Materialien, auch hoch bewehrter Stahlbeton, durchtrennt werden, wobei auch ein schräges Sägen möglich ist (Lippok (2004), Informationsunterlagen der Fa. Hydrostress und Fa. Hilti).

Nach DIN 8580 gehört das Seilsägen zur Hauptgruppe Trennen. Spröde und abrasive Materialien wie Beton oder Natursteine eignen sich zum Seilsägen besonders, da diese Materialien dem Diamantseil eine gute Führung bieten. Durch die Reibung mit dem Beton brechen die synthetischen Diamanten in den Sägeperlen im Mikrobereich und setzen so immer wieder scharfe Schnittstellen frei. Beim Schneiden von Stahl oder Eisen treten diese Effekte nicht auf (Tönshoff u. a. (2000), Kassing (1995), Marques (1998), Breitenbücher u. a. (1996), Lippok (2004)).

Beim Sprengen mit Explosivstoffen werden Bauwerke bzw. Bauteile durch den Einsatz von Sprengladungen in kürzester Zeit teilweise oder vollständig zerteilt, aufgelockert, zertrümmert, in ihrer Höhe reduziert oder zum Einsturz gebracht. Das Sprengverfahren kann entsprechend der DIN 18007 und den Technischen Vorschriften für Abbrucharbeiten (TV-Abbrucharbeiten) nach den Sprengzielen Umlegen von Bauwerken (Kippsprengung), Zusammenstürzen von Bauwerken (Kollapssprengung), Niederbringen von Bauwerken, Auflockern von Bauteilen (Lockerungssprengung), Spalten bzw. Trennen von Bauteilen unterschieden werden (DIN18007 (2000), DIN20163 (1994), Lindner (1982), Freund u. a. (2000), Heinze (1993), Roschlau (1993), Osebold (1981), Hopfe und Katzorke (2003), Loose und Saal (2003), Bach (1995), Lippok (2004), Werner und Melzer (2004), Werner und Melzer (1998), Schumann (1999), Freund (1995), Watzel u. a. (1987), Bacher (1995), Yokota u. a. (1994), Valencia und Bacher (1999), Schreck (1998), Jehle und Freund (1999)).

Das Sprengen mit hydraulischen Spaltgeräten wird auch als hydraulisches Sprengen oder hydraulisches Spalten bezeichnet und findet sich in der DIN 18007 unter der Bezeichnung „Spalten durch Pressen“. Der Begriff „Spalten“ steht dabei für die Herstellung von Trennflächen, das Zerlegen und/oder die Gefügelockerung durch Pressen. Zum Spalten eines Bauteils werden ein oder mehrere Spaltgeräte in vorhandene oder hergestellte Hohlräume eingesetzt. Das Spaltgerät baut über einen hydraulischen Mechanismus einen stetig steigenden statischen Druck auf, der auf die Leibung des Hohlrau-

mes wirkt. Nach Überschreitung seiner Zugfestigkeit reißt das Bauteil auf (DIN18007 (2000), Lippok (2004), Lindner (1982), Osebold (1981), Lemser (1995), Bracke und Klümpen (1999)).

Das Sprengen mit Expansivmitteln ist in der DIN 18007 unter der Bezeichnung „Spalten durch Quelldrücken“ beschrieben. Dabei bezeichnet „Spalten“ die Herstellung von Trennflächen, das Zerlegen und/oder die Gefügelockerung durch quellende Substanzen (Quellmittel). Bei diesem chemischen bzw. chemisch-hydraulisch wirkenden Verfahren bauen Quellmittel, wenn sie in einen Hohlraum eingefüllt werden, durch eine allmähliche chemische Reaktion einen statischen hydraulischen Druck auf, der für das Spalten oder Knäppern harter spröder Materialien wie Beton (teilweise auch Stahlbeton), Mauerwerk sowie Naturstein genutzt wird (DIN18007 (2000), Schwate (1998), Soeda u. a. (1988), Goto u. a. (1988), Hayashi u. a. (1994), Ishii und Soeda (1988)).

Verfahren mit hydraulischen Trennungsprinzipien

Nach DIN 8200 kann die Hochdruck-Wasserstrahl-Technik formal den Strahlverfahren zugeordnet werden. Demnach sind Strahlverfahren definiert als Fertigungsverfahren, bei denen ein Strahlmittel in einem Strahlgerät beschleunigt und zum Aufprall auf die zu bearbeitende Oberfläche gebracht wird. Das Hochdruckwasserstrahlen (HDW) ist ein sehr vielseitig einsetzbares Verfahren, mit dem verschiedenste Materialien gereinigt, aufgeraut, abgetragen und auch geschnitten werden können. Dazu wird ein Wasserstrahl mit einem Druck von 70 bis 400 MPa, teilweise mit abrasiven Beimengungen versehen, auf das zu bearbeitende Werkstück gerichtet und so die gewünschte Form herausgeschnitten oder -gefräst. Das Wasserabrasivstrahlverfahren lässt sich in die Verfahrensvarianten Wasserabrasivinjektorstrahlen (WAIS) und Wasserabrasivsusensionsstrahlen (WASS) unterteilen. Die Unterscheidung der beiden Wasserabrasivstrahlverfahren beruht auf der Art der Beschleunigung und dem Ort der Beimischung des Abrasivstoffes (DIN8200 (1982), Kauw (1998), Brandt und Louis (1996), Brandt u. a. (2001), Momber (2000), Momber (1993), Laurinat (1994), Hammelmann (1997), Tebbing (1997), Geiser u. a. (2002), Brandt (1999), Kretschmer (1997), Lippok (2004), Thonig (1996), Schröder (1998), Bach u. a. (2003)).

9.3 Auswertung und Ergebnisse des Modells RKA

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse des Modells RKA aufgezeigt werden. Daran anschließend erfolgt ein Vergleich der erzielten Ergebnisse mit den Ergebnissen der Rückbauplaner.

Zunächst werden die Aufgaben analysiert. Danach werden durch das regelbasierte Schließen die Verfahren ausgeschlossen, die für die erforderlichen Aufgaben und die formulierten Randbedingungen nicht geeignet sind (vgl. Kapitel 8.2). Für das Beispiel wurden von der Software folgende Verfahren mittels regelbasierten Schließens (vgl. Kapitel 8.2) mit der jeweils aufgeführten Begründung ausgeschlossen:

- Das Verfahren „Seilsägen trocken“ wird ausgeschlossen. Grund: Mit dem Rückbauverfahren ist keine fernhantierte Bearbeitung möglich.

- Das Verfahren „Hydraulisches Spalten“ (Typen: C09L, C09N, C12L, C12N, C12W, SV 200, SC-200, C 12 W) wird ausgeschlossen, da die benötigte Bearbeitungstiefe von keinem der Verfahrenstypen erreicht wird.
- Das Verfahren Kernbohren nass (Typen: 30, 40, 55, 80, 105, 130, 200, 500, 1000) wird ausgeschlossen. Grund: Das Rückbauverfahren verursacht Querkontamination; dies ist allerdings für das Bauteil nicht zulässig.
- Das Verfahren „Pulverschneidbrenner“ wird ausgeschlossen. Grund: Die geforderte Bearbeitungstiefe wird vom Verfahren nicht erreicht.
- Das Verfahren SprengenExplosivSchneidladung wird ausgeschlossen, da die maximal erlaubte Stoßbelastung von diesem Verfahrenstyp überschritten wird.
- Das Verfahren Frässhaver (Typen: Stapler-Shaver, Portalgerüst-Shaver) wird ausgeschlossen, da die benötigte Bearbeitungstiefe vom Verfahrenstyp nicht erreicht wird.
- Das Verfahren Autogenes Brennschneiden wird ausgeschlossen. Grund: Beim Autogenen Brennschneiden handelt es sich um eine funkenerzeugende Arbeitsmethode.
- Das Verfahren „Tauchseilsägen nass“ wird ausgeschlossen. Grund: Das Rückbauverfahren benötigt für eine effektive Bearbeitung Prozesswasser und verursacht Querkontamination; dies ist allerdings für die Bearbeitung des Bauteils unzulässig.
- Das Verfahren „Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden“ wird ausgeschlossen. Grund: Das Verfahren benötigt für eine effektive Bearbeitung Prozesswasser.
- Das Verfahren „Mikrowellentechnik“ wird ausgeschlossen. Grund: Mit dem Verfahren lässt sich kein Beton zurückbauen.
- Das Verfahren „Kugelstrahlen“ (Typen: 1-8DP, 1-10DE) wird ausgeschlossen. Grund: Mit dem Verfahren lässt sich kein Beton zurückbauen.
- Das Verfahren „Kreissägen“ (Typen: 50, 75, 100, 150, 20) wird ausgeschlossen. Grund: Das Rückbauverfahren verursacht Querkontamination; dies ist allerdings für das Bauteil nicht zulässig.
- Das Verfahren „CAMC“ wird ausgeschlossen. Grund: Das Rückbauverfahren unterstützt nicht das Leistungsspektrum "Bearbeitung an der Luft".
- Das Verfahren „Sprengen Explosiv“ (Typen: Teilsprengung, Totalabbruchsprengung) wird ausgeschlossen, da die maximal erlaubte Stoßbelastung von diesem Verfahrenstyp überschritten wird.
- Das Verfahren „Sauerstoffkernlanzen“ (Typen: 1/4'', 3/8'', 1/2'') wird ausgeschlossen, da die benötigte Bearbeitungstiefe von keinem der Verfahrenstypen erreicht wird.
- Das Verfahren „Seilsägen nass“ wird ausgeschlossen. Grund: Das Rückbauverfahren benötigt für eine effektive Bearbeitung Prozesswasser und verursacht Querkontamination; dies ist allerdings für die Bearbeitung des Bauteils unzulässig.
- Das Verfahren „Abbruchzangen“ (Typen: CC400, CC560) wird ausgeschlossen. Grund: Die beidseitige Zugänglichkeit des Bauteils ist nicht möglich.
- Das Verfahren „Elektrothermisches Sprengen“ (Typen: Hochstrom, Induktionsstrom) wird ausgeschlossen, da die die benötigte Bearbeitungstiefe nicht erreicht wird (es ist nur ein Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage möglich).

Rückbauaufgaben	Einsetzbare Verfahren
Vorabausbau von Stahlbauteilen	Scherschneiden, Tauchseilsägen (trocken), Trennschleifen
Rückbau von Bewehrung	Fräsen und Meißeln (bis zu einer bestimmten Bewehrungsstärke), Scherschneiden, Tauchseilsägen (trocken), Trennschleifen
Betonrückbau	Fräsen, Meißeln, Tauchseilsägen (trocken)
Rückbau von Metallauskleidungen	Laserstrahlschneiden, Trennschleifen

Tabelle 9.2: Mögliche Verfahren zur Lösung der Aufgabenstellung

- Das Verfahren „Expansivmittel“ wird ausgeschlossen. Grund: Das Bauteil setzt voraus, dass kein Wasser verwendet werden darf, das Rückbauverfahren benötigt allerdings Wasser.
- Das Verfahren „Kettensägen“ wird ausgeschlossen. Grund: Das Rückbauverfahren verursacht Querkontamination, dies ist allerdings für das Bauteil nicht zulässig.
- Das Verfahren „Wasserstrahltechnik“ wird ausgeschlossen. Grund: Das Rückbauverfahren benötigt für eine effektive Bearbeitung Prozesswasser und verursacht Querkontamination; dies ist allerdings für die Bearbeitung des Bauteils unzulässig.
- Das Verfahren „Tauchsägen Kreis“ (Typen: 50, 100, 150) wird ausgeschlossen. Grund: Das Rückbauverfahren benötigt für eine effektive Bearbeitung Prozesswasser und verursacht Querkontamination; dies ist allerdings für die Bearbeitung des Bauteils unzulässig.
- Das Verfahren „Wasserabrasivstrahlschneiden“ (Typen: WAIS, WASS) wird ausgeschlossen. Grund: Das Rückbauverfahren benötigt für eine effektive Bearbeitung Prozesswasser und verursacht Querkontamination; dies ist allerdings für die Bearbeitung des Bauteils unzulässig.
- Das Verfahren „Plasmaschneiden“ wird ausgeschlossen. Grund: Beim Plasmaschneiden handelt es sich um eine funkenerzeugende Arbeitsmethode.

Nach dem Ausschluss der ungeeigneten Rückbauverfahren erfolgt eine Betrachtung, welche Verfahren für die formulierte Aufgabe geeignet sind (vgl. Tabelle 9.2). Im Unterschied zu einer konventionellen Rückbauplanung erfolgt im Modell zunächst eine Betrachtung aller Verfahren, aus denen die am besten geeigneten herausgefiltert werden. Im Gegensatz dazu wird bei der konventionellen Rückbauplanung ein „vielversprechendes“ Verfahren ausgewählt, und im Anschluss überprüft, ob dieses Verfahren tatsächlich für die Aufgabe geeignet ist. Falls dies nicht der Fall ist, werden andere Verfahren auf ihre Eignung überprüft.

Die prinzipielle Vorgehensweise der Rückbauplaner sah eine Bearbeitung des Betons mit Fräsen oder Meißeln vor. Zur Metallbearbeitung (Metallauskleidung, Stahlträger und Bewehrung) sollten Trennschleifer eingesetzt werden. Das Modell RKA kommt ebenfalls zu diesem Ergebnis, führt aber als für die anstehende Aufgabe grundsätzlich geeignete Verfahren, wie aus Tabelle 9.2 ersichtlich, zusätzlich noch das trockene Tauchseilsägen auf, mit dem Beton, Bewehrung und der Stahlträger in einem Zug bearbeitet werden können und das Rückbauvolumen aufgrund der Herstellung von Betonkuben reduziert wird. Für die Trennung von Bewehrungsstahl und Stahlträger wird vom Modell zusätzlich das Scherschneiden zur Verfügung gestellt, für den Rückbau der Metallauskleidung noch das Laserstrahlschneiden.

Kombination	Betonrückbau	Bewehrungs- rückbau	Rückbau Bodenwanne	Rückbau Stahlträger
1	Meißeln (380 kg Hammergewicht)	Scherschneiden	Trennschleifen	Trennschleifen
2	Meißeln (380 kg Hammergewicht)	Trennschleifen	Trennschleifen	Trennschleifen
3	Fräsen (450 kg Frä- sengewicht)	Scherschneiden	Trennschleifen	Trennschleifen
4	Fräsen (450 kg Frä- sengewicht)	Trennschleifen	Trennschleifen	Trennschleifen

Tabelle 9.3: Optimallösungen der Matrixpartition

Das Modell wendet nun die Matrixpartition zur Findung der Optimalergebnisse an (vgl. Tabelle 9.3), wohingegen die Rückbauplaner mit den drei oben aufgeführten Verfahren Fräsen, Meißeln und Trennschleifen bereits ihre Optimallösung gefunden haben.

Die Optimallösungen der Matrixpartition, basierend auf der Binärmatrix, sind in Tabelle 9.3 ersichtlich. Das Modell RKA kommt demnach, wie die Kombination 1 der Tabelle 9.3 zeigt, zu folgender Optimallösung: Für den Betonrückbau wird das Verfahren Meißeln gewählt, für den Bewehrungsrückbau das Scherschneiden und für den Rückbau der Metallauskleidung und des Stahlträgers das Trennschleifen. Im Vergleich zum Ergebnis der Rückbauer fällt auf, dass sich die Verfahren grundsätzlich decken, mit Ausnahme des Verfahrens für den Bewehrungsrückbau, für welchen das Modell das Scherschneiden als Optimallösung vorsieht. Ein Blick auf die der Optimallösung folgenden Lösungen der Kombinationen 2 und 4 der Tabelle 9.3 zeigt, dass aber auch das Verfahren Trennschleifen, das von den Rückbauplanern gewählt wurde, der Optimallösung nahe kommt. Damit kann gezeigt werden, dass sich die Ergebnisse der Rückbauplaner und des Modells fast decken, das Ergebnis des Modells bei der Auswahl der geeignetsten Verfahrenskombinationen aber noch etwas differenzierter vorgeht.

Nach Berücksichtigung der Zeiten und Kosten der Verfahren stellt sich das Ergebnis der Wertmatrix des Modells wie folgt dar.

Vor dem Hintergrund einer Gesamtzeit des besten Ergebnisses von 190 Arbeitsstunden, was ca. 24 Tagen entspricht, liegt die zeitliche Differenz zwischen dem besten Ergebnis (Kombination 1 der Tabelle 9.3) und dem viertbesten Ergebnis (Kombination 4 der Tabelle 9.3) bei insgesamt 6 Stunden.

Für die Herstellung der Schnitte der vorhandenen Metallauskleidung werden nach Aussage der Planer 3 Tage benötigt. Im Vergleich dazu kommt das Modell RKA hierfür auf eine Zeitdauer von 20 Stunden, d.h. 2,5 Tage, wenn das Verfahren Trennschleifen zur Anwendung kommt. Als alternatives Verfahren stand für diese Aufgabe nur noch das Laserstrahlschneiden mit sehr hohen Investitionskosten und einer im Verhältnis sehr geringen Arbeitsleistung zur Verfügung (die Rückbauzeit der Schnittherstellung lag bei diesem Verfahren bei 145 Stunden).

Für die Herstellung des Betondurchbruches inklusive des Ausbaus des Stahlträgers und der Bewehrung wurden laut Planungsergebnissen 4 Wochen veranschlagt. Das

Modell RKA berechnete die Zeitdauer hierfür mit 21,5 Tagen. Damit decken sich die Ergebnisse des Modells weitestgehend mit den Ergebnissen der Rückbauplaner, was die Funktionalität des Modells beweist.

Zur Ermittlung der Kosten wurden auf Seite der Planer die Investitionskosten angesetzt, die für die Gesamtaufgabe zu erbringen sind. Hier liefert das Modell RKA eine detaillierte Kostenaufstellung, welche die Bearbeitungskosten inklusive Bedienpersonal mit ca. 25.000 Euro für die gesamte Erstellung des Durchbruches bezifferte.

Die Anwendbarkeit des vorgestellten Modells RKA konnte in der softwaretechnischen Umsetzung erfolgreich überprüft werden. Die gefundene Optimallösung des Modells korrespondiert im wesentlichen mit der Lösung der vor Ort tätigen Rückbauplaner, ist sogar etwas differenzierter und gibt auch der Optimallösung nahe kommende Lösungen an, was den Rückbauplanern dann einen größeren Handlungsspielraum eröffnet.

Zusammenfassung und Ausblick

Für den Rückbau massiver Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen steht den Planungsingenieuren ein breites Verfahrensspektrum unterschiedlichster Art zur Verfügung. Bei der Auswahl der einzelnen Verfahren gilt es festzustellen, welches Verfahren für die anstehende Aufgabe aus technischer und wirtschaftlicher Sicht das geeignetste ist. Hierbei sind bauteilspezifisch Rahmenbedingungen unterschiedlichster Art einzuhalten. Ebenso kann ein einzelnes Verfahren in der Regel nicht für alle anstehenden Aufgaben genutzt werden, so dass verschiedene Rückbauverfahren zur Anwendung kommen, welche unterschiedliche Prozessparameter besitzen, die bei der Verfahrensauswahl zu berücksichtigen sind. Um störende Prozessparameter zu eliminieren oder vorgegebene Randbedingungen einzuhalten, werden deshalb Verfahrenskombinationen oder Subsysteme benötigt. Die Vernetztheit der verfahrensseitigen Prozessparameter untereinander sowie mit den bauteilspezifischen Anforderungen macht die gleichzeitige Beachtung sehr vieler Details notwendig und bringt es mit sich, viele voneinander abhängige Merkmale betrachten und eine strukturelle Kopplung vornehmen zu müssen. Bisher existiert keine standardisierte komplexe Lösung, die eine effiziente Verfahrensauswahl unter Betrachtung aller möglichen Methoden, Methodenkombinationen und Werkzeuge unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen erreicht und eine erweiterungsfähige Sammlung von Expertenwissen darstellt.

In der vorliegenden Dissertation wurde deshalb für das oben genannte Problemfeld ein Modell RKA, welches auf wissenschaftlichen Methoden beruht, für die effiziente Verfahrensauswahl beim Rückbau von massiven Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen vorgestellt. Dieses Modell besteht aus drei Komponenten: der Anforderungskomponente, der Wissenskomponente und der Entscheidungskomponente.

In der Anforderungskomponente werden alle erforderlichen Daten über die Örtlichkeit, die einzuhaltenden Randbedingungen, die Anforderungen an den Rückbau und die Beton- und Bewehrungsstruktur des Bauteils aufgenommen, so dass erstmalig die Grundvoraussetzungen geschaffen werden, eine Verfahrensauswahl bauteilspezifisch durchzuführen.

Die Wissenskomponente bildet den Rahmen der Erfassung der Daten der Rückbau-

verfahren. Neben der Beschreibung, für welche Einsatzzwecke welche Verfahren verwendet werden können, erfolgt eine Erläuterung der Vorgehensweise der Datenaufnahme mit der Darstellung, welche Daten der Datenpool zu enthalten hat (Bearbeitungsleistungsdaten, Daten über die Gesamtinvestition des Verfahrens, der Geometrie, der Prozessparameter wie Staubentwicklung und Wasserbedarf, etc.). In dieser Komponente des Modells stehen dem Systemnutzer die eingegebenen Daten zur Einsicht zur Verfügung und er kann sich jederzeit Informationen über die einzelnen Verfahren beschaffen. Bei Weiter- oder Neuentwicklungen können die Daten verändert bzw. neue Verfahren in den Verfahrenspool aufgenommen werden. Der gesamte Datenpool liefert also ein erweiterbares Expertenwissen über alle am Markt vorhandenen Rückbauverfahren.

In der Entscheidungskomponente erfolgt schließlich die Verknüpfung und Verarbeitung der Daten der Anforderungs- und Wissenskomponente, so dass zunächst entschieden werden kann, welche Verfahren sich prinzipiell für den Rückbau des in der Anforderungskomponente beschriebenen Bauteils eignen. Aus dem sich dann ergebenden reduzierten Verfahrenspool wird über den beschriebenen Suchalgorithmus - je nach Nutzeranforderung - das optimale Verfahren oder die optimale Verfahrenskombination ausgewählt.

Das beschriebene Modell wurde auf seine Praxistauglichkeit getestet, wobei gezeigt werden konnte, dass innerhalb kürzester Zeit nach Eingabe aller relevanten Daten eine Optimallösung gefunden werden konnte. Diese optimale Lösung korrespondierte mit der gefundenen Lösung des vor Ort tätigen Projektteams von Planungsingenieuren, wobei im Modell die Lösungsfindung unmittelbar nach Eingabe der Anforderungsdaten erfolgt und kein langwieriger Entscheidungsfindungsprozess nötig ist.

Eine Erweiterung des Modells auf die maschinentechnischen Einrichtungen in einer kerntechnischen Anlage wäre durch eine Erweiterung der Anforderungs- und Entscheidungskomponente möglich, so dass der Rückbauprozess einer kompletten Anlage mit dem Modell RKA geplant werden könnte. Von Vorteil wäre auch eine Schnittstelle zu CAD-Programmen mit deren Hilfe eine genaue Demontageplanung durchgeführt und visualisiert werden könnte. Hierbei müsste eine CAD-Simulationstool erstellt werden, mit dem die einzelnen Rückbauschritte beim Rückbau der maschinentechnischen Einrichtungen automatisiert werden. Dabei sollten die einzelnen Arbeitsschritte detailgenau erfasst und in einem Demontagehandbuch protokolliert und den Rückbauingenieuren zu Verfügung gestellt werden können.

Weiterhin wäre es möglich, die Grundprinzipien des Modells auch für andere Baubereiche zu nutzen, in denen zwar ein breites Verfahrensspektrum zur Verfügung steht, die Entscheidungen aber aufgrund sich bei jedem Projekt ändernder Randbedingungen schwer zu treffen sind. Dies gilt für viele Bereiche bei der Herstellung von Ingenieurbauwerken, sei es beim Tunnel- oder Brückenbau oder bei der Herstellung von extrem hohen Gebäuden, um nur einige zu nennen.

Literaturverzeichnis

- [Arbeitskreis-Abfallmanagement 2004] : *Entsorgung von Kernkraftwerken, eine technische gelöste Aufgabe*. Arbeitskreis Abfallmanagement des VGB PowerTech e.V. 10 2004
- [Auler 2006] AULER, P.: Effiziente Planung und Kostenüberwachung beim Rückbau Kerntechnischer Anlagen. In: *atw* 10 (2006), S. 609–612
- [Bach 1995] BACH, F.-W.: *Handbook on decommissioning of nuclear installations*. European Commission, Directorate-General XII, Science, Research and development, 1995. – ISBN 92-827-0389-4
- [Bach u. a. 2000] BACH, Fr.-W. ; BIENIA, H. ; LINDEMAIER, J. ; REDEKER, Chr. ; VERSEMANN, R. ; WILK, P.: Abtrag- und Zerlegetechniken für den Rückbau kerntechnischer Anlagen. In: *atw* 2 (2000), S. 112–117
- [Bach u. a. 2003] BACH, Fr.-W. ; C.-F., Redeker ; VERSEMANN, R.: *Entwicklung und Qualifizierung neuer Zerlege- und Dekontaminationstechniken für den Rückbau von Forschungsreaktoren unter dem Gesichtspunkt der Kostenminimierung*. Hannover: Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, 2003
- [Bach u. a. 2005] BACH, Fr.-W. ; PFEIFER, W. ; VERSEMANN, R. ; WILK, P. ; VALENCIA, L. ; EISENMANN, B. ; HAMMER, G.: Decommissioning technologies, including recent developments and special features of the dismantling of nuclear research and prototype facilities. In: *Kerntechnik* 70 (2005), S. 31–46
- [Bach und Versemann 2001] BACH, Fr.-W. ; VERSEMANN, R.: Autogenes Brennschneiden und Plasmaschneiden. In: *KONTEC Basics 2001-Handout*. Hannover (2001)
- [Bach u. a. 2001] BACH, Fr.-W. ; VERSEMANN, R. ; BIENIA, H. ; SZELAGOWSKI, A.: Lichtbogen- und Sonderschneidverfahren. In: *KONTEC Basics 2001-Handout*. Hannover (2001)
- [Bacher 1995] BACHER, H.-P.: Sprengungen am Biologischen Schild im Kernkraftwerk Niederaichbach. In: *Nobel Hefte* Jg. 61, Nr. 3 (1995), S. 137–143
- [Bayliss und Langley 2003] BAYLISS, Colin R. ; LANGLEY, K.F. ; PUBL., 1. (Hrsg.): *Nuclear decommissioning, waste management, and enviromental site remediation*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. – ISBN 0-7506-7744-9
- [Beer 1962] BEER, S. ; HAMBURG (Hrsg.): *Kybernetik*. 1962
- [Beierle und Kern-Isberner 2006] BEIERLE, Christoph ; KERN-ISBERNER, Gabriele: *Methoden wissenschaftsbasierter Systeme*. 3., erw. Aufl. Vieweg, 2006. – ISBN 3-8348-0010-4, 978-3-8348-0010-7

- [Berberich 1996] BERBERICH, G. ; AUFLAGE, 2. (Hrsg.): *Atomrechtliche Genehmigung und Aufsicht in Deutschland*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH., 1996
- [Berend 2002] BEREND, O.: Flexibilität hoch drei. In: *phi* 3 (2002), S. 10ff.
- [Böhme und Hermann 1992] BÖHME, D. ; HERMANN, F.-D.: *Handbuch der Schweißverfahren Teil II*. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1992
- [Blaß 1988] BLASS, E. ; DIALER, K. (Hrsg.) ; PAWLOWSKI, J. (Hrsg.) ; SPRINGE, W. (Hrsg.): *Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse; Methode - Zielsuche - Lösungssuche - Lösungsauswahl*. Otto Salle Verlag, Verlag Sauerländer, 1988
- [Bracke und Klümpen 1999] BRACKE, R. ; KLÜMPEN, Ch.: *Arbeitshilfe zur Entwicklung von Rückbaukonzepten im Zuge des Flächenrecyclings*. Serie: Materialien zur Altlasten-Sanierung und zum Bodenschutz, Bd. 9., Essen: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 1999
- [Brandt 1999] BRANDT, C.: *Anwendung von Wasserabstrahlsuspensionsstrahlen zur Zerlegung metallischer Komponenten*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999
- [Brandt und Louis 1996] BRANDT, C. ; LOUIS, H.: *Stillegung und Rückbau: Ermittlung des Anwendungsbereiches von Wasserabstrahlsuspensionsstrahlen*. Hannover: Institut für Werkstoffkunde – Bereich Werkstoffeigenschaften, 1996
- [Brandt u. a. 2001] BRANDT, St. ; LOUIS, H. ; MILCHERS, W. ; MOHAMED, M. ; PUDE, F. ; RAD, Chr. v.: *Grundlagen der Wasserstrahltechnik und aktuelle Einsatzgebiete*. Hannover: Institut für Werkstoffkunde, 2001
- [Breitenbücher u. a. 1996] BREITENBÜCHER, R. ; BUDNIK, J. ; EIBL, J. ; GRÜBL, P. ; STAHLBETON, S. 5. Deutscher Ausschuss für (Hrsg.): *Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Baustoffe: Sachstandsbericht*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1996
- [Burkard 1998] BURKARD, Prof. Dr. R.: *Operations Research - Ganzzahlige Optimierung*. Fernuniversität Hagen, 1998
- [Danezer 2002] DANEZER, F. (Hrsg.): *Systems Engineering - Methoden und Praxis*. 11. Auflage. Verlag Industrielle Organisation, 2002
- [Deubel u. a. 1981] DEUBEL, H. ; K.D., Frank ; LINGSCHIEDT, G.: *Metallpulver-Schmelzschnitten von Beton*. Beton 2/1981, 1981
- [DIN18007 2000] DIN18007: *Abbrucharbeiten*. Beuth Verlag, 2000
- [DIN20163 1994] DIN20163: *Sprengtechnik: Begriffe, Einheiten, Formelzeichen*. Beuth Verlag, 1994
- [DIN2310 2003] DIN2310, Teil 6.: *Thermisches Schneiden: Einteilung, Prozesse*. Beuth Verlag, 2003
- [DIN32510 1979a] DIN32510, Teil 1.: *Thermisches Trennen: Brennböhen mit Sauerstoffanlagen in mineralische Werkstoffe*. Beuth Verlag, 1979
- [DIN32510 1979b] DIN32510, Teil 2.: *Thermisches Trennen: Metallpulver-Schmelzschnitten in mineralische Werkstoffe*. Beuth Verlag, 1979
- [DIN8200 1982] DIN8200: *Strahlverfahrenstechnik: Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren*. Beuth Verlag, 1982
- [Drygalla und Goede 2001] DRYGALLA, M. ; GOEDE, M.: Grundlagen des Laserstrahlschneidens für den Rückbau kerntechnischer Anlagen. In: *KONTEC Basics 2001-Handout*. Hannover (2001)

- [Eickelpasch 1999] EICKELPASCH, N.: Stilllegung kerntechnischer Anlagen in der Praxis. In: *Kontec, 4. Internationales Symposium, Kerntechnische Gesellschaft e.V. S. 16-22, 1999*
- [Engelhardt und Müller-Dietsche 1995] ENGELHARDT, G. ; MÜLLER-DIETSCH, W.: *Über die Stilllegung kerntechnischer Anlagen.* Als Ms. gedr. 1995
- [EWN 2004] EWN: Informationsbroschüre zum Einsatz der Lasertechnik bei der Stilllegung und dem Abbau der Kernkraftwerksanlagen der Energiewerke Nord GmbH. In: *Lubmin (2004)*
- [Freund 1995] FREUND, H.-U.: Vorversuche zum sprengtechnischen Abbruch des Biologischen Schilds in stillgelegten Kernkraftwerken. In: *Nobel Hefte* Jg. 61, Nr. 3, (1995), S. 129–136
- [Freund u. a. 2000] FREUND, H.-U. ; DUSEBERG, G. ; SCHUMANN, S. ; ROLLER, H. ; BERLIN, Zürich: Beuth Verlag G. (Hrsg.): *Sprengtechnischer Abbruch: Erprobung und Optimierung.* Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStB (Hrsg.). Serie: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Bd. 530, 2000
- [Gehbauer und Heppler 2000] GEHBAUER, F. ; HEPPLER, K.: Untersuchung und Optimierung der Förderleistung von Saugbaggern / Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB), Universität Karlsruhe (TH). 2000. – Forschungsbericht
- [Gehbauer und Heppler 2001] GEHBAUER, F. ; HEPPLER, K.: Staub- und wasserfreie Abbruchtechnologie für die Kerntechnik] und andere sensitive Bereiche. In: *Bautechnik* Band 78, Heft 3 (2001), S. S. 171–179
- [Gehbauer 2004] GEHBAUER, Fritz: *Baubetriebstechnik II.* Reihe V / Heft 17. Universität Karlsruhe. Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, 2004
- [Geiser u. a. 2002] GEISER, H. ; BACH, Fr.-W. ; VERSEMANN, R. ; WILK, P.: Zerlegetechnik und Entsorgung von Beton und Grafitstrukturen aus kerntechnischen Anlagen. In: *atw* Heft 7 (2002), S. 486–489
- [Gentes 2003] GENTES, Sascha: *Weiterentwicklung von Standardbaumaschinen zur Rettung Verschütteter.* Institut für Technologie und Management im Baubetrieb Universität Karlsruhe (TH), 2003
- [Gluchowski u. a. 1997] GLUCHOWSKI, Peter ; GABRIEL, Roland ; CHAMONI, Peter: *Management Support Systeme.* Springer, 1997. – ISBN 3-540-61782-5, 4-540-61782-5f
- [Goto u. a. 1988] GOTO, K. ; KOJIMA, K. ; WATABE, K.: The Mechanism of Expansive Pressure and Blow-Out of Static Demolition Agent. In: *Kasai, Y.: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Proceedings of the second International RILEM Symposium. Bd. 1: Demolition Methods and Practise.* (1988), S. 132–140
- [Görtz u. a. 1992] GÖRTZ, R. ; GOLDAMMER, W. ; GRAF, R. ; WEIL, L.: *Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Erfahrungen – Technik – Regelwerk.* Technische Akademie Wuppertal. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1992
- [Hall 1962] HALL, A.D.: *A Methodology for Systems Engineering.* Princeton N.J., 1962
- [Hammelmann 1997] HAMMELMANN, F.: *Die Anwendung der Hochdruckwassertechnik beim Bohren, Kerben und Spalten von Gesteinen.* Aachen: Shaker-Verlag, 1997
- [Hartmann 1949] HARTMANN, N. ; MEISENHEIM/GLAN (Hrsg.): *Der Aufbau der realen Welt.* 1949
- [Hayashi u. a. 1994] HAYASHI, H. ; SOEDA, K. ; HIDA, T. ; KANBAYASHI, M.: Non-Explosiv Demolition Agent in Japan. In: *Lauritzen, E.K.: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Guidelines for Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Serie: Rilem Proceedings, Bd. 23.* (1994), S. 231–241

- [Heinze 1993] HEINZE, H.: *Sprengtechnik: Anwendungsgebiete und Verfahren*. 2. Auflage. Leipzig, Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993
- [Hofacker 1999] HOFACKER, Ingo: *Systemunterstützung strategischer Entscheidungsprozesse*. Dt. Univ.-Verl., 1999. – ISBN 3-8244-7004-7
- [Hopfe und Katzorke 2003] HOPFE, M. ; KATZORKE, F.: Historie, Entwicklung und heutiger Stand beim Einsatz von Schneidladungen in der gewerblichen Sprengtechnik. In: *Sprenginfo* Bd. 25, Nr. 1 (2003), S. 46–52
- [IfM] IfM, Studsvik /.: Informationsunterlagen der Firma Studsvik/IfM.
- [Ishii und Soeda 1988] ISHII, S. ; SOEDA, K.: Application of Non-Explosive Demolition Agent for Reinforced Concrete Structure. In: *Kasai, Y.: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Proceedings of the second International RILEM Symposium. Bd. 1: Demolition Methods and Practise*. (1988), S. 167–176
- [Jaeger 1989] JAEGER, M.: *Entwicklung einer Plasmaschmelzschneidtechnologie zum Trennen dickwandiger Bauteile*. Dissertation. Universität Hannover, 1989
- [Jehle und Freund 1999] JEHLE, P. ; FREUND, H.-U.: Der sprengtechnische Abbruch des Brennelemente-Lagerbeckens im Zuge der Stilllegung des Forschungsreaktors FR 2 im Forschungszentrum Karlsruhe. In: *Nobel Hefte* Jg. 65, Nr. 1 (1999), S. 1–18
- [Kasai u. a. 1988] KASAI, Y. ; NAKAGAWA, W. ; NISHITA, K. ; SUGAWARA, T.: Stripping Demolition of Semi-Circular RC Wall by applying electric current through reinforcing bars. In: *Kasai, Y.: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Proceedings of the second International RILEM Symposium. Bd. 1: Demolition Methods and Practise*. (1988), S. 253–262
- [Kassing 1995] KASSING, C.: Ferngesteuerte Diamantseilsäge für Unterwasser-Schnitte. In: *BMT* Band 1, Februar (1995), S. 23
- [Kauw 1998] KAUW, V.: *Anwendung der Hochdruck-Wasserstrahl-Technik auf Beton - Aufrauhern, Abtragen und Schneiden von Beton (Forschungsvorhaben, Schlussbericht, AIF 9562, DBV 167,1, 1996)*. 1. Auflage, Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 1998
- [Kauw und Hoffmann 1995] KAUW, V. ; HOFFMANN, M.: Verfahrenstechniken Betonuntergrund-Vorbehandlung. In: *Stuck Putz Trockenbau* Band 5 (1995), S. 32–38
- [Keen und Scott Morton 1978] KEEN, Peter G. W. ; SCOTT MORTON, Michael S.: *Decision support systems*. Addison-Wesley, 1978. – ISBN 0-201-03667-3
- [Kirchner 1996] KIRCHNER, S.: Die Aufrauhung von Pflasterstraßen. In: *Straße + Autobahn: Zeitschrift für Straßen und Brückenbau, Straßenplanung u. Straßenverwaltung* Band 9 (1996), S. 529–536
- [Kloj und Tittel 1984] KLOJ, G. ; TITTEL, G.: *Thermische und mechanische Trennverfahren für Beton und Stahl*. Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Serie: "Kernforschung und -technologie". Bericht EUR 8633. Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, 1984
- [Kotte 1990] KOTTE, G.: Systeme zur Oberflächenreinigung. In: *Straßen- und Tiefbau* Band 44, Heft 5 (1990), S. 12–15
- [Kotte 1997] KOTTE, G.: Moderner Abbruch mit Hydraulikbaggern. In: *Straße und Tiefbau* Heft 9 (1997), S. 11–14

- [Krallmann u. a. 1997] KRALLMANN, H. ; MERTENS, P. ; SCHIEMANN, I.: Entscheidungsunterstützendes System (EUS). In: MERTENS, A.; Becker J. et a. (Hrsg.): *Lexikon der Wirtschaftsinformatik*. 3., vollst. neubearb. und erw. Aufl. Springer, 1997. – ISBN 3-540-61917-8
- [Kretschmer 1997] KRETSCHMER, M.: *Abfallminimierung in der Wasserabrasivstrahltechnik durch Recycling*. GKSS-Forschungszentrum, 1997
- [Kuckelmann 1995] KUCKELMANN, J.: Aufbereitung kontaminierter Beton- und Steinflächen. In: *Straßen- und Tiefbau* Band 49, Heft 5 (1995), S. 16
- [Kurbel 1989] KURBEL, Karl: *Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen*. Springer, 1989. – ISBN 3-540-51013-3, 0-387-51013-3
- [Kurz und Baumgärtel 1994] KURZ, Alexander ; BAUMGÄRTEL, Günter ; KARLSRUHE, Kernforschungszentrum (Hrsg.): *Deregulierung bei der Stilllegung und Beseitigung nuklearer Anlagen*. Als Ms. gedr. 1994
- [Laurinat 1994] LAURINAT, A.-H.: *Abtragen mit Wasserabrasivinjektorstrahlen*. VDI-Verlag, 1994
- [Lemser 1995] LEMSER, D.: Hydraulische Spaltgeräte. In: *Baumaschine und Bautechnik BMT* Jg. 42, Nr. 1 (1995), S. 49–50
- [Lenart 1991] LENART, Mihaly: *Expertensysteme in der Architektur und im Bauwesen*. Birkhäuser, 1991. – ISBN 3-7643-2534-8
- [Löffler 1980] LÖFFLER, F.: Die Abscheidung von Partikeln aus Gasen in Faserfiltern. In: *Chem.-Ing.-Technik* 52 Nr. 4 (1980), S. S. 312–323
- [Lindner 1982] LINDNER, R. ; SOHN, München Verlag von Wilhelm Ernst und (Hrsg.): *Schälen, Trennen und Abbrechen von Betonbauteilen*. 1982
- [Lippok 2004] LIPPOK, Jürgen: *Abbrucharbeiten*. Müller, 2004. – ISBN 3-481-02031-7
- [Loose und Saal 2003] LOOSE, T. ; SAAL, H.: Sprengtechnisches Trennen von Stahl – Verbesserung der Arbeitssicherheit bei Rückbauarbeiten. In: *Stahlbau* Bd. 72, Nr. 11 (2003), S. 803–808
- [Mansel 2004] MANSEL, M.: Eigenschaften von Material und Maschinen beachten. In: *Das Bauwesen* Band 11 (2004), S. 18–23
- [Marques 1998] MARQUES, P.: Kreisseilsägetechnik – Grundlagen und Anwendung. In: *IDR* Band 32, Heft 2 (1998), S. 138–141
- [Mashimo u. a. 1988] MASHIMO, M. ; OMATSUZAWA, K. ; NISHIZAWA, Y.: Study of dismantling method of reinforced concrete by inductive heating. In: *Kasai, Y.: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Proceedings of the second International RILEM Symposium. Bd. 1: Demolition Methods and Practise*. (1988), S. 273–279
- [McFarland 1988] MCFARLAND, J.M.: Demolition of Concrete Structures by heat - a preliminary studie II. In: *Kasai, Y.: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Proceedings of the second International RILEM Symposium. Bd. 1: Demolition Methods and Practise*. (1988), S. 217–226
- [Mertens 2001] MERTENS, Peter: *Integrierte Informationsverarbeitung, Band 1*. Gabler Verlag; 13. Auflage, 2001. – ISBN 3-409-69049-2
- [Müller-Merbach 1982] MÜLLER-MERBACH, H.: Management Science Process: Phases or Components. In: *Interfaces* 12 (1982), S. 61–65
- [Momber 1993] MOMBER, A.: *Handbuch Druckwasserstrahltechnik*. Düsseldorf: Beton-Verlag, 1993

- [Momber 2000] MOMBER, A.: Großvolumiger Betonabtrag mit HDW. In: *Beton-und Stahlbetonbau* Band 95, Heft 8 (2000), S. 497–498
- [Nakagawa 1994] NAKAGAWA, W.: Recent Demolition Techniques Using Electric Power. In: *Lauritzen, E.K.: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Guidelines for Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Serie: Rilem Proceedings, Bd. 23.* (1994), S. 263–274
- [Neumann 1984] NEUMANN, H.: *Autogentechnik: Grundlagen - Ausbildung - Praxis.* 3., völlig neu bearbeitete Auflage. Grafenau/Württemberg. Expert-Verlag, 1984
- [Neumann und Morlock 2002] NEUMANN, Klaus ; MORLOCK, Martin: *Operations Research.* 2. Auflage. Hanser, 2002. – ISBN 3-446-15771-9
- [Niemeyer 1998] NIEMEYER, M.: *Beschreibung der physikalischen Vorgänge beim atmosphärischen Plasmaschmelzschneiden.* Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2 Nr. 494. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998
- [No.348 1993] NO.348, Technical R.: *Application of remotely operated handling equipment in the decommissioning of nuclear facilities.* International Atomic Energy Agency, 1993. – ISBN 92-0-100493-1
- [No.351 1993] NO.351, Technical R.: *Planning and management for the decommissioning of research reactors and other small nuclear facilities.* International Atomic Energy Agency, 1993. – ISBN 92-0-100693-4
- [No.365 1994] NO.365, Technical R.: *Decontamination of water cooled reactors.* International Atomic Energy Agency, 1994. – ISBN 92-0-101394-9
- [Osebold 1981] OSEBOLD, R.: *Abbruch von Massivbauwerken.* Köln-Braunsfeld: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1981
- [Pedi 2001] PEDI: *Bleimatten.* Prospektunterlagen Pedi AG Zürich, 2001
- [Pfohl 1977] PFOHL, Hans-Christian: *Problemorientierte Entscheidungsfindung in Organisationen.* de Gruyter, 1977. – ISBN 3-11-007093-6
- [Priesmeyer 1997] PRIESMEYER, U.: *Thermische Schneidverfahren und Werkstoffreaktionen im Hinblick auf die Entstehung von Staub und Aerosolen.* Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2 Nr. 450. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997
- [Puppe 1991] PUPPE, Frank: *Einführung in Expertensysteme.* 2. Aufl. Springer, 1991. – ISBN 3-540-54023-7, 0-387-54023-7
- [Rachor 2002] RACHOR, G.: Zerlegen eines radioaktiv kontaminierten "Heißen Zellenblocks". In: *Industrie Diamanten Rundschau (IDR)* (2002), Nr. 2
- [Röbenack und Müller 1997] RÖBENACK, K.-D. ; MÜLLER, A.: *Baustoffrecycling - Stoffkreisläufe und Abbruchverfahren.* Bauhaus Universität Weimar, 1997
- [atw Redaktion 2005] REDAKTION atw: Kernenergie: Weltreport 2006 - Auswertung. In: *atw - international journal for Nuclear Power* Band 52, Heft 7 (2005), S. 497–503
- [atw Redaktion 2006] REDAKTION atw: Kernenergie: Weltreport 2006. In: *atw - international journal for Nuclear Power* Band 52, Heft 4 (2006), S. 273–277
- [Richter 2002] RICHTER: *Schwerbeton/Strahlenschutzbeton.* Zement-Merkblatt Betontechnik B 10, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf. 2002

- [Rieche 1995] RIECHE, G.: Die Wirkung der Untergrundvorbehandlung durch das Kugelstrahlen auf Beton, Magnesia-Estriche und Anhydrit-Estriche. In: *Industriefußböden - Internationales Kolloquium, 10 - 12. Januar 1995* (1995), S. 313-315
- [Rümenapp und Lenk 2001] RÜMENAPP, T. ; LENK, A.: *Betontrennen mit Lasertechnik*. Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden., 2001
- [Roschlau 1993] ROSCHLAU: *Sprengen: Theorie und Praxis*. Leipzig, Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993
- [Schröder 1998] SCHRÖDER, M.: *Betoninstandsetzen, Aktuelle Themen*. 2. Auflage. Freiburg: AEDIFICATO Verlag GmbH, 1998
- [Schreck 1998] SCHRECK, Goswin: *Aspekte zum Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Einsatz fernbedienter Unterwasser-Demontagetechniken*. Als Ms. gedr. VDI-Verl., 1998. – ISBN 3-18-340606-3
- [Schumann 1999] SCHUMANN, S.: Vierteljahresbericht: „Einbruchsprengungen“. In: *Battelle Vorhaben Nr. 68.470. Battelle Ingenieurtechnik GmbH Eschborn* (1999)
- [Schwate 1998] SCHWATE, W.: Einsatz von Quelldruckmitteln als Alternative bei ausgewählten Sprengarbeiten. In: *Glückauf* Bd. 134, Nr. 4 (1998), S. 172-175
- [Siegel 1991] SIEGEL, Wolfgang: *Pneumatische Förderung*. 1. Aufl. Vogel, 1991. – ISBN 3-8023-0432-2
- [Soeda u. a. 1988] SOEDA, K. ; YAMADA, S. ; NAKASHIMA, Y. ; NAKAYA, S.: Non Explosive Demolition Agent. In: *Kasai, Y.: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Proceedings of the second International RILEM Symposium. Bd. 1: Demolition Methods and Practise*. (1988), S. 116-125
- [Steiner 2001] STEINER, H.: Anwendung mechanischer, thermischer und hydraulischer Schneidtechniken für den Rückbau kerntechnischer Anlagen. In: *KONTEC Basics 2001-Handout. Hannover* (2001)
- [Steiner und Priesmeyer 2002] STEINER, H. ; PRIESMEYER, U.: Dismantling Techniques – Part II. In: *EUNDETRAF Session 8-Handout. Mol, Belgien* (2002)
- [Tebbing 1997] TEBBING, G.: *Wasserabrasivstrahlstrahlen im Bereich Reparatur und Zerlegetechnik unter Wasser*. Düsseldorf: VDI-Verl., 1997
- [Thierfeldt 2000] THIERFELDT, S.: *Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen*. 2. Auflage. Foerderkennzeichen O2S77174, 2. neu bearb. Aufl. - Essen : Verl. Glueckauf, 2000
- [Thonig 1996] THONIG, H.: Das Verfahren des abrasiven Wasserstrahlschneidens. In: *Strahltechnik: Vorträge der 4. Konferenz Strahltechnik in Halle (Saale) am 8. und 9. Mai 1996, Deutscher Verband für Schweißtechnik* (1996), S. 96-103
- [Tönshoff 2003] TÖNSHOFF, H.-K.: Automatisierte Fertigung unter Wasser. In: *Deutsche Forschungsgemeinschaft, Sonderforschungsbereiche. Weinheim: WILEY-VCH Verlag* (2003)
- [Tönshoff u. a. 2000] TÖNSHOFF, H.-K. ; FRIEMUTH, T. ; HILLMANN-APMANN: Seilsägen von Stahlbauteilen. In: *IDR Band 34, Heft 4* (2000), S. 309-319
- [Turban und Aronson 1998] TURBAN, Efraim ; ARONSON, Jay E.: *Decision support systems and intelligent systems*. 5. ed. Prentice Hall Internat., 1998. – ISBN 0-13-740937-0, 0-13-781675-8
- [Valencia und Bacher 1999] VALENCIA, L. ; BACHER, H.-P.: Rückbau des Heißdampfreaktors in Kahl am Main bei Aschaffenburg. In: *Tiefbau* Bd. 111, Nr. 3 (1999), S. 126-132

- [Vetschera 1995] VETSCHERA, R.: *Informationssysteme der Unternehmensführung*. Springer, Berlin, 1995
- [Walls u. a. 1992] WALLS, J.G. ; WIDMEYER, G. ; EL SAWY, O.: Building Information Systems Design Theory for Vigilant EIS. In: *Information System Research* 3 36-59 (1992)
- [Watzel 1981] WATZEL, Gerhard V.: *Stillegung von Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland nach Ende ihrer Einsatzdauer*. VDI-Verlag, 1981. – ISBN 3-18-141815-3
- [Watzel u. a. 1987] WATZEL, Gerhard V. ; VOLLRADT, J. ; ESSMANN, J. ; MITTLER, M.: *Technik und Kosten bei der Stillegung von Kernkraftwerken nach Ende ihrer Einsatzdauer*. VDI-Verl., 1987. – ISBN 3-18-145215-7
- [Weber 1974] WEBER, Manfred: *Strömungs-Fördertechnik*. Krausskopf, 1974. – ISBN 3-7830-0084-X
- [Werner und Melzer 1998] WERNER, D. ; MELZER, R.: Abbruchsprengung eines hyperbolischen Stahlbetonkühlturmes. In: *Bautechnik* Bd. 75, Nr. 4 (1998), S. 205–212
- [Werner und Melzer 2004] WERNER, D. ; MELZER, R.: Sprengabbruch von Stahlbeton-Schornsteinen. In: *Bautechnik* Bd. 81, Nr. 6 (2004), S. 431–436
- [Werner 1992] WERNER, Lutz: *Entscheidungsunterstützungssysteme*. Physica-Verl., 1992. – ISBN 3-7908-0637-4
- [Werners 2006] WERNERS, Brigitte: *Grundlagen des Operations Research*. Springer, 2006. – ISBN 3-540-32621-9, 978-3-540-32621-2
- [Wieland 2001] WIELAND: *Prospektunterlagen: Mobile Vakuum-Sauganlagen*. Wieland - Lufttechnik, Erlangen, 2001
- [Wilting 1985] WILTING, Frank: *Gestuftes atomrechtliches Genehmigungsverfahren und Bürgerbeteiligung*. Berlin : Duncker und Humblot, 1985
- [WOMA 2004] WOMA: *Technische Unterlagen der Firma WOMA*. 2004
- [Yokota u. a. 1994] YOKOTA, M. ; SEIKI, Y. ; ISHIKAWA, H.: Experience Gains in Dismantling of the Japan Power Demonstration Reactor (JPDR). In: *Lauritzen, E.K.: Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Guidelines for Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Serie: Rilem Proceedings, Bd. 23. 1. Auflage. London: E and FN Spon* (1994), S. 135–146
- [Zeiher und Gentes 2005] ZEIHNER, M. ; GENTES, S.: Gekapselte Trocken Seilsägetechnologie für staubempfindliche Bereiche. In: *Bautechnik* Jg.: 82, Nr. 6 (2005), S. 387–389

Im Anhang Fragebogen werden alle Fragen der Anforderungskomponente mit den dazugehörigen Anmerkungen aufgelistet.

A.1 Bauteilabtrag

Im Fragenkatalog werden zunächst Angaben zum Bauteilabtrag¹ gemacht. Der Systemnutzer kann die Fragen des Fragenkatalogs neu beantworten (ein neues Projekt anlegen) oder die Antworten eines bereits ausgefüllten Fragenkatalogs verändern (ein Projekt modifizieren, vgl. auch Abbildung A.1).

1. Soll das gesamte Bauteil rückgebaut werden?

ja / nein

*Bei **nein** ergeben sich die folgenden Fragen:*

¹Als gesamtes Bauteil wird z.B. eine gesamte Wand oder Decke, ein gesamtes Bioschild, der komplette Kühlturm / Schornstein verstanden. Darunter ist nicht z.B. ein komplettes Kraftwerkshaus zu verstehen etc.

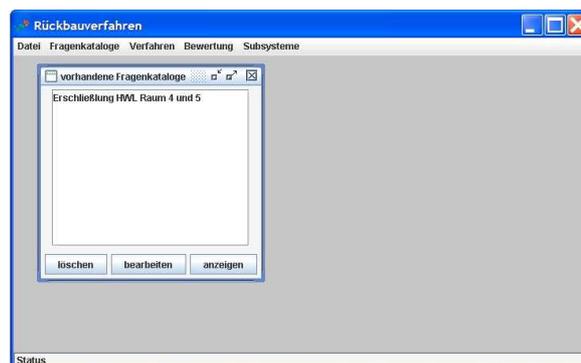


Abbildung A.1: Auswahl Fragenkatalog

(a) **Soll nur ein Teil des Bauteils rückgebaut werden?**

- Das Teilbauteil wird in seiner Dicke vollständig durchbrochen
- Im Teilbauteil wird nur eine Aussparung hergestellt

(b) **Soll ein Oberflächenabtrag des Bauteils durchgeführt werden?**

ja / nein

Bei ja ergeben sich die folgenden weitere Antwortmöglichkeiten:

- Bis maximal zur ersten Bewehrungslage
- Über die erste Bewehrungslage hinaus

2. **Ist das Bauteil aktiviert?**

ja / nein

Bei ja ergibt sich die folgende Frage:(a) **Bis zu welcher Bauteiltiefe ist der Beton aktiviert?²**

... cm

3. **Ist das Bauteil kontaminiert?**

ja / nein

Bei ja ergeben sich die folgenden Fragen:(a) **Bis zu welcher Bauteiltiefe ist der Beton kontaminiert?³**

... cm

(b) **Müssen umliegende Bauteile vor Kontamination geschützt werden?⁴**

ja / nein

4. **Sollen Metallauskleidungen zurückgebaut werden?**

ja / nein

Bei ja ergeben sich folgende Fragen:(a) **Handelt es sich um einen niedrig legierten Stahl?**

ja/nein

(b) **Geben Sie die Dicke der Metallauskleidung an:**

... mm

²Diese Frage steht im Zusammenhang mit der Frage „Soll der aktivierte vom nicht aktivierten Beton vor Ort getrennt werden?“ auf Seite 173

³Diese Frage steht im Zusammenhang mit der Frage „Soll der kontaminierte vom nicht kontaminierten Beton vor Ort getrennt werden?“ auf Seite 173

⁴Wenn der Systemnutzer die Frage bejaht, kann er unter den Verfahrenssystemen aus unterschiedlichen Kontaminationsschutzmaßnahmen die für ihn passende auswählen. Diese Kontaminationsschutzmaßnahmen sind beispielsweise Kontaminationsschutzzelte, Einhausungen, Abschirmungen, Absauganlagen.

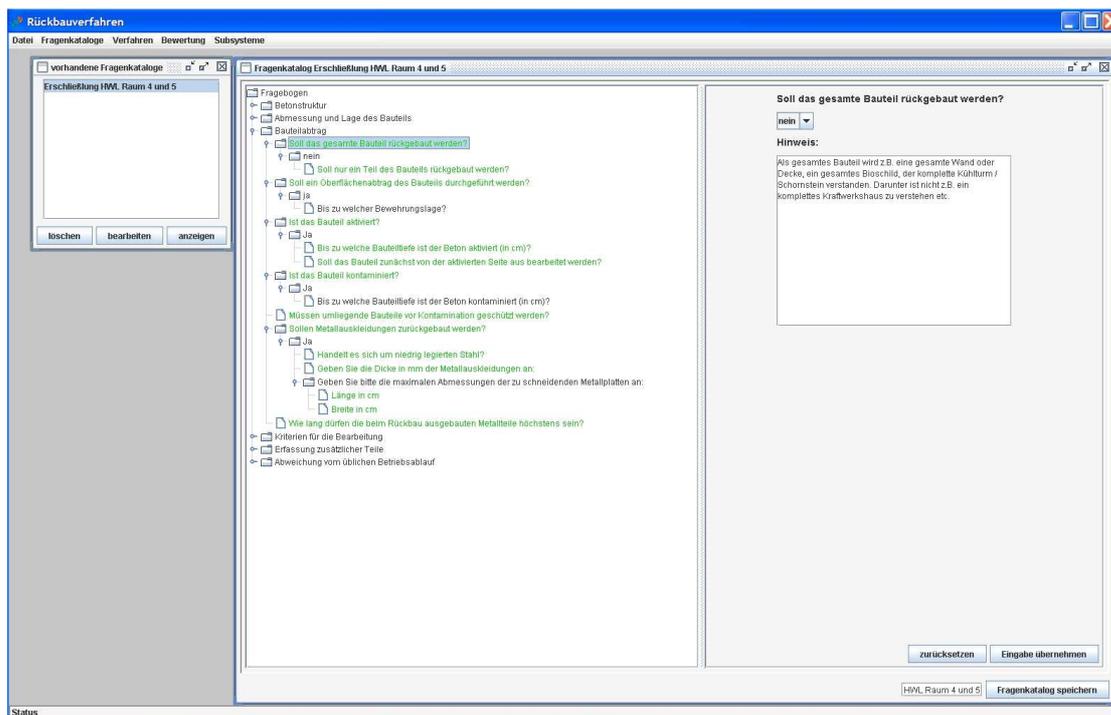


Abbildung A.2: Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Bauteilabtrag“

- (c) Geben Sie bitte die maximalen Abmessungen der zu schneidenden Metallplatten an:
 Breite: ... cm
 Länge: ... cm

5. **Wie lang dürfen die beim Rückbau ausgebauten Metallteile höchstens sein?**

- Ankerplatten: ... cm
 Bewehrung: ... cm
 Stahlträger: ... cm
 Schienen: ... cm
 Stahldurchführungen: ... cm

6. **Soll der Rückbau des Bauteils in unterschiedlichen Teilschritten erfolgen?**

ja / nein

Bei ja ergibt sich folgende Frage:

7. **In wie viele Teilbauteile soll das Bauteil aufgeteilt werden?**

... Bauteile

8. **Welchen Bearbeitungsaufgaben unterliegt diese Teilschrittaufteilung?**

Dekontamination:

ja / nein

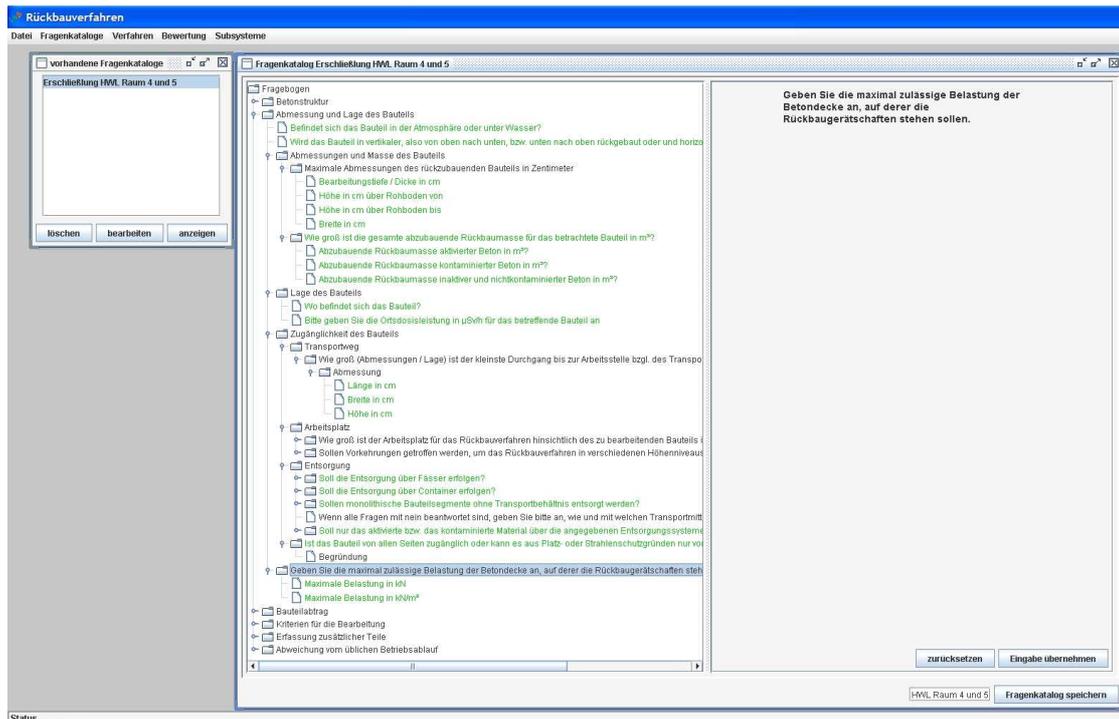


Abbildung A.3: Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Abmessung und Lage des Bauteils“

Rückbau von Metallauskleidungen:	ja / nein
Oberflächenabtrag bis zur 1. Bewehrungslage:	ja / nein
Rückbau von Bewehrung:	ja / nein
Betonrückbau:	ja / nein
Herstellung von Aussparungen:	ja / nein
Bündige Bauteiltrennung:	ja / nein
Herstellung von glatten Schnittkanten:	ja / nein

A.2 Abmessung und Lage des Bauteils

1. Befindet sich das Bauteil an der Luft oder unter Wasser?

- An der Luft
- Unter Wasser

2. In welchem Bereich der kerntechnischen Anlage befindet sich das Bauteil?

- Im sonstigen Bereich
- Im Überwachungsbereich
- Im Kontrollbereich
- Im Sperrbereich

Wenn sich das Bauteil im Kontroll- oder Sperrbereich befindet, schließt sich folgende Frage an:

- (a) Bitte geben Sie die Ortsdosisleistung für das betreffende Bauteil an:
 ... $\mu Sv/h$

3. Wird das Bauteil in vertikaler, also von oben nach unten bzw. unten nach oben rückgebaut, oder horizontaler Richtung abgebaut?

- Vertikale Richtung
- Horizontale Richtung

4. Geben Sie die maximal zulässige Belastung der Betondecke an, auf der die Rückbaugerätschaften stehen sollen:

... kN
 ... kN/m^2

5. Abmessungen und Massen des Bauteils

- (a) Maximale Abmessungen des rückzubauenden Bauteils in Zentimeter⁵

Bearbeitungstiefe / Dicke ... cm
 Höhe über Rohboden von ... bis ... cm
 Breite ... cm

- (b) Abzubauende Rückbaumassen

Wie groß ist die abzubauende Rückbaumasse
 gesamt? ... m^3
 des aktivierten Betons? ... m^3
 des kontaminierten Betons? ... m^3
 des Restbetons? ... m^3

6. Zugänglichkeit des Bauteils

- (a) Wie groß (Abmessungen / Lage) ist der kleinste Durchgang bis zur Arbeitsstelle bzgl. des Transportweges der Rückbaugerätschaften?⁶

Länge $L_{vor} = \dots$ cm
 Breite $B_{vor} = \dots$ cm
 Höhe $H_{vor} = \dots$ cm

⁵Mit Höhe ist die maximale Höhe von einem bestimmten Höhenniveau des zu bearbeitenden Bauteils gemeint, d.h. es ist nur die Höhe zu ermitteln, die von einem Rückbauverfahren noch erreicht werden muss.

⁶Hierbei werden die lichten Maße der Tür- und Toröffnung berücksichtigt. Des weiteren müssen Störkanten bei Treppenauf- und abgängen, Treppenhäuser allgemein und Kabeltrassen, Rohrleitungen, etc. berücksichtigt werden.

- (b) Wie groß ist der Arbeitsplatz für die Rückbauwerkzeuge hinsichtlich des zu bearbeitenden Bauteils?

Länge $L_{Arb} = \dots$ cm
 Breite $B_{Arb} = \dots$ cm
 Höhe $H_{Arb} = \dots$ cm
 Aktionsradius $D_{Arb} = \dots$ cm

- (c) Sollen Vorkehrungen getroffen werden, um die Rückbauwerkzeuge in verschiedenen Höhenniveaus einsetzen zu können?

ja⁷ / nein

Bei **ja** ergeben sich folgende Antwortmöglichkeiten:

Arbeitsbühnen ja / nein
 Hebebühnen ja / nein
 Gerüste ja / nein

7. Entsorgung

- (a) Entsorgung von Betonbruchstücken:⁸

Soll die Entsorgung über Fässer erfolgen? ja / nein / teils
 Soll die Entsorgung über Container erfolgen? ja / nein / teils

- (b) Entsorgung von monolithischen Bauteilsegmenten:

Soll die Entsorgung über Fässer erfolgen? ja / nein / teils
 Soll die Entsorgung über Container erfolgen? ja / nein / teils
 Soll die Entsorgung ohne Transportbehältnis
 (z.B. auf Palette in Folie verpackt) erfolgen ja / nein / teils

- (c) Maximale Größe und maximales Gewicht von Bauteilsegmenten:^{9,10}

Maximale Dicke des Segments \dots cm
 Maximale Breite des Segments \dots cm
 Maximale Höhe des Segments \dots cm
 Maximales Gewicht des Segmentes \dots cm

- (d) Geben sie die Zeit für einen Ausschleusvorgang an:

\dots min

⁷Der Systemnutzer kann aus einer Liste das für Ihn passende Subsystem auswählen

⁸Falls ein Verfahren zur Anwendung kommt, das Betonbruchstücke erzeugt, wird mit dieser Frage festgelegt, wie die Entsorgung zu erfolgen hat. Damit kann eine Berechnung erfolgen, wie lange die Ausschleusvorgänge dauern. In einem weiteren Schritt kann der Systemnutzer die Fass-/Containergröße aus den Subsystemen auswählen. Hierbei sind die unterschiedlichen Fässer/Container nach Typen mit den Spalten Leergewicht [kg], Abmessungen (Länge / Breite / Höhe), Nennvolumen [m^3] und maximales Füllgewicht [kg] klassifiziert.

⁹Das maximale Gewicht der Bauteilsegmente bezieht sich auf das Gewicht, welches noch von einem Transportmittel bewältigt werden kann bzw. auf die Tragfähigkeit des Bodens, auf dem das Bauteil abgelegt bzw. zwischengelagert wird.

¹⁰Das Modell RKA prüft nun, ob die maximalen Abmessungen mit dem zulässigen Gewicht und mit den angegebenen Transportbehältnissen korrelieren. Ist dies nicht der Fall, werden die Abmessungen soweit verringert, bis das zulässige Gewicht erreicht wird.

(e) Wieviel Behälter / Segmente werden in einem Ausschleusvorgang abtransportiert?
... Stück

(f) Soll nur das aktivierte bzw. das kontaminierte Material über die angegebenen Entsorgungssysteme abtransportiert werden?

ja / nein

Bei **ja** ergibt sich folgende Frage und die Antwortmöglichkeiten:

Wie soll das nicht aktivierte / nicht kontaminierte Material abtransportiert werden?

- Material verbleibt in Einbaulage und wird zu einem späteren Zeitpunkt nach der Freimessung konventionell rückgebaut.
- Material wird mit den ausgewählten Rückbauwerkzeugen ausgebaut und vor Ort zwischengelagert.
- Material wird mit den ausgewählten Rückbauwerkzeugen ausgebaut und zunächst an einem anderen Ort zwischengelagert.

(g) Geben Sie den Ort an, an dem das ausgebaute nicht aktivierte / nicht kontaminierte Material zwischengelagert werden soll.¹¹

(h) Geben Sie die Aufbewahrungsbehälter an, in denen das nicht aktivierte / nicht kontaminierte Material zwischengelagert werden soll.

Container	ja / nein
Fässer	ja / nein
Sonstige	ja / nein

8. Ist das Bauteil von allen Seiten zugänglich oder kann es aus Platz- oder Strahlenschutzgründen nur von einer Seite bearbeitet werden?¹²

- Bauteil ist von allen Seiten aus zugänglich
- Bauteil kann aus Strahlenschutzgründen nur von einer Seite aus bearbeitet werden
- Bauteil kann aus Platzgründen nur von einer Seite aus bearbeitet werden
- Bauteil kann aus anderen Gründen nur von einer Seite aus bearbeitet werden

A.3 Betonstruktur

1. Betontyp

(a) Welcher Betontyp ist vorhanden?

Auswahl eines Types aus Tabelle 6.3

(b) Geben Sie die Dichte des Betons in kg/m^3 an: ... kg/m^3

¹¹Es wird ein Textfeld angezeigt, in dem der Nutzer den Ort benennen kann.

¹²Das bedeutet, dass das Bauteil nur von einer Seite bearbeitbar ist und dass die gegenüberliegende Seite unter keinen Umständen von Personal (auch zeitweilig) betreten werden kann oder für ein Rückbauverfahren zugänglich ist.

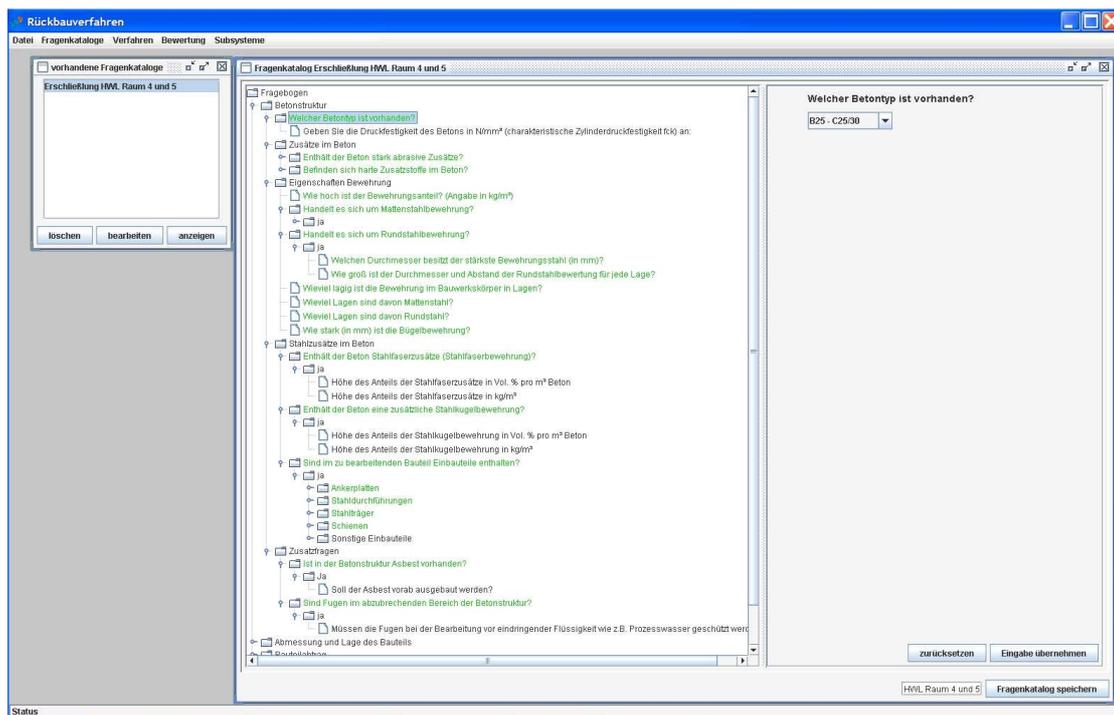


Abbildung A.4: Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Betonstruktur“

2. Betonzusätze

- (a) Enthält der Beton abrasive Zusätze? ja / nein¹³
- (b) Befinden sich harte Zusatzstoffe im Beton? ja / nein¹⁴

3. Eigenschaften Bewehrung

- (a) Wie hoch ist der Bewehrungsanteil in kg/m^3 ? ... kg/m^3
- (b) Handelt es sich um Matten- und/oder Rundstahlbewehrung?¹⁵

Rundstahlbewehrung: ja / nein

Bei ja ergibt sich folgende weitere Frage:

Welchen Durchmesser besitzt der stärkste Bewehrungsstahl? ... mm

Mattenbewehrung ja / nein

Bei ja ergibt sich folgende weitere Frage:

Um welche Mattenbewehrung handelt es sich?

- (c) Wieviel lagig ist die Bewehrung im Bauwerkskörper?
- (d) Wieviel Lagen sind davon Matten-, wieviel Lagen Rundstahl?¹⁶

Stabstahl ... Lagen

¹³Falls sich abrasive Zusätze in der Betonstruktur befinden, hat der Systemnutzer die Möglichkeit, diese Zusätze in einer Tabelle nach Art und prozentuaalem Anteil zu benennen.

¹⁴Falls sich harte Zusätze in der Betonstruktur befinden, hat der Systemnutzer die Möglichkeit, diese Zusätze in einer Tabelle nach Art und prozentuaalem Anteil zu benennen.

¹⁵Der Systemnutzer gibt die vorhandene Matte an (vgl. Abbildung A.5)

¹⁶Der Systemnutzer kann mit Hilfe einer Tabelle die Lage und die darin befindliche Stabdicke und die Stababstände bestimmen (vgl. Abbildung A.6)

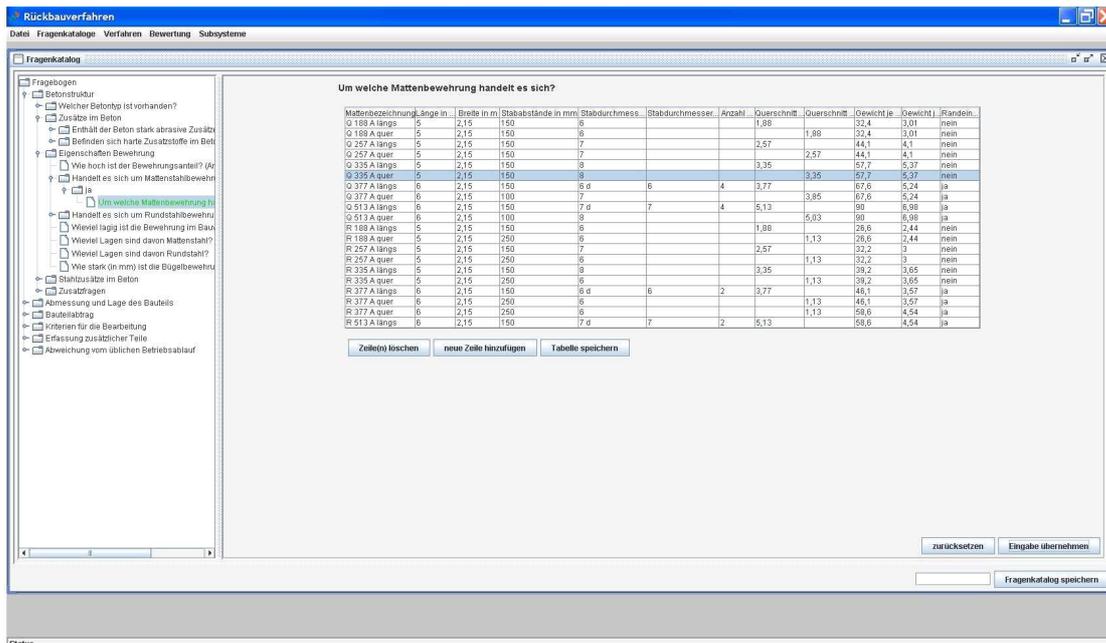


Abbildung A.5: Eingabemaske Mattenbewehrung

Matten ... Lagen

(e) Wie stark (in mm) ist die Bügelbewehrung? ... mm

(f) Ist eine Bewehrungstrennung mit fortschreitender Bearbeitungstiefe erforderlich? ja / nein

4. Stahlzusätze/Einbauteile im Beton

(a) Enthält der Beton Stahlfaserzusätze (Stahlfaserbewehrung)? ja / nein
Bei **ja** ergeben sich die folgenden Eingabemöglichkeiten:

Höhe des Anteils der Stahlfaserzusätze in Vol.% pro m^3 Beton: ... $\frac{\text{Vol.}\%}{m^3}$

Höhe des Anteils der Stahlfaserzusätze in kg pro m^3 Beton: ... $\frac{\text{kg}}{m^3}$

(b) Enthält der Beton eine zusätzliche Stahlkugelbewehrung? ja / nein
Bei **ja** ergeben sich die folgenden Eingabemöglichkeiten:

Höhe des Anteils der Stahlkugelbewehrung in Vol.% pro m^3 Beton: ... $\frac{\text{Vol.}\%}{m^3}$

Höhe des Anteils der Stahlkugelbewehrung in kg pro m^3 Beton: ... $\frac{\text{kg}}{m^3}$

(c) Sind im zu bearbeitenden Bauteil Einbauteile enthalten?¹⁷

Ankerplatten ja / nein

Stahldurchführungen ja / nein

Stahlträger ja / nein

Schienen ja / nein

sonstige Einbauteile ja / nein

¹⁷Die Systemnutzer erhalten eine Liste mit den Abfragedetails über die Einbauteile. Die Abfragedetails sind in Tabelle A.1 wiedergegeben.

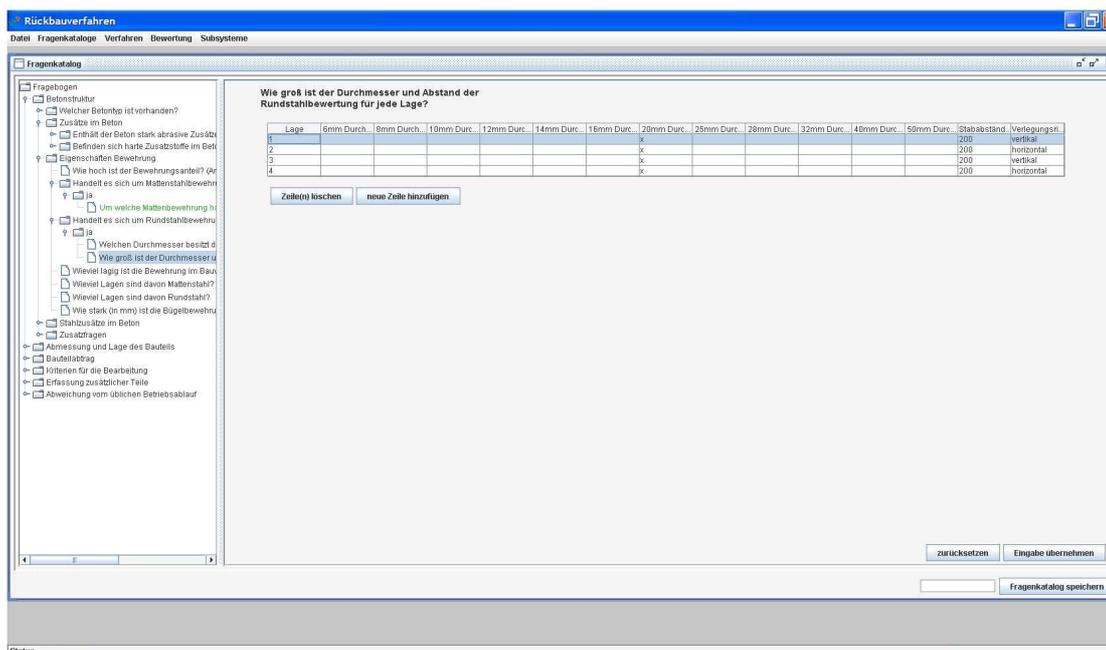


Abbildung A.6: Eingabemaske Rundstahlbewehrung

- (d) Sollen die Einbauteile vorab ausgebaut werden? ja / nein¹⁸
- (e) Ist in der Betonstruktur Asbest vorhanden? ja / nein
Bei ja ergibt sich die folgende weitere Frage:
 Soll der Asbest vorab ausgebaut werden? ja / nein
- (f) Sind Fugen im abzubrechenden Bereich der Betonstruktur?
Bei ja ergibt sich die folgende weitere Frage:
 Müssen die Fugen bei der Bearbeitung vor eindringender Flüssigkeit wie z.B. Prozesswasser geschützt werden? ja / nein

A.4 Erfassung zusätzlicher Teile

1. Sollen an dem Durchbruch / den Durchbrüchen Tore oder Türen angebracht werden?¹⁹

Abschirmtor ja / nein
 Abschirmtür ja / nein
 Feuerschutztür ja / nein
 Tür ja / nein

- (a) Wieviel Zeit wird benötigt, um das Tor/die Tür zu installieren?
 (b) Wieviel Mannstunden werden benötigt, um das Tor/die Tür zu installieren?

¹⁸Mit dieser Frage wird der Systemnutzer nochmals befragt, ob die in der Liste aufgeführten und mit Vorabausbau gekennzeichneten Einbauteile vorab bzw. getrennt vom Betonabbau ausgebaut werden sollen.

¹⁹Diese Frage wird nur gestellt, wenn die Frage „Das Teilbauteil wird in seiner Dicke vollständig durchbrochen“ (Seite 159) mit ja beantwortet wurde!

Einbauteiltyp	Details
Ankerplatten	Kennzeichnung, Raum-Nr., Gebäudeachse, Lage in x- und y-Richtung, Höhenkote, Plattenanzahl, Plattenbreite, Plattenhöhe, Plattendicke, Anzahl der Kopfbolzen je Platte, Kopfbolzenart, Einzelgewicht, Gesamtgewicht, Vorabausbau
Stahldurchführungen	
Rohre	Kennzeichnung, Raum-Nr., Gebäudeachse, Lage in x- und y-Richtung, Anzahl, Breite, Höhe, Dicke, Durchmesser, Einzelgewicht, Gesamtgewicht, Vorabausbau
Stahlkästen	Kennzeichnung, Raum-Nr., Gebäudeachse, Lage in x- und y-Richtung, Anzahl, Breite, Höhe, Dicke, Einzelgewicht, Gesamtgewicht, Vorabausbau
Kabeldurchführungen	Kennzeichnung, Raum-Nr., Gebäudeachse, Lage in x- und y-Richtung, Anzahl, Breite, Höhe, Dicke, Durchmesser, Einzelgewicht, Gesamtgewicht, Vorabausbau
Stahlträger	Typ (nach unterschiedlichen Profilen getrennt), Länge, Anzahl, Gesamtgewicht, Abmessungen, Lage in x- und y-Richtung, Vorabausbau
Schienen	Kennzeichen / Benennung, Art, Lage in x- und y-Richtung, Breite, Höhe, Dicke, Gewicht/m, Gesamtgewicht, Vorabausbau
sonstige Einbauteile	Kennzeichen / Benennung, Anzahl, Art, Lage in x- und y-Richtung, Breite, Höhe, Dicke, Gewicht, Gesamtgewicht, Vorabausbau

Tabelle A.1: Abfrageinhalte der Einbauteile

(c) Wie hoch sind die Investitionskosten für das Tor/die Tür?

2. Welche Transportabmessungen hat das Tor / die Tür?

Bezeichnung des Tores/der Tür

Länge ... cm

Breite ... cm

Höhe ... cm

3. Sind Hebevorrichtungen für den Einbau des Tores / der Tür nötig? ja / nein

Bei **ja** ergibt sich die folgende weitere Frage:

Sind diese Hebevorrichtungen vorhanden? ja / nein

Bei **nein** ergibt sich die folgende weitere Frage:

Welche Last muss die Hebevorrichtung tragen können? ... KN

4. Ist zusätzliches Licht für die Bearbeitung des Bauteiles notwendig?

ja / nein²⁰

5. Wird Medientechnik für die Bearbeitung des Bauteiles notwendig?

ja / nein²¹

²⁰vgl. Eingabemaske der Tabelle 6.7 auf Seite 58

²¹vgl. Eingabemaske der Tabelle 6.8 auf Seite 60

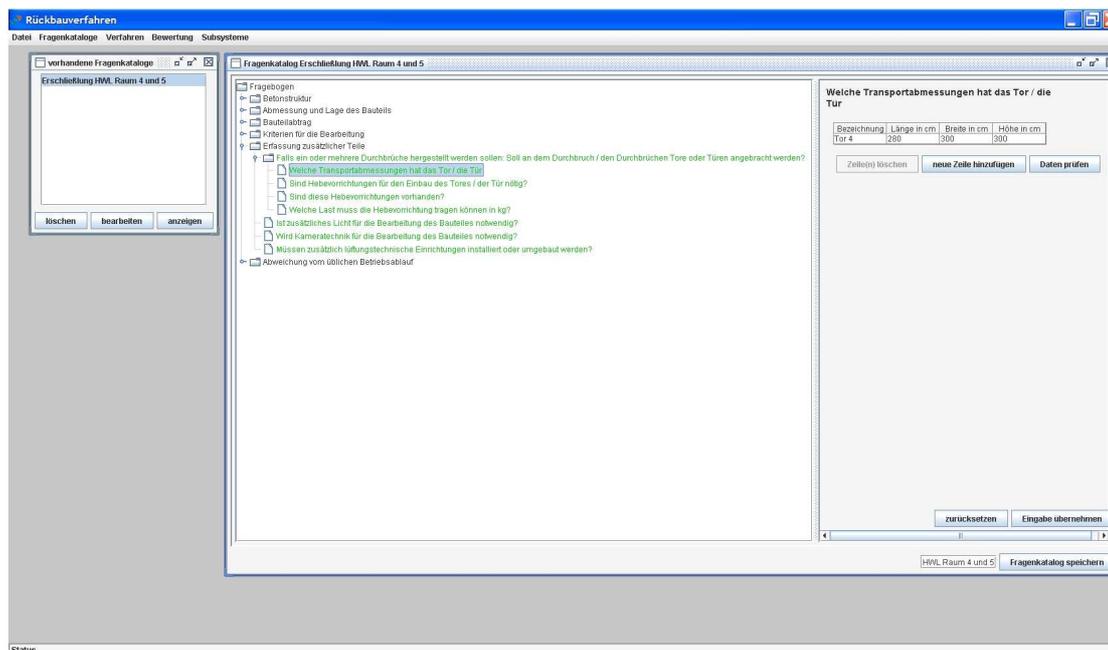


Abbildung A.7: Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Erfassung zusätzlicher Teile“

6. Müssen zusätzlich lüftungstechnische Einrichtungen installiert oder umgebaut werden?
ja / nein²²

A.5 Kriterien für die Bearbeitung

1. Soll das zu bearbeitende Bauteil fernbedient rückgebaut werden?
 - Das Bauteil soll nicht fernbedient bearbeitet werden
 - Das Bauteil soll semi-fernbedient bearbeitet werden
 - Das Bauteil soll ausschließlich fernbedient bearbeitet werden
2. Soll das Bauteil zunächst von der aktivierten Seite aus bearbeitet werden?
ja / nein²³
3. Sollen Abschirmmaßnahmen getroffen werden? ja / nein²⁴
4. Sollen im Umfeld des zu bearbeitenden Bauteils Kontaminationsschutzmaßnahmen getroffen werden? ja / nein²⁵

²²vgl. Eingabemaske der Tabelle 6.9 auf Seite 60

²³Diese Frage wird nur gestellt, wenn die Frage „Ist das Bauteil aktiviert“ (Seite 159) mit ja und die Frage „Soll das zu bearbeitende Bauteil fernhantiert rückgebaut werden?“ mit semi-fernbedient oder fernbedient beantwortet wurde.

²⁴Falls Abschirmmaßnahmen getroffen werden sollen, kann der Systemnutzer die unterschiedlichen Abschirmmöglichkeiten aus den Subsystemen auswählen.

²⁵Falls Kontaminationsschutzmaßnahmen getroffen werden sollen, kann der Systemnutzer die unterschiedlichen Kontaminationsschutzmaßnahmen aus den Subsystemen auswählen.

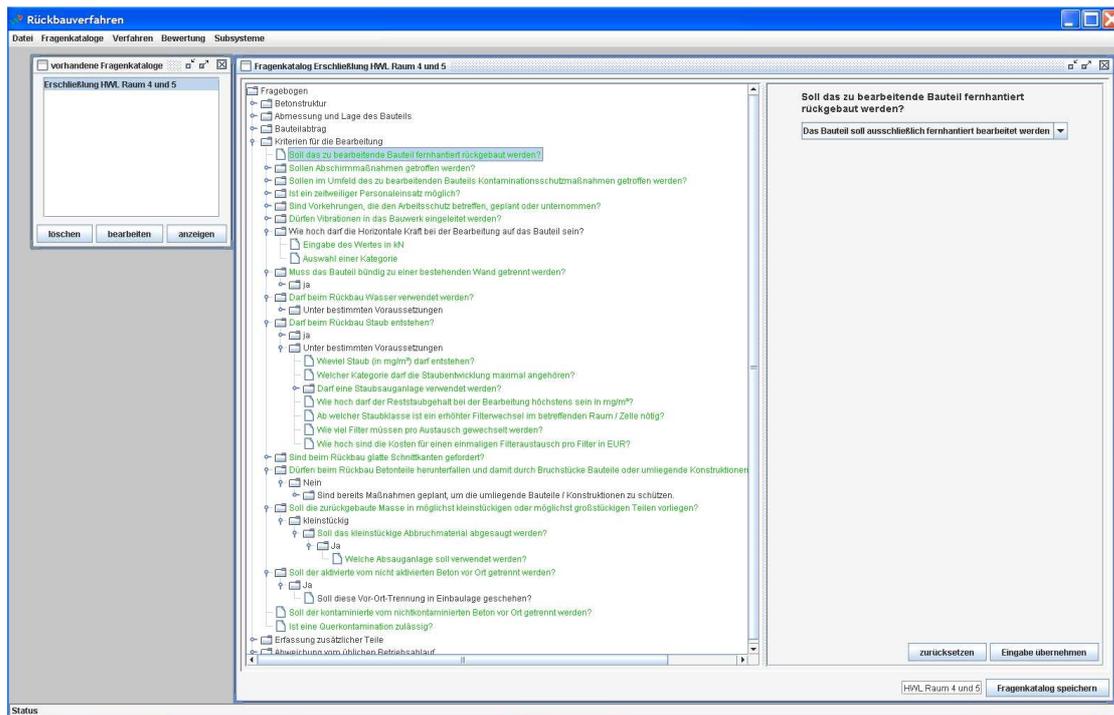


Abbildung A.8: Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Kriterien für die Bearbeitung“

5. Ist ein zeitweiliger Personaleinsatz möglich? ja / nein

Bei *ja* ergibt sich die Frage:

6. Für welche Tätigkeiten wird ein Personaleinsatz beabsichtigt?

- Für Ein- und Ausschleusvorgänge des Materials:

Zeit für einen Schleusvorgang: ... Minuten

Anzahl der Personen: ... Personen

- Zur Behebung kleinerer Ablaufstörungen durch Verschleißteilersatz:

ja / nein²⁶

- Zur Behebung von Havarien im Sinne von Rückbaugerätedefekten

Dauer für diese Tätigkeit: ... Minuten

Anzahl der Personen: ... Personen

- Für kurzzeitige sonstige Arbeiten

Kalkulierte Anzahl der kurzzeitigen sonstigen Arbeiten ... Stück

Dauer für diese Tätigkeit: ... Minuten

Anzahl der Personen: ... Personen

7. Sind Vorkehrungen, die den Arbeitsschutz betreffen, geplant oder unternommen?²⁷

²⁶Der Verschleißteilersatz ist Geräteabhängig. Aus diesem Grund wird die Frage benötigt, um festzustellen, ob ein Verschleißteilersatz vor Ort durchgeführt werden kann.

²⁷Arbeitsschutzmaßnahmen gehören zu den Subsystemen. Der Systemnutzer kann dort die für das Projekt geeignete Arbeitsschutzmaßnahme auswählen.

- ja, geplant
- ja, unternommen
- nein, nicht erforderlich
- nein, muss noch geplant werden

8. Dürfen beim Rückbau Betonteile herunterfallen und damit durch Bruchstücke Bauteile oder umliegende Konstruktionen geschädigt werden?

- ja
- Nein, umliegende Bauteile und Konstruktionen müssen geschützt werden
*Bei **nein** ergibt sich die Aufforderung:*
Wählen Sie bitte eine geeignete Bauteilschutzmaßnahme aus den Subsystemen aus oder fügen Sie eine geeignete Maßnahme bei den Subsystemen ein.

9. Dürfen Vibrationen bzw. eine Stoßbelastung in das Bauwerk eingeleitet werden?

- ja, unbegrenzt
- ja, bis zu einem bestimmten Grad
- Nein

*Bei **ja** ergibt sich die Frage:*

Welcher Kategorie darf die Stoßbelastung höchstens angehören?²⁸

Kategorie

10. Muss das Bauteil bündig zu einer bestehenden Wand getrennt werden? ja / nein

11. Dürfen funkenerzeugende Arbeitsmethoden verwendet werden? ja / nein

12. Darf beim Rückbau Wasser verwendet werden?

- ja, unbegrenzt
- ja, unter bestimmten Voraussetzungen
- Nein

*Bei **unter bestimmten Voraussetzungen** ergeben sich weitere Fragen:*

(a) Ist die maximale Menge des beim Rückbau notwendigen Prozesswassers begrenzt? ja / nein

*Bei **ja** folgt die Frage:*

Wie viel m^3 Wasser dürfen höchstens für den Rückbau des Bauteils verwendet werden?

... m^3

²⁸vgl. Eingabemaske der Tabelle 6.5 auf Seite 52.

- (b) Soll das Wasser aufgefangen und einem Kreislauf zugeführt werden?
ja / nein²⁹

13. Darf beim Rückbau Staub entstehen?

- ja, unbegrenzt
- ja, bedingt
- Nein

Bei **bedingter** Staubentstehung ergibt sich die Frage:

- (a) Welcher Kategorie darf die Staubbelastung angehören?³⁰
Kategorie
- (b) Darf eine Staubsaugeanlage verwendet werden? ja / nein³¹
Bei **ja** ergeben sich weitere Fragen:
- (c) Wie hoch darf der Reststaubgehalt bei der Bearbeitung höchstens sein?³²
...mg/m³
- (d) Erhöhter Filterwechsel
- i. Ab welcher Staubklasse ist ein erhöhter Filterwechsel im betreffenden Raum / Zelle nötig?
Klasse
 - ii. Wie viel Filter müssen pro Austausch gewechselt werden?
Anzahl der Filter: ...
 - iii. Wie hoch sind die Kosten für einen einmaligen Filteraustausch pro Filter?
Kosten für einmaligen Filtertausch: ...

14. Sind beim Rückbau glatte Schnittkanten gefordert? ja/nein

Bei **ja** ergeben sich weitere Fragen:

- (a) Bis zu welcher Tiefe in das Bauwerk sind diese Kanten erforderlich?
... cm
- (b) Sollen glatte Schnittkanten beiderseits des Bauteils entstehen?
ja / nein
- (c) Sind Überschnitte erlaubt?
ja / nein

15. Soll die zurückgebaute Masse in möglichst kleinstückigen oder möglichst großstückigen Teilen vorliegen?
kleinstückiges Material

²⁹Falls bei dieser Frage ja angegeben wurde, kann der Systemnutzer in den Subsystemen aus einer Auswahl unterschiedlicher Wasserauffangvorrichtungen die für das Projekt geeignete auswählen.

³⁰vgl. Eingabemaske der Tabelle 6.6 auf Seite 54.

³¹Der Systemnutzer kann die unterschiedlichen Staubsaugeanlagen in den Subsystemen auswählen.

³²Hier wird geprüft, ob die ausgewählte Sauganlage diesen Wert erfüllt! Falls nicht, wird der Systemnutzer darauf hingewiesen, so dass er sich eine neue Anlage aussuchen kann.

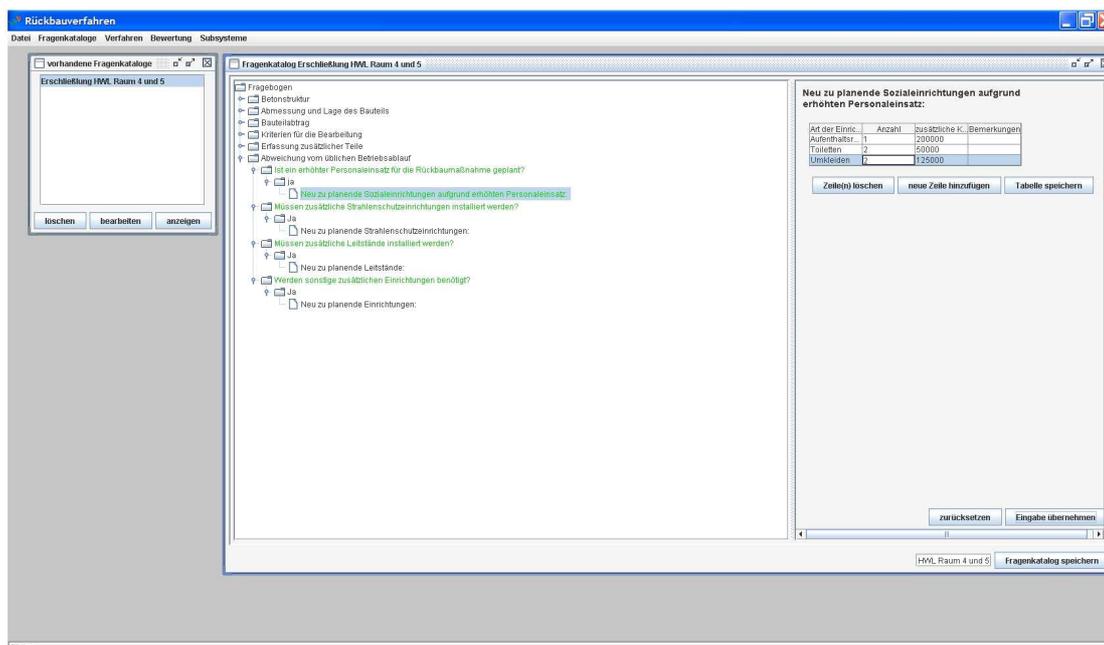


Abbildung A.9: Softwaretechnischer Abfragegang des Fragekomplexes „Abweichungen vom üblichen Betriebsablauf“

großstückiges Material³³

Bei der Antwort *kleinstückiges Material* ergibt sich die Frage:

Soll das kleinstückige Abbruchmaterial abgesaugt werden?

ja / nein³⁴

16. Soll der aktivierte vom nicht aktivierten Beton vor Ort getrennt werden?³⁵

ja / nein

Bei *ja* ergibt sich die Frage:

(a) Soll diese Vor-Ort-Trennung in Einbaulage geschehen? ja / nein

17. Soll der kontaminierte vom nicht kontaminierten Beton vor Ort getrennt werden?³⁶

18. Ist eine Querkontamination zulässig? ja / nein

A.6 Abweichungen vom üblichen Betriebsablauf

1. Ist ein erhöhter Personaleinsatz für die Rückbaumaßnahme geplant?

ja / nein

Bei *ja* ergibt sich die Frage:

³³Diese Frage dient dazu, bei der Auswahl der Verfahren eine Präferenz der Nutzer festzulegen.

³⁴Wenn das Material abgesaugt werden soll (nur wenn ein Verfahren zur Anwendung kommen kann, das überhaupt kleinstückiges Abbruchmaterial erzeugt) kann hier der Systemnutzer in den Subsystemen eine geeignete Absauganlage für Betonbruchstücke und Staub auswählen.

³⁵Diese und die weitere Frage wird nur gestellt, wenn die Frage „Ist das Bauteil aktiviert“ auf Seite 159 mit ja beantwortet wurde.

³⁶Diese Frage wird nur gestellt, wenn Frage „Ist das Bauteil kontaminiert“ auf Seite 159 mit ja beantwortet wurde.

- (a) Müssen hierfür neue Sozialeinrichtungen geplant und gebaut werden?

ja / nein

Bei **ja** wird die nachfolgende Eingabemaske verwendet:

Neu zu planende Sozialeinrichtungen aufgrund erhöhten Personaleinsatzes

Art der Einrichtung	Anzahl	Kosten [Euro]
Toiletten	$n_{Toilette}$	$K_{Toilette}$
Umkleiden	$n_{Umkleiden}$	$K_{Umkleiden}$
Aufenthaltsräume	$n_{ARaeume}$	$K_{ARaeume}$

2. Müssen zusätzliche Strahlenschutzeinrichtungen installiert werden?

ja / nein

Bei **ja** wird die nachfolgende Eingabemaske verwendet:

Neu zu planende Strahlenschutzeinrichtungen

Art der Einrichtung	Anzahl	Kosten [Euro]
Art1	n_{Art1}	K_{Art1}

3. Müssen zusätzliche Leitstände installiert werden? ja / nein

Bei **ja** wird die nachfolgende Eingabemaske verwendet:

Neu zu planende Leitstände

Leitstandsbezeichnung	Kosten [Euro]
Leitstand1	K_{Leit1}

4. Werden sonstige zusätzliche Einrichtungen benötigt? ja / nein

Bei **ja** wird die nachfolgende Eingabemaske verwendet:

Neu zu planende zusätzliche Einrichtungen

Art der Einrichtung	Anzahl	Kosten [Euro]
Einrichtung1	n_{Ein1}	K_{Ein1}

A.7 Rückbauziele

Welchen Rückbauzielen soll welche Prioritäten eingeräumt werden?

Minimierung von		Priorität	
Kosten	hoch	mittel	niedrig
Zeit	hoch	mittel	niedrig
Abfall	hoch	mittel	niedrig
Kollektivdosis	hoch	mittel	niedrig

Modifikationen an den Rückbaugerätschaften

Die folgenden Bilder beziehen sich auf die Arbeiten im Forschungszentrum Karlsruhe und in der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe. Sie zeigen die Rückbauwerkzeuge, die beim Rückbau dieser kerntechnischen Anlagen angewandt wurden und werden.

Bild B.1 zeigt einen hydraulischen Trennschleifer, der an einen fernbedienbaren Bagger angebracht werden kann. Die Hydraulikversorgung erfolgt direkt über die Baggerhydraulik.

Bild B.2 zeigt eine Baggeranbaufräse, an welche eine Staubabsaugung angebracht wurde. Der hydraulische Antrieb der Baggeranbaufräse erfolgt mit einer Schnellkupplung über den Bagger.

Ein Dickblechnibbler (vgl. Abbildung B.3) kann zum Trennen von plattenförmigen und gebogenen Werkstücken aus stanzfähigem Material eingesetzt werden. Der Nibbler kann dabei gerade und kurvenförmige Aussenkanten und Innenausschnitte stanzen. Der in Abbildung B.3 gezeigte Nibbler kann fernbedienbar eingesetzt werden und wird über die Baggerhydraulik versorgt.

Zur Dekontamination kann z.B. ein Shaversystem, welches an einen Stapler angebracht werden kann, verwendet werden (vgl. Abbildung B.4). Der anfallende Staub ist dabei über eine Staubabsauganlage abzuführen.

Am Manipulator geführte Kleinwerkzeuge sind auf den Abbildungen B.5, B.6 zu sehen. Diese Werkzeuge werden vom Manipulatorarm gehalten, welcher wiederum am Baggerausleger über eine Schnellkupplung befestigt ist.

Die Werkzeugablage dieser Geräte erfolgt auf einer integrierten Ablage, welche am Baggerunterwagen angebracht ist (vgl. Abbildung B.7).

Bild B.8 zeigt eine umgebaute Kreissäge, die fernbedient eingesetzt werden kann. Die Hydraulikversorgung wird über die Hydraulik und eine Schnellkupplung gewährleistet.

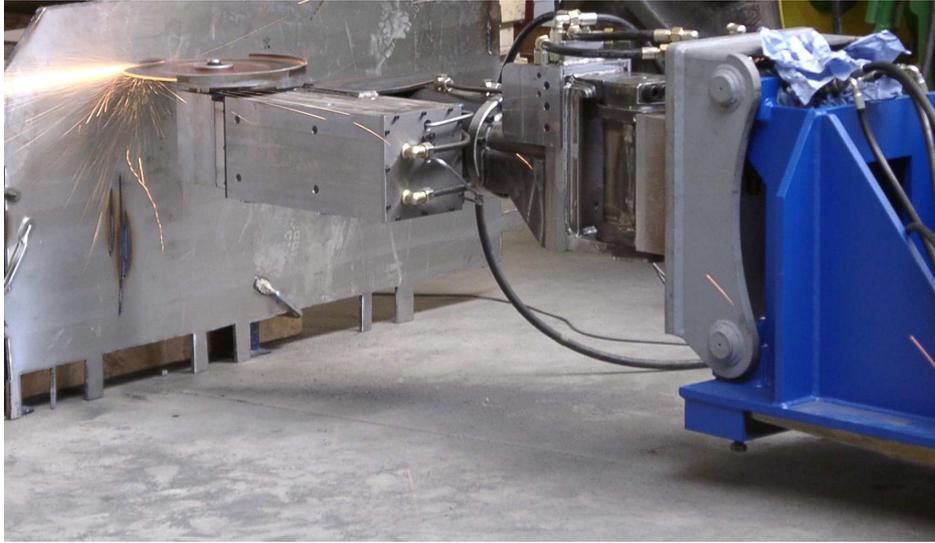


Abbildung B.1: Hydraulischer Trennschleifer (WAK)



Abbildung B.2: Fräsen mit Baggeranbaufräse inklusive Staubabsaugung (WAK)



Abbildung B.3: Fernbedienbarer Bagger mit Nibbler (WAK)



Abbildung B.4: Wandshaver mit Absaugung am Stapler (WAK)



Abbildung B.5: Trennschleifer elektrisch geführt mit Manipulator (WAK)

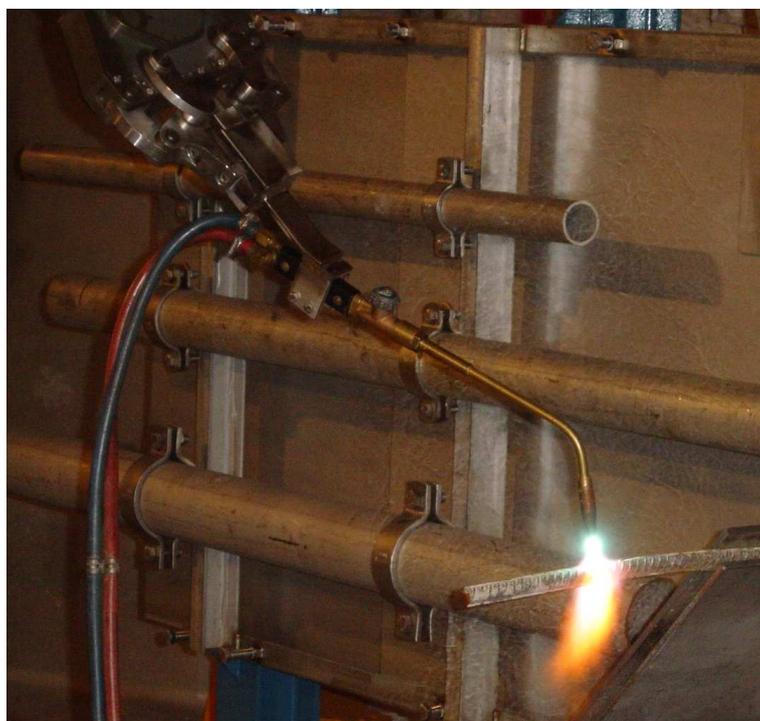


Abbildung B.6: Plasmabrenner geführt mit Manipulator (WAK)

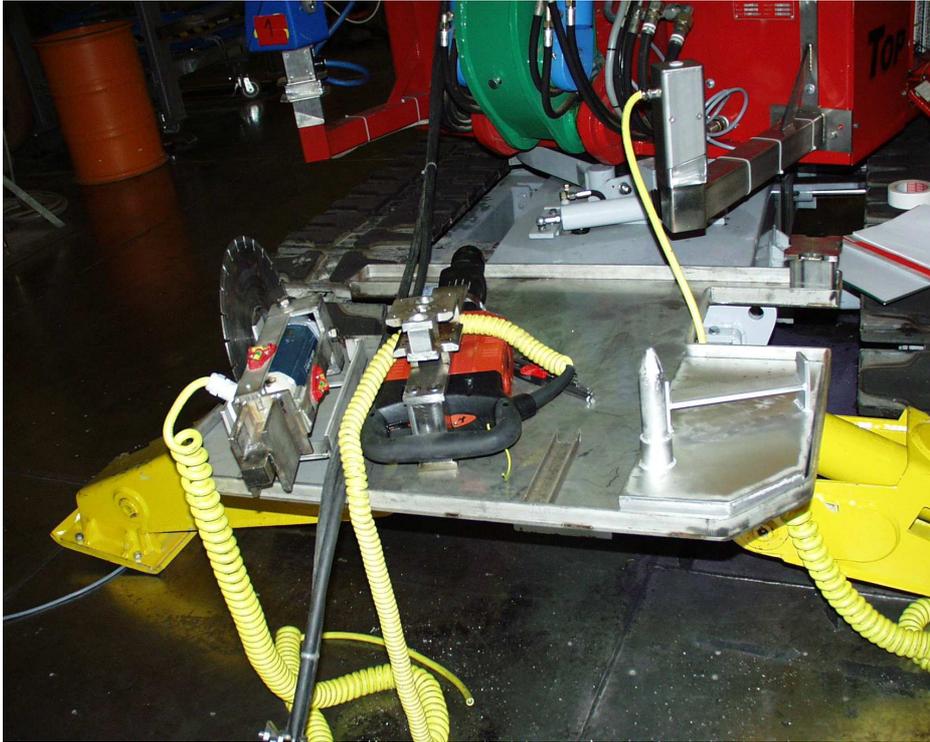


Abbildung B.7: Integrierte Werkzeugablage der Fernhandlungswerkzeuge am Bagger (WAK)

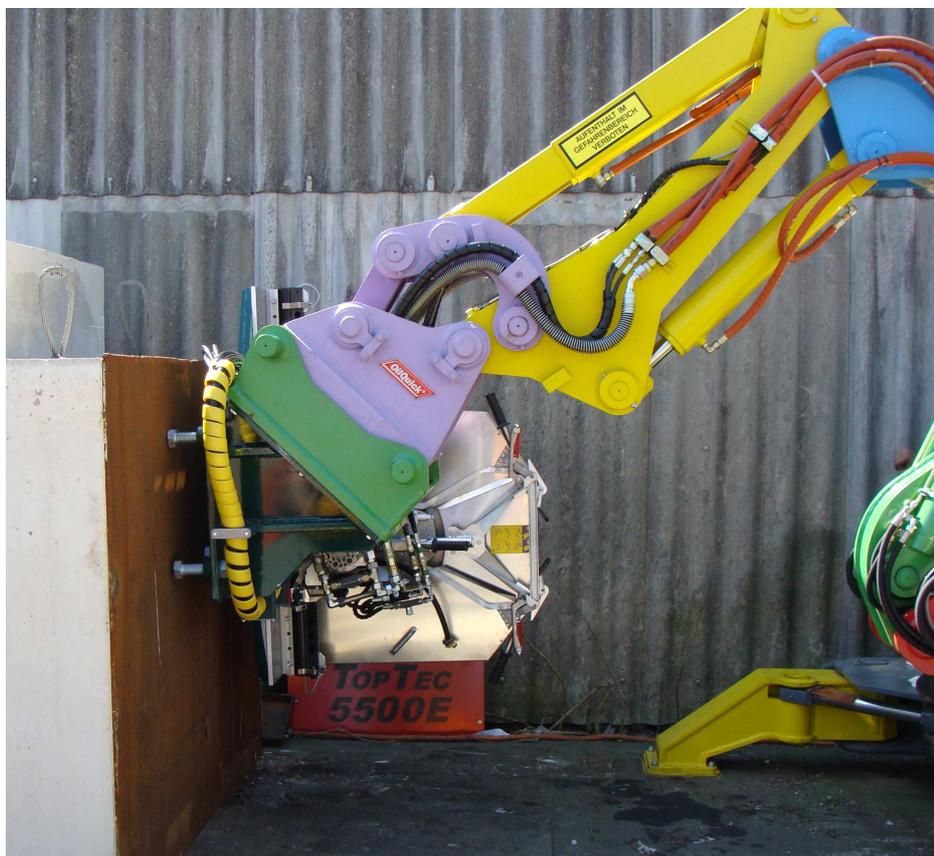


Abbildung B.8: Kreissäge als Fernhandlungswerkzeug am Bagger (MZFR, TopTec)

Berechnung zur Bestimmung der Förderleistung bei Absaugsystemen für Beton und Staub

Die folgenden Angaben beziehen sich auf den Abschlussbericht des von der DFG geförderten Forschungsprojektes „Untersuchung und Optimierung der Förderleistung von Saugbaggern“ ((Gehbauer und Heppler, 2000)) und der Dissertation „Weiterentwicklung von Standardbaumaschinen zur Rettung Verschütteter“ ((Gentes, 2003)). Mit der Berechnungsmethodik ist es möglich, die Förderleistung von Sauganlagen zu dimensionieren. Dazu wird zunächst der erforderliche Förderleitungsdurchmesser und im Anschluss daran die Druckverluste der Förderleitung und des Abscheidebehälters bestimmt.

Die Untersuchungen des Forschungsprojektes ergaben, dass für die strömungstechnische Auslegung, um auf der sicheren Seite zu liegen, c_W -Werte von 0,36 für runde, glatte Körner und bis 0,6 für rauhe, kantige Körner zu wählen sind. Da beim Betonrückbau mit jedem Verfahren, das ein kleinstückiges Abbruchmaterial erzeugt, rauhes und kantiges Abbruchmaterial anfällt, könnte prinzipiell ein c_W -Wert von 0,6 gewählt werden. Es wird hier jedoch ein konservativerer Ansatz für den c_W -Wert von 0,4 gewählt.

C.1 Angaben zur Dimensionierung

Zur Dimensionierung der Anlage müssen folgende Angaben gemacht werden:

- Länge der Förderleitung L in m
- Höhendifferenz H in m
- Maximaler Luftdurchsatz \dot{V}_{Lo} in m^3/s
- Materialdichte ρ_{Gut} in kg/m^3
- Maximale Korngröße d_{Gut}

C.2 Berechnung des Förderleitungsdurchmessers

Zur Ermittlung des Förderleitungsdurchmessers wird zunächst die Mindestluftgeschwindigkeit im Förderrohr bestimmt. Nach Siegel (1991) und Weber (1974) sollte die Mindestluftgeschwindigkeit im Förderrohr

$$v_{min} = 1,2 - 1,4 * v_{sch} \quad (C.1)$$

betragen. Die Schwebgeschwindigkeit des Einzelkorns v_{sch} lässt sich mit folgender Formel ermitteln:

$$v_{sch} = \sqrt{\frac{4 * g * d_{Gut} * (\rho_{Gut} - \rho_{Luft})}{3 * c_W * \rho_{Luft}}} \quad (C.2)$$

mit

g	Erdbeschleunigung = 9,81 m/s^2
d_{Gut}	Korndurchmesser
ρ_{Gut}	Dichte des Fördergutes
ρ_{Luft}	Dichte der Förderluft = 1,22 kg/m^3
c_W	spezifischer Luftwiderstandsbeiwert hier gewählt = 0,4

Mit dem Luftvolumenstrom \dot{V}_{Lo} und der Mindestluftgeschwindigkeit v_{min} lässt sich der erforderliche Querschnitt des Förderrohrs A_{erf} und daraus der Durchmesser des Förderrohrs D_{erf} ermitteln.

$$A_{erf} = \frac{\dot{V}_{Lo}}{v_{min}} \Rightarrow D_{erf} = \sqrt{\frac{4 * A_{erf}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * \dot{V}_{Lo}}{\pi * v_{min}}} \quad (C.3)$$

C.3 Druckverlust Förderleitung

Der Druckverlust Δp in einer pneumatischen Förderstrecke, vom Saugmund bis zum Abscheidetank, lässt sich aus den Komponenten Beschleunigung, Hub und Reibung zusammensetzen.

$$\Delta p = \Delta p_B + \Delta p_H + \Delta p_R \quad (C.4)$$

Der Beschleunigungsdruckverlust der Gesamtströmung von Ruhe bis zur Endgeschwindigkeit ergibt sich nach

$$\Delta p_B = (1 + \mu) * \rho_{Luft} * v_{min}^2 * \frac{p_{Atm}}{p_T} \quad (C.5)$$

mit

μ	Beladung
p_{Atm}	Atmosphärendruck hier gewählt = 1 bar

p_T Druck im Abscheidetank
hier gewählt = 0,89 bar

Die Versuche von Gentes (2003) ergaben einen Unterdruckbereich von 0,89 bis 0,93 bar und eine Beladung von ca. 1. Die Beladung μ entspricht dem Quotienten des Gutmassenstroms zum Luftmassenstrom. Somit lässt sich der Gutmassenstrom als Funktion der Beladung und des Luftmassenstroms darstellen.

$$\dot{m}_{Gut} = \mu * \dot{m}_{Luft} \Rightarrow \dot{m}_{Gut} = 1 * \dot{V}_{Lo} * \rho_{Luft} \quad (C.6)$$

Der Druckverlust durch die vertikale Hubleistung der Strömung am Feststoff ergibt sich aus

$$\Delta p_H = \frac{H * g * \dot{m}_{Gut}}{A * (v_{min} - v_{sch})} = \frac{H * g * \dot{V}_{Lo} * \rho_{Luft}}{A * (v_{min} - v_{sch})} \quad (C.7)$$

Der Reibungsdruckverlust der Gesamtströmung längs eines Wegeelements dL kann als Funktion der örtlichen Geschwindigkeit v_{min} , der örtlichen Dichte ρ_{Luft} und des Druckverlustbeiwertes λ_{ges} beschrieben werden.

$$\Delta p_R = \lambda_{ges} * L * \frac{\rho_{Luft}}{2} * \frac{v_{min}^2}{D} \quad (C.8)$$

Der Druckverlustbeiwert λ_{ges} kann durch einen Potenzproduktansatz ermittelt werden:

$$\lambda_{ges} = \kappa * \mu^\alpha * Re^\beta * Fr^\gamma * \left(\frac{v_{sch}}{v_{min}}\right)^\delta * (\cos \varphi)^\epsilon \quad (C.9)$$

Nach den Versuchen und Berechnungen von Gentes (2003) und den Angaben von Siegel (1991) kann $\lambda_{ges} = 0,02$ mit hinreichender Genauigkeit für alle pneumatischen Förderanlagen gesetzt werden.

Die Formel für den Druckverlust der Förderleitung lässt sich mit den oben gemachten Angaben wie folgt darstellen:

$$\Delta p = f(v_{min}, v_{sch}, \dot{V}_{Lo}, A, H, L, D) \quad (C.10)$$

$$\Delta p = 2 * 1,22kg/m^3 * v_{min}^2 * \frac{1}{0,89} + \frac{H * 9,81m/s^2 * \dot{V}_{Lo} * 1,22kg/m^3}{A * (v_{min} - v_{sch})} + 0,02 * L * \frac{1,22kg/m^3}{2} * \frac{v_{min}^2}{D} \quad (C.11)$$

C.4 Druckverlust im Abscheidebehälter und Feinfilter

Nach Löffler (1980) wird für den Druckverlust im Abscheidebehälter und im Feinfilter ein Zuschlag von 25mbar addiert.

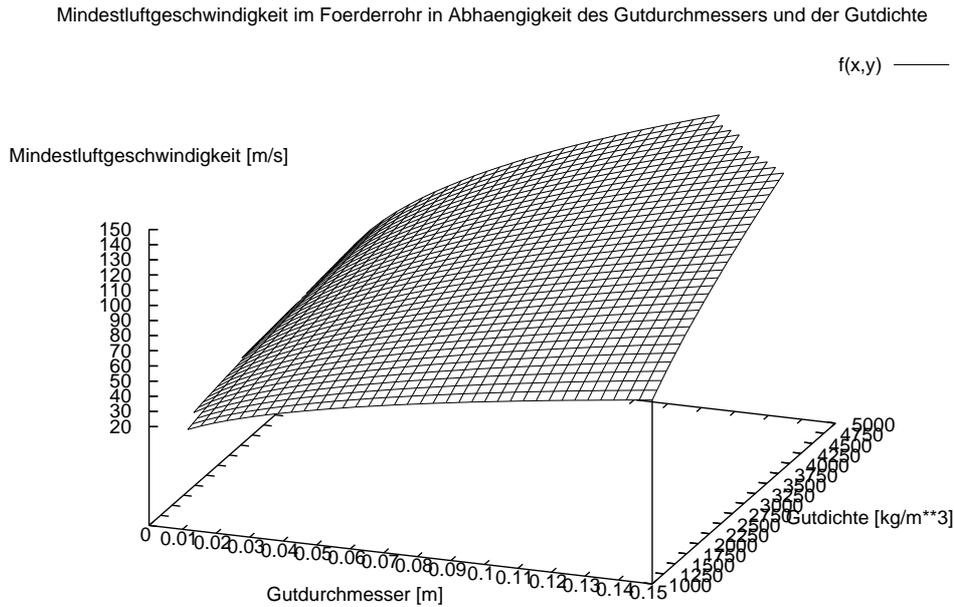


Abbildung C.1: Mindestluftgeschwindigkeit im Förderrohr in Abhängigkeit des Gutdurchmessers und der Gutdichte

C.5 Druckverlustverläufe in Abhängigkeit unterschiedlicher Volumenströme und Gutdurchmesser

Mit den oben gemachten hinreichenden Bedingungen lassen sich bei unterschiedlichen Volumenströmen und unterschiedlichen Gutdurchmessern die Druckverlustverläufe in Abhängigkeit der Förderhöhe und -länge darstellen.

Dazu werden zunächst die Geschwindigkeiten v_{min} und v_{sch} sowie der Förderrohrdurchmesser D in Abhängigkeit der Materialdichte ρ_{Gut} und des Gutdurchmessers d_{Gut} ermittelt.

Die nachfolgende Abbildung C.1 zeigt die erforderliche Geschwindigkeit v_{min} in Abhängigkeit des Gutdurchmessers d_{Gut} und der Materialdichte ρ_{Gut} .

Der erforderliche Rohrdurchmesser D_{erf} lässt sich in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms \dot{V}_{Lo} und der Mindestluftgeschwindigkeit v_{min} darstellen (vgl. Abbildung C.2).

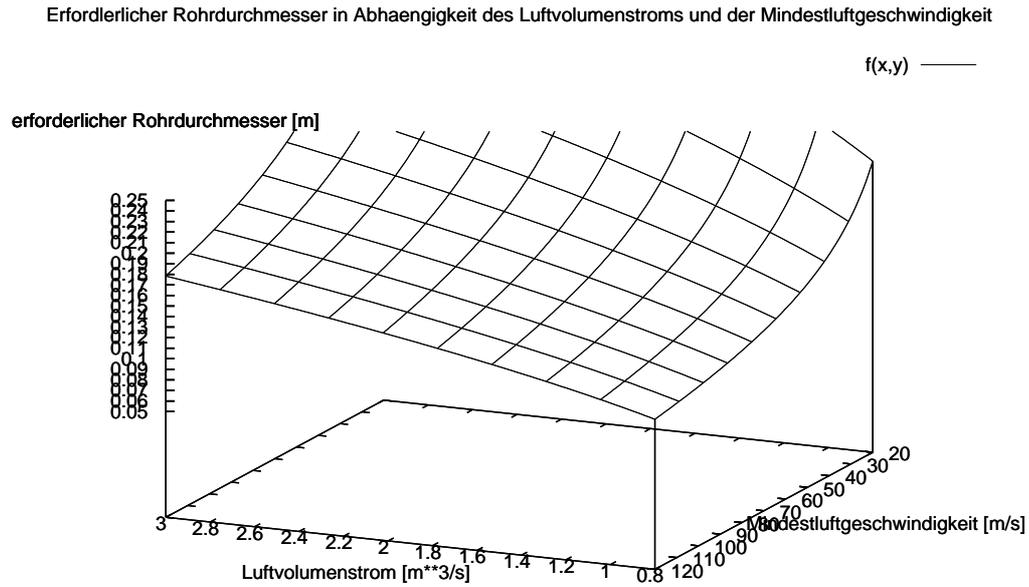


Abbildung C.2: Erforderlicher Rohrdurchmesser in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms und der Luftgeschwindigkeit

Der Arbeitspunkt des Gebläses der pneumatischen Förderanlage ergibt sich aus dem Luftvolumenstrom, dem Gesamtdruckverlust der Förderleitung (vgl. Formel C.11) zuzüglich des Druckverlustes im Abscheidebehälter und Feinfilter und kann, bei gegebenem Luftvolumenstrom und dem damit verbundenen Rohrdurchmesser und der Luftgeschwindigkeit, als Funktion der Hubhöhe H und der Länge der Förderleitung L dargestellt werden. Die Abbildung C.3 zeigt exemplarisch die genannten Zusammenhänge für Hubhöhen bis sechs Meter, Förderleitungslängen bis 20 Meter und einem Luftvolumenstrom von $5400\text{m}^3/\text{h}$, d.h. $1,5\text{m}^3/\text{s}$, bei einer Mindestluftgeschwindigkeit von $80\text{m}/\text{s}$.

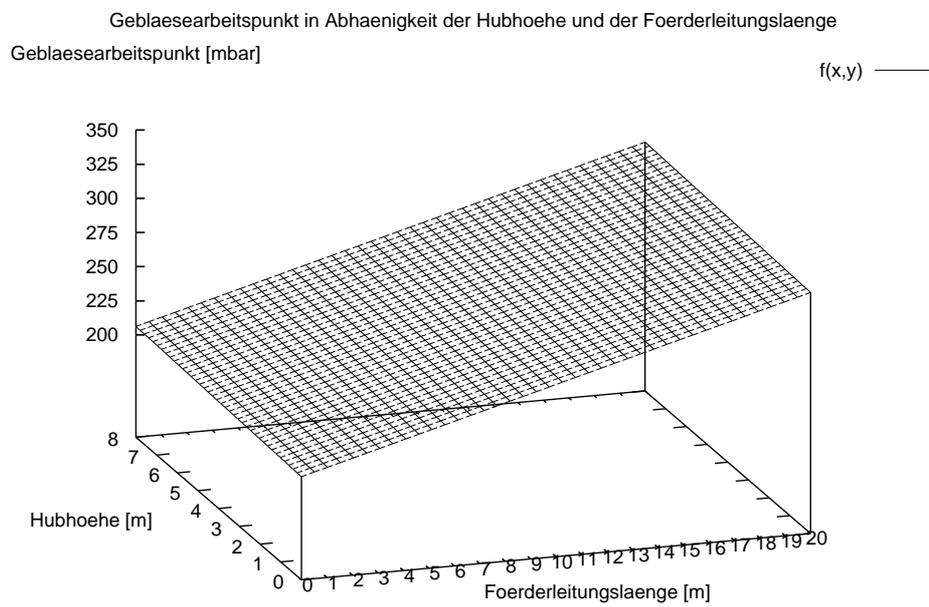


Abbildung C.3: Gebläsearbeitspunkt bei einem Luftvolumenstrom von $5400\text{m}^3/\text{h}$ in Abhängigkeit der Förderhöhe und der Rohrleitungslänge

Veröffentlichungen des Instituts für Technologie und
Management im Baubetrieb

Reihe F - Forschung

Heft 1	Hans PINNOW <i>Vergleichende Untersuchungen von Tiefbauprojekten in offener Bauweise</i>	1972
Heft 2	Heinrich MÜLLER <i>Rationalisierung des Stahlbetonbaus durch neue Schalverfahren und deren Optimierung beim Entwurf</i>	1972
Heft 3	Dieter KARLE <i>Einsatzdimensionierung langsam schlagender Rammhäre aufgrund von Rammsondierungen</i>	1972
Heft 4	Wilhelm REISMANN <i>Kostenerfassung im maschinellen Erdbau</i>	1973
Heft 5	Günther MALETON <i>Wechselwirkungen von Maschine und Fels beim Reißvorgang</i>	1973
Heft 6	Joachim HORNUNG <i>Verfahrenstechnische Analyse über den Ersatz schlagender Rammhäre durch die Anwendung lärmärmer Baumethoden</i>	1973
Heft 7	Thomas TRÜMPER/Jürgen WEID <i>Untersuchungen zur optimalen Gestaltung von Schneidköpfen bei Unterwasserbaggerungen</i>	1973
Heft 8	Georg OELRICHS <i>Die Vibrationsrammung mit einfacher Längsschwingwirkung - Untersuchungen über die Kraft- und Bewegungsgrößen des Systems Rammhäre plus Rammstück im Boden</i>	1974

- Heft 9 Peter BÖHMER 1974
Verdichtung bituminösen Mischgutes beim Einbau mit Fertigern
- Heft 10 Fritz GEHBAUER 1974
Stochastische Einflußgrößen für Transportsimulationen im Erdbau
- Heft 11 Emil MASSINGER 1976
Das rheologische Verhalten von lockeren Erdstoffgemischen
- Heft 12 Kawus SCHAYEGAN 1975
Einfluß von Bodenkonsistenz und Reifeninnendruck auf die fahrdynamischen Grundwerte von EM-Reifen
- Heft 13 Curt HEUMANN 1975
Dynamische Einflüsse bei der Schnittkraftbestimmung in standfesten Böden
- Heft 14 Hans-Josef KRÄMER 1976
Untersuchung der bearbeitungstechnischen Bodenkennwerte mit schwerem Ramm-Druck-Sondiergerät zur Beurteilung des Maschineneinsatzes im Erdbau
- Heft 15 Friedrich ULBRICHT 1977
Baggerkraft bei Eimerkettenschwimmbaggern - Untersuchungen zur Einsatzdimensionierung
- Heft 16 Bertold KETTERER 1977
Einfluß der Geschwindigkeit auf den Schneidvorgang in rolligen Böden
- Heft 17 Joachim HORNUNG/Thomas TRÜMPER 1977
Entwicklungstendenzen lärmarmen Tiefbauverfahren für den innerstädtischen Einsatz
- Heft 18 Joachim HORNUNG 1978
Geometrisch bedingte Einflüsse auf den Vorgang des maschinellen Reißens von Fels - untersucht an Modellen
- Heft 19 Thomas TRÜMPER 1978
Einsatzoptimierung von Tunnelvortriebsmaschinen
- Heft 20 Günther GUTH 1978
Optimierung von Bauverfahren - dargestellt an Beispielen aus dem Seehafenbau
- Heft 21 Klaus LAUFER 1978
Gesetzmäßigkeiten in der Mechanik des drehenden Bohrens im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein
- vergriffen -
- Heft 22 Urs BRUNNER 1979
Submarines Bauen - Entwicklung eines Bausystems für den Einsatz auf dem Meeresboden
- vergriffen -
- Heft 23 Volker SCHULER 1979
Drehendes Bohren in Lockergestein - Gesetzmäßigkeiten und Nutzanwendung
- vergriffen -

Heft 24	Christian BENOIT <i>Die Systemtechnik der Unterwasserbaustelle im Offshore-Bereich</i>	1980
Heft 25	Bernhard WÜST <i>Verbesserung der Umweltfreundlichkeit von Maschinen, insbesondere von Baumaschinen-Antrieben</i>	1980
Heft 26	Hans-Josef KRÄMER <i>Geräteseitige Einflußparameter bei Ramm- und Drucksondierungen und ihre Auswirkungen auf den Eindringwiderstand</i>	1981
Heft 27	Bertold KETTERER <i>Modelluntersuchungen zur Prognose von Schneid- und Planierkräften im Erdbau</i>	1981
Heft 28	Harald BEITZEL <i>Gesetzmäßigkeiten zur Optimierung von Betonmischern</i>	1981
Heft 29	Bernhard WÜST <i>Einfluß der Baustellenarbeit auf die Lebensdauer von Turmdrehkränen</i>	1982
Heft 30	Hans PINNOW <i>Einsatz großer Baumaschinen und bisher nicht erfaßter Sonderbauformen in lärmempfindlichen Gebieten</i>	1982
Heft 31	Walter BAUMGÄRTNER <i>Traktionsoptimierung von EM-Reifen in Abhängigkeit von Profilierung und Innendruck</i>	1982
Heft 32	Karlheinz HILLENBRAND <i>Wechselwirkung zwischen Beton und Vibration bei der Herstellung von Stahlbetonrohren im Gleitverfahren</i>	1983
Heft 33	Christian BENOIT <i>Ermittlung der Antriebsleistung bei Unterwasserschaufelrädern</i>	1985
Heft 34	Norbert WARDECKI <i>Strömungsverhalten im Boden-/Werkzeugsystem</i>	1986
Heft 35	Christian BENOIT <i>Meeresbergbau - Bestimmung der erforderlichen Antriebskraft von Unterwasserbaggern</i>	1986
Heft 36	Rolf Victor SCHMÖGER <i>Automatisierung des Füllvorgangs bei Scrapern</i>	1987
Heft 37	Alexander L. MAY <i>Analyse der dreidimensionalen Schnittverhältnissen beim Schaufelradbagger</i>	1987
Heft 38	Michael HELD <i>Hubschraubereinsatz im Baubetrieb</i>	1989
Heft 39	Gunter SCHLICK <i>Adhäsion im Boden-Werkzeug-System</i>	1989

Heft 40	Franz SAUTER <i>Optimierungskriterien für das Unterwasserschaukelrad (UWS) mittels Modellsimulation</i> - vergriffen -	1991
Heft 41	Stefan BERETITSCH <i>Kräftepiel im System Schneidwerkzeug-Boden</i>	1992
Heft 42	Heinrich SCHLICK <i>Belastungs- und Fließverhältnisse in Silos mit zentralen Einbauten und Räumarmaustrag</i>	1994
Heft 43	Günther DÖRFLER <i>Untersuchungen der Fahrwerksbodeninteraktion zur Gestaltung von Raupenfahrzeugen für die Befahrung weicher Tiefseeböden</i>	1995
Heft 44	Axel OLEFF <i>Auslegung von Stellelementen für Schwingungserregerzellen mit geregelter Parameterverstellung und adaptive Regelungskonzepte für den Vibrationsrammprozeß</i>	1996
Heft 45	Kunibert LENNERTS <i>Stand der Forschung auf den Gebieten der Facility- und Baustellen-Layoutplanung</i>	1997
Heft 46	Kunibert LENNERTS <i>Ein hybrides, objektorientiertes System zur Planung optimierter Baustellen-Layouts</i>	1997
Heft 47	Uwe RICKERS <i>Modellbasiertes Ressourcenmanagement für die Rettungsphase in Erdbebengebieten</i>	1998
Heft 48	Ulrich-Peter REHM <i>Ermittlung des Antriebsdrehmomentes von Räumarmen in Silos mit Einbaukörper und kohäsivem Schüttgut</i>	1998
Heft 49	Dirk REUSCH <i>Modellierung, Parameterschätzung und automatische Regelung mit Erschütterungsbegrenzung für das langsame Vibrationsrammen</i>	2001
Heft 50	Franz DIEMAND <i>Strategisches und operatives Controlling im Bauunternehmen</i>	2001
Heft 51	Karsten SCHÖNBERGER <i>Entwicklung eines Workflow-Management-Systems zur Steuerung von Bauprozessen in Handwerkkernetzwerken</i>	2002
Heft 52	Christian MEYSENBURG <i>Ermittlung von Grundlagen für das Controlling in öffentlichen Bauverwaltungen</i>	2002
Heft 53	Matthias BURCHARD <i>Grundlagen der Wettbewerbsvorteile globaler Baumärkte und Entwicklung eines Marketing Decision Support Systems (MDSS) zur Unternehmensplanung</i>	2002

Heft 54	Jaroslav JURASZ <i>Geometric Modelling for Computer Integrated Road Construction (Geometrische Modellierung für den rechnerintegrierten Straßenbau)</i>	2003
Heft 55	Sascha GENTES <i>Optimierung von Standardbaumaschinen zur Rettung Verschütteter</i>	2003
Heft 56	Gerhard W. SCHMIDT <i>Informationsmanagement und Transformationsaufwand im Gebäudemangement</i>	2003
Heft 57	Karl-Ludwig KLEY <i>Positionierungslösung für Straßenwalzen - Grundlage für eine kontinuierliche Qualitätskontrolle und Dokumentation der Verdichtungsarbeit im Asphaltbau</i>	2004
Heft 58	Jochen WENDEBAUM <i>Nutzung der Kerntemperaturvorhersage zur Verdichtung von Asphaltmischgut im Straßenbau</i>	2004
Heft 59	Frank FIEDRICH <i>Ein High-Level-Architecture-basiertes Multiagentensystem zur Ressourcenoptimierung nach Starkbeben</i>	2004
Heft 60	Joachim DEDEKE <i>Rechnergestützte Simulation von Bauproduktionsprozessen zur Optimierung, Bewertung und Steuerung von Bauplanung und Bauausführung</i>	2005
Heft 61	Michael OTT <i>Fertigungssystem Baustelle - Ein Kennzahlensystem zur Analyse und Bewertung der Produktivität von Prozessen</i>	2007
Heft 62	Jochen ABEL <i>Ein produktorientiertes Verrechnungssystem für Leistungen des Facility Management im Krankenhaus</i>	2007
Heft 63	Jürgen KIRSCH <i>Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme</i>	2008
Heft 64	Marco ZEIHNER <i>Ein Entscheidungsunterstützungsmodell für den Rückbau massiver Betonstrukturen in kerntechnischen Anlagen</i>	2009

Karlsruher Reihe Bauwirtschaft, Immobilien und Facility Management

- Heft 1 Jochen ABEL 2007
Ein produktorientiertes Verrechnungssystem für Leistungen des Facility Management im Krankenhaus
- Heft 2 Carolin BAHR 2008
Realdatenanalyse zum Instandhaltungsaufwand öffentlicher Hochbauten - Ein Beitrag zur Budgetierung
ISBN: 978-3-86644-303-7
ISSN: 1867-5867, Universitätsverlag Karlsruhe

Sonderhefte Reihe F - Forschung

Heft 1	Vorträge anlässlich der Tagung <i>Forschung für den Baubetrieb</i> am 15. und 16. Juni 1972	1972
Heft 2	Vorträge anlässlich der Tagung <i>Forschung für den Baubetrieb</i> am 11. und 12. Juni 1974	1974
Heft 3	Vorträge anlässlich der Tagung <i>Forschung für den Baubetrieb</i> am 12. und 13. Juni 1979	1979
Heft 4	Vorträge anlässlich der Tagung <i>Forschung für die Praxis</i> am 15. und 16. Juni 1983	1983
Heft 5	Vorträge anlässlich der Tagung <i>Baumaschinen für die Praxis</i> am 04. und 05. Juni 1987	1987
Heft 6	Vorträge anlässlich der Tagung <i>Forschung und Entwicklung für die maschinelle Bauausführung</i> am 26. Juni 1992 - vergriffen - Abschluss-symposium 2007 <i>Graduiertenkolleg "Naturkatastrophen"Verständnis, Vorsorge und</i> <i>Bewältigung von Naturkatastrophen</i> <i>Stefan Senitz</i>	1992

Reihe G - Gäste

Heft 1	Zbigniew KORZEN <i>Ähnlichkeitsbetrachtungen der Bodenbearbeitungsvorgänge</i>	1981
Heft 2	Yoshinori TAKADA <i>Untersuchung zur Abschätzung der Aufreißleistung von Reißraupen - Wechselwirkung von Maschine und Fels beim Reißen</i>	1983
Heft 3	Geza JANDY <i>Systemtechnik (Systems Engineering)</i> Günter KÜHN <i>Was ist die Systemtechnik, und was nutzt sie dem Bauingenieur?</i>	1986
Heft 4	Piotr DUDZINSKI <i>Konstruktionsmerkmale bei Lenksystemen an mobilen Erdbaumaschinen mit Reifenfahrwerken</i>	1987
Heft 5	Yoshitaka OJIRO <i>Impact-Reißen - Untersuchungen über die Optimierung der Betriebsparameter mit Hilfe der Modellsimulation</i>	1988

Reihe L - Lehre und Allgemeines

Heft 1	Günter KÜHN <i>Baubetrieb in Karlsruhe</i> - vergriffen -	1972
Heft 2	Dieter KARLE <i>Afrika-Exkursion Gabun - Kamerun</i> - vergriffen -	1971
Heft 3	Gabriele und Uwe GRIESBACH <i>Studenten berichten: 52.00 km Afrika - Asien</i>	1975
Heft 4	Günter KÜHN <i>Letzte Fragen und ihre Antworten - auch für das Leben auf der Baustelle</i> - vergriffen-	1976
Heft 5	Festschrift 1967 - 1977 zum 10jährigen Bestehen des Instituts für Maschinenwesen im Baubetrieb	1977
Heft 6	Günter KÜHN <i>Baumaschinenforschung in Karlsruhe - Rückblick auf eine zehnjährige Institutstätigkeit</i>	1978
Heft 7	Günter KÜHN <i>Baubetriebsausbildung in Karlsruhe</i>	1979
Heft 8	Bertold KETTERER/Hans-Josef KRÄMER <i>Studenten-Exkursionen Saudi-Arabien 1978/1979</i>	1980
Heft 9	Hans-Josef KRÄMER <i>Baubetrieb - Studium und Berufserfahrung - Referate bei Seminaren für Bauingenieurstudenten</i>	1980
Heft 10	Christian BENOIT <i>Studenten-Exkursion Brasilien 1980</i>	1980
Heft 11	Christian BENOIT <i>Studenten-Exkursion Holland 1981</i>	1982
Heft 12	Günter KÜHN <i>Bauen mit Maschinen</i>	1983
Heft 13	Günter KÜHN <i>Aus dem Leben eines Bauleiters</i> - vergriffen -	1984
Heft 14	Günter KÜHN <i>Was ist die Systemtechnik, und was nutzt sie dem Bauingenieur</i>	1984
Heft 15	Günter KÜHN <i>Baumaschinenforschung am IMB 1967 - 1987</i>	1987
Heft 16	Franz FURGER <i>Ethik und Management</i>	1987

Wird künftig fortgesetzt in Reihe V.

Reihe U - Untersuchungen

Heft 1	Günter KÜHN <i>Monoblock- oder Verstellausleger?</i> - vergriffen -	1973
Heft 2	Roland HERR <i>Untersuchungen der Ladeleistung von Hydraulikbaggern im Feldeinsatz</i>	1974
Heft 3	Thomas TRÜMPER <i>Einsatzstudie hydraulischer Schaufelradbagger SH 400</i>	1975

Wird künftig fortgesetzt in Reihe F.

Reihe V - Vorlesungen und Mitteilungen

Heft 1	Heinrich MÜLLER <i>Management im Baubetrieb</i>	1974
Heft 2	Erwin RICKEN <i>Baubetriebswirtschaft B</i> - vergriffen -	1974
Heft 3	Thomas TRÜMPER <i>Elektrotechnik</i> - vergriffen -	1975
Heft 4	Albrecht GÖHRING <i>Zusammenfassung des Seminars Anorganische Chemie</i>	1975
Heft 5	Joachim HORNUNG <i>Netzplantechnik</i> - vergriffen -	1975
Heft 6	Günter KÜHN <i>Baubetriebstechnik I</i> Teil A: Baubetrieb Teil B: Hochbautechnik	1988
Heft 7	Günter KÜHN <i>Baubetriebstechnik II</i> Teil A: Tiefbau Teil B: Erdbau	1985
Heft 8	Bernhard WÜST <i>Maschinenteknik I</i>	1982
Heft 9	Norbert WARDECKI <i>Maschinenteknik II</i>	1983
Heft 10	Fritz HEINEMANN <i>Einführung in die Baubetriebswirtschaftslehre</i> - vergriffen -	1991
Heft 11	Fritz GEHBAUER <i>Wer soll die Zukunft gestalten, wenn nicht wir?</i>	1989
Heft 12	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 1989 Chile - Argentinien - Brasilien</i>	1989
Heft 13	Mitgliederverzeichnis - Gesellschaft der Freunde des Instituts	1996
Heft 14	<i>Das Institut</i>	1996
Heft 15	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 1990 Deutschland - Dänemark - Norwegen - Belgien</i>	1990
Heft 16	Fritz GEHBAUER <i>Baubetriebstechnik I</i> Teil A: Baubetrieb Teil B: Hochbau	1994

Heft 17	Fritz GEHBAUER <i>Baubetriebstechnik II</i> Teil A: Erdbau Teil B: Tiefbau	1991
Heft 18	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 1991 Deutschland - Polen</i>	1991
Heft 19	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 1992 Südostasien - Bangkok - Hongkong - Taipeh</i>	1992
Heft 20	Alfred WELTE <i>Naßbaggertechnik - Ein Sondergebiet des Baubetriebes</i> Ausgewählte Kapitel - nur noch 1 Exemplar -	2001
Heft 21	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 1993 Großbritannien</i>	1993
Heft 22	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 1994 Österreich</i>	1994
Heft 23	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 1995 Deutschland</i> - vergriffen -	1995
Heft 24	Die Studenten <i>Studentenexkursion 1996 Neue Bundesländer</i>	1996
Heft 25	Herbert FEGER <i>Betonbereitung</i> Teil 1 der Vorlesung <i>Betonbereitung und -transport</i>	1997
Heft 26	Herbert FEGER <i>Betontransport</i> Teil 2 der Vorlesung <i>Betonbereitung und -transport</i>	1997
Heft 27	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 1997 Deutschland - Tschechien</i>	1997
Heft 27	Fritz GEHBAUER <i>Baubetriebsplanung und Grundlagen der Verfahrenstechnik im Hoch-, Tief- und Erdbau Band I</i> Teil A: Baubetrieb Teil B: Hochbautechnik Teil C: Schlüsselfertigbau	2004
Heft 28	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 1998 Deutschland</i>	1998
Heft 28	Fritz GEHBAUER <i>Baubetriebsplanung und Grundlagen der Verfahrenstechnik im Hoch-, Tief- und Erdbau Band II</i> Teil A: Erdbau Teil B: Tiefbau	2004
Heft 29	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 1999 Deutschland - Schweiz - Frankreich</i>	1999

Heft 30	Fritz GEHBAUER <i>Baubetriebswirtschaftslehre</i> - vergriffen -	2001
Heft 31	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 2000</i> Deutschland - Rhein/Main - Ruhr	2000
Heft 32	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 2001</i> Goldisthal - Berlin - Hannover	2001
Heft 33	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 2002</i> Essen - Hamburg - Hannover	2002
Heft 34	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 2003</i> Zürich - Luzern - München	2003
Heft 35	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 2004</i> Köln - Hamburg - Hannover	2004
Heft 36	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 2005</i> Schweiz - Österreich - Deutschland	2005
Heft 37	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 2006</i> Innsbruck - Wien	2006
Heft 38	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 2007</i> Köln - Amsterdam	2007
Heft 39	Die Studenten <i>Studenten-Exkursion 2008</i> Dubai	2008