

---

# Aufbau eines Entscheidungshilfesystems zur Auswahl eines Spritzbetonverfahrens im Tunnelbau

---

## DEVELOPMENT OF A DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM FOR THE SELECTION OF A SPRAYED CONCRETE METHOD IN TUNNEL CONSTRUCTION

### GERALD GOGER

Bei der Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems für Spritzbetonverfahren im Tunnelbau soll es sich um eine benutzerfreundliche Softwareanwendung für den Tunnelbaupraktiker handeln, mit der die einzelnen Spritzbetonverfahren nach festgelegten Kriterien miteinander verglichen werden können.

Neben der Berücksichtigung projektspezifischer Randbedingungen werden die Verfahren hinsichtlich Baubetrieb, Baustelleneinrichtung, Betontechnologie, Sicherheit bzw. Gesundheitsschutz und Wirtschaftlichkeit analysiert. Dazu werden Flussdiagramme zur Beschreibung der baubetrieblichen Abläufe und Musterkalkulationen zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit herangezogen. Nicht monetär messbare Einflussparameter (z.B. die Flexibilität eines Verfahrens) fließen ebenfalls in das Bewertungsschema ein, um eine ganzheitliche Vergleichbarkeit der Verfahren zu gewährleisten.

Durch die strukturierte Vorgangsweise bei der Entscheidungsfindung sollen potentielle Fehlermöglichkeiten minimiert und die Überlegungen zur endgültigen Auswahl eines Verfahrens transparent dargestellt werden.

*In the development of a decision-making support system for shotcrete processes in tunnel construction, the target should be a user-friendly software application for the tunnel construction engineer. By means of this support system, in accordance with defined criteria, the various shotcrete processes can be compared with each other.*

*The analysis will take into account limiting parameters specific to a given project, as well as the various methods with reference to construction site management, the on-site facilities required, concrete technology and reliability, impact on occupational health and safety, and, last but not least, economic aspects. The program makes use of flow charts to demonstrate the logistics of construction site management, and of sample calculations for the estimation of economic factors. Other significant parameters that cannot be quantified in financial terms (such as the flexibility of a method, for instance) are likewise involved in the assessment scheme, guaranteeing that all factors will be taken into account when comparing the methods with each other.*

*Through the step-by-step decision finding process, potential mistakes are kept to a minimum, and considerations relevant to the final selection of a method are displayed in a way that is crystal-clear.*

## 1. Einleitung

Mit dem Ziel einer transparenten und lückenlos nachvollziehbaren Entscheidungsfindung bei der Auswahl eines geeigneten Spritzbetonverfahrens im Tunnel- bzw. Stollenbau soll ein Entscheidungshilfesystem entwickelt werden. Damit sollen potentielle Fehlermöglichkeiten vermieden und die einzelnen Verfahren nach festgelegten Kriterien hinsichtlich Baubetrieb, Baustelleneinrichtung, Betontechnologie, Sicherheit bzw. Gesundheitsschutz und Wirtschaftlichkeit bewertet werden.

Zunächst wird im Kapitel 2 der Begriff "Entscheidungshilfesystem" definiert und ein Überblick über die Zielsetzungen, die Struktur und die Anwendungsgebiete bzw. -grenzen solcher Systeme gegeben. Nach einer kurzen Übersicht über die "modernen" Spritzbetonverfahrenstechniken im Tunnel- und Stollenbau, werden im Kapitel 3 die baubetrieblichen Abläufe von der Anlieferung des Materials auf die Baustelle bis zum Spritzbetonauftrag vor Ort mit Hilfe von Flussdiagrammen dargestellt.

Unter Berücksichtigung relevanter Beurteilungskriterien (s. Kapitel 4) bei der Suche nach einem geeigneten Spritzbetonverfahren, wird die prinzipielle Vorgangsweise bei der Erarbeitung von Musterkalkulationen für die einzelnen Verfahrensschritte im Kapitel 5 vorgestellt. Abschließend werden mit Hilfe der Methode der Nutzwertanalyse nicht monetär messbare Einflussparameter (z.B. die Beurteilung der Flexibilität eines Verfahrens) in den Entscheidungsfindungsprozess einbezogen, um eine ganzheitliche - nicht ausschließlich monetäre - Vergleichbarkeit der Verfahren zu gewährleisten (s. Kapitel 6).

Mit dem Aufbau eines solchen Entscheidungshilfesystems soll dem Tunnelbaupraktiker letztendlich ein leistungsfähiges Instrument zur Auswahl eines geeigneten Spritzbetonverfahrens für den Tunnel- und Stollenbau in die Hand gegeben werden. Zur Erreichung dieser Zielsetzung wird im Kapitel 7 eine Überprüfung der Plausibilität der Vorschläge dieses Systems bzw. eine Eichung der Ergebnisse an Hand unterschiedlicher Referenzprojekte vorgeschlagen, um die Praxistauglichkeit mit Fakten unterlegen zu können.

## 2. Entscheidungshilfesysteme

### 2.1 Definition

Ein Mensch wird im täglichen Sprachgebrauch dann als Experte bezeichnet, wenn er über detail-

liertes Fachwissen in einem eingegrenzten Bereich verfügt. Ein Experte beherrscht und manipuliert also Fakten und Regeln aus einem bestimmten Wissensgebiet besser als die Mehrzahl aller anderen Menschen, allerdings weisen "menschliche" Experten auch einige "Nachteile" auf (vgl. [3]):

- Sie sind eher selten, meist nicht verfügbar und oft mit Routinearbeiten überlastet.
- Sie sind teuer, auch wenn sie im eigenen Unternehmen arbeiten.
- Bei Kündigung oder Pensionierung geht das angesammelte Wissen des Experten für jüngere Mitarbeiter verloren.
- Auch Experten machen Fehler und haben manchmal einen "schlechten Tag".
- Vielfach können Experten ihre Schlussfolgerungen und Problemlösungsprozesse nicht erklären, weil sie die Gesetzmäßigkeiten ihrer intuitiv getroffenen Entscheidungen oft selbst gar nicht bewusst nachvollziehen können.
- Unterschiedliche Experten stimmen oft in der Beurteilung ein- und desselben Sachverhaltes nicht überein.

Was versteht man nun unter Expertensystemen und welche Zielsetzung verfolgen solche Systeme? Nach Schupp definieren sich Expertensysteme als Computersysteme, welche gebietsspezifisches Expertenwissen speichern, verwalten, gezielt auswerten und zu Auskünften an einen Benutzer oder zur Abwicklung bestimmter Aufgaben (z.B. einer Produktionssteuerung) nutzen können. Deshalb spricht man auch häufig statt von "Expertensystemen" von wissensbasierten Systemen [8].

Bei den Entscheidungshilfesystemen wiederum handelt sich um interaktive, auf Computer basierende Systeme, die dem Anwender helfen sollen, zielgerichtete Entscheidungen bei komplexen Aufgaben- bzw. Problemstellungen zu treffen. Dem Benutzer wird durch solche Systeme nicht nur "Expertenwissen" zur Verfügung gestellt, sondern auch eine strukturierte, klar nachvollziehbare und erklärbare Vorgangsweise bei der Lösung komplexer Probleme angeboten. Im Laufe dieses strukturierten Entscheidungsprozesses werden wichtige Daten aufgefunden und für den Anwender aufbereitet. Damit stellt die Entwicklung des zu modellierenden Systems für den Nutzer gerade bei Entscheidungshilfesystemen eine wesentliche und anspruchsvolle Aufgabe dar [3].

### 2.2 Zielsetzung

Zunächst eine kurze Anekdote von dem Mann, der angeblich seinen Datenbankrechner fragte, wo sein Vater sei. "Ihr Vater ist in Kanada und fischt Lachse." Und als der Mann dann grinsend antwortete: "Irr-

tum, mein Vater liegt schon zwei Jahre auf dem Nordfriedhof", habe der Computer ihn korrigiert: "Nein, das ist derjenige, der mit Ihrer Mutter verheiratet war. Ihr Vater ist in Kanada und fischt Lachse." Diese Geschichte ist zwar bestimmt nicht wahr, spiegelt aber den Wunsch nach "intelligenten" Computern wieder, die in der Lage sind komplexe (im gegenständlichen Fall familiäre) Problemstellungen zu lösen.

Nachdem Aufgabenstellung im Bauwesen zunehmend interdisziplinäres Wissen erfordern, sollen dem unerfahrenen Mitarbeiter strukturierte Problemlösungsansätze angeboten und damit das Risiko von Fehlermöglichkeiten deutlich reduziert werden. Allerdings sind während des Problemlösungsprozesses die Entscheidungen des Systems laufend zu hinterfragen, denn die erhaltenen Lösungsansätze sind weder völlig richtig noch falsch, sondern im Rahmen von Ermessensspielräumen plausibel und vernünftig.

Die eigentliche Entscheidung und das Vertreten der Lösung gegenüber Dritten kann dem Benutzer durch das System schlussendlich nicht abgenommen werden.

Zusammengefasst ergeben sich damit folgende Zielsetzungen (vgl. [7]):

- Gewinnung von Einsichten für Problemlösungen, für die keine eindeutigen Lösungsalgorithmen vorliegen.
- Erhaltung bzw. Transfer des Erfahrungswissens und des Urteilsvermögens älterer Experten auf Nachwuchskräfte.
- Wissenssicherung von mehreren Experten in einem System, damit kann Wissen auch weniger geschulten Mitarbeitern im Unternehmen zugänglich gemacht werden.
- Kontinuierliche Sammlung von Expertenwissen über einen größeren Zeitraum und laufende Verifikation des Wissens.
- Möglichst schnelle und zuverlässige Aktivierung von Expertenwissen für eine größere Anzahl von Nutzern.
- Normierung von Vorgängen in großen Unternehmen durch die gleichartige Behandlung von Problemstellungen durch die vorgegebene Struktur der Expertensysteme.
- Durch den Einsatz des Computers reduziert sich die Gefahr, Symptome zu übersehen, d.h. die Sicherheit, Vollständigkeit und Fehlerfreiheit erhöht sich innerhalb eines Problemlösungsprozesses.
- Begrenzung von Rechenprozessen oder Verfahrens- und Materialalternativen auf sinnvolle Untersuchungsbereiche.

## 2.3 Struktur

In den nachfolgenden Punkten 2.3.1 bis 2.3.3 werden die erforderlichen Komponenten eines Entscheidungshilfesystems zur Lösung praktischer Aufgaben und deren grundsätzliche Struktur beschrieben (s. auch [5], [7] und [8]).

### 2.3.1 Systemarchitektur

Bei Entscheidungshilfesystemen wird das fachspezifische Wissen von Fachexperten und Wissensingenieuren eingebracht, während der Programmierer die Darstellungsregeln für dieses Wissen kennen muss, um die allgemeine Struktur zu entwickeln (Bild 1).

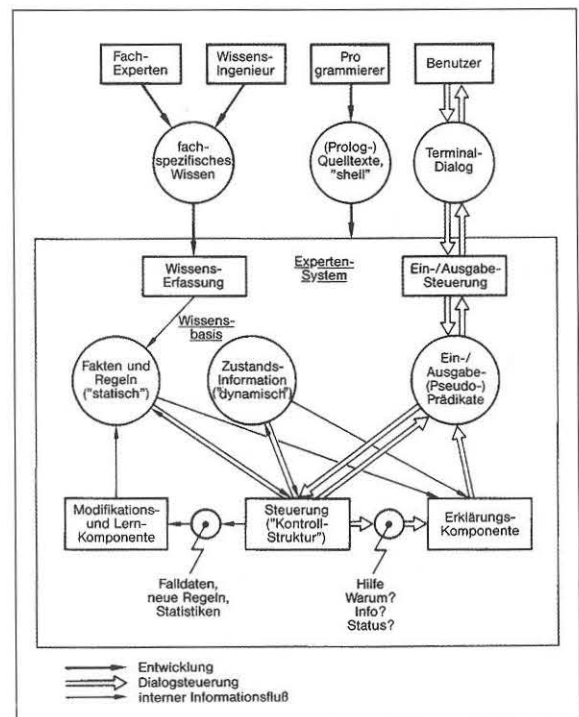


Bild 1: Beispiel für die Systemarchitektur eines Entscheidungshilfesystems [8]

Der Anwender benützt das System über den Terminal-Dialog. Nach der Eingabe von Daten durch den Nutzer werden über die Steuerung ("Kontrollstruktur") zunächst Fakten, Regeln und Zustandsinformationen abgefragt. Neue Falldaten, Regeln oder Statistiken werden über eine Modifikations- und Lernkomponente aufbereitet und als neues Wissen in die Wissensbasis eingefügt. Im Zuge der Entscheidungsfindung kann der Anwender über die Erklärungs-komponente den Problemlösungsprozess jederzeit unterbrechen und "Expertenwissen" einholen. Nach Beendigung des internen Kommunikationsflusses erfolgt die Datenausgabe wieder über die Kontrollstruktur und den Terminaldialog.

### 2.3.2 Wissensbasis

Die Wissensbasis bildet die Grundlage eines Entscheidungshilfesystems und enthält alle Kenntnisse des Experten, die für die Lösung von Problemstellungen in einem bestimmten Anwendungsgebiet erforderlich sind. Dabei kann es sich um deklaratives Wissen, also um eine statische Ansammlung von Fakten (z.B. aus der Literatur) handeln, aber auch um prozedurales Wissen. Prozedurales Wissen beruht vor allem auf Erfahrung und enthält zusätzlich Informationen darüber, wie Wissen konstruiert, verknüpft und angewandt wird.

### 2.3.3 Wissensakquisition

Unter Wissensakquisition versteht man den Vorgang, Wissen zu orten, zu sammeln und zu analysieren. Wissen soll dabei aus verschiedenen Quellen (z.B. Literaturstudium, Interviews mit Experten und Selbstbeobachtung) gesammelt und so formalisiert aufbereitet werden, dass es in einem Computerprogramm verarbeitet werden kann. Neues Wissen kann dabei auf Plausibilität und Verträglichkeit mit altem Wissen geprüft und der Wissensbasis hinzugefügt werden.

Beispiel:

Durch die strukturierte Eingabe und Ablage relevanter Projektdaten in Datenbanken und der anschließenden Möglichkeit der statistischen Auswertung "lernt" die Wissensbasis de facto mit jedem Referenzprojekt dazu.

### 2.3.4 Schlussfolgerungs- bzw. Inferenzmechanismus

"Inferenz" bedeutet hier "logisches Schließen". Der Schlussfolgerungsmechanismus sucht und verknüpft Fakten und Regeln nach einer vorgegebenen Strategie und produziert so Folgerungen und Ergebnisse. Er dient somit der Wissensauswertung und liefert aufgrund der Inhalte der Wissensbasis Problemlösungsansätze.

Beispiel für einen Schlussfolgerungsmechanismus: Wenn große Mengen an Spritzbeton und hohe Spritzleistungen (Größenordnung 20 m<sup>3</sup>/h und Düse) erforderlich sind, dann ist das Nassspritzverfahren dem Trockenspritzverfahren vorzuziehen.

### 2.3.5 Erklärungskomponente

Die Erklärungskomponente zeigt dem Benutzer, durch welche Regeln und Fakten ein Ergebnis zustande kommt. Dem Anwender kann sowohl der Lö-

sungsweg in allen Details erläutert werden, als auch ein Experte durch die gelieferten Problemlösungsansätze das System jederzeit auf Plausibilität prüfen kann.

Beispiel:

Das Nassspritzverfahren kommt - aus Sicht des Entscheidungshilfesystems - für einen Einsatz beim Projekt X aus nachfolgenden Gründen nicht in Frage, weil:

- keine baustelleneigene Mischanlage vorhanden ist und
- das nächste Transportbetonmischwerk ca. 40 km von der Baustelle entfernt ist.

### 2.3.6 Dialogteil

Der Dialogteil übernimmt die Menüführung durch das System und ermöglicht das "Gespräch" zwischen dem Anwender und dem Computer. Dabei können Fragen zum konkreten Problem gestellt werden und aufbereitete Lösungsergebnisse dargestellt werden.

Beispiel:

Der Benutzer des Entscheidungshilfesystems erkundigt sich im Dialogteil über eine Möglichkeit der Staubreduktion an der Düse bei der Verwendung des Trockenspritzverfahrens mit ofentrockenem Mischgut. Die Wissensbasis des Systems schlägt daraufhin den Einsatz einer Vorbenetzungsdüse vor.

## 2.4 Anwendungsgebiete und -grenzen

Der Großteil der Entscheidungshilfesysteme im Bauwesen wurde zum Teil als Prototyp entwickelt und hat den wissenschaftlichen, universitären Bereich nicht verlassen. Nach Sohni lassen sich vier Hauptanwendungsgebiete unterscheiden [4]:

- Diagnose: Aus Symptomen (Beobachtungen und Messdaten) sollen Fehlfunktionen eines Systems diagnostiziert werden.
- Planung, Konfigurierung und Konstruktion: Planungsaufgaben stellen sich z.B. bei der Konstruktion von Gebäuden und Bauteilen. Aus den Polierplänen des Architekten werden z.B. die Schal- und Bewehrungspläne für ein zu erstellendes Bauwerk entwickelt.
- Auswertung: Durch die Auswertung geologischer Befunde sollen Entscheidungen zur Ausbeutung von Rohstoffvorkommen ausgewertet werden.
- Überwachung: Komplexe Systemfunktionen sind zu überwachen und zu steuern. Dabei werden Soll-Werte mit den aktuellen Ist-Werten innerhalb eines Regelkreisprozesses entwickelt und eventuell erforderliche Korrekturmaßnahmen getroffen.

Für den baupraktischen Einsatz bei komplexen Problemstellungen erscheint die Nutzung solcher Systeme für die Entscheidungsfindung nicht immer zweckmäßig, denn die Erfahrung von menschlichen Fachexperten zur Prüfung der vorgeschlagenen Lösungsansätze auf Plausibilität ist nach wie vor unverzichtbar.

Zusammenfassend lassen sich die Anwendungsgrenzen von Entscheidungshilfesystemen wie folgt darstellen (vgl. [6]):

- Experten können oftmals ihr Wissen nur schwer beschreiben bzw. ist die Erklärung von komplexen Sachverhalten durch einfache Regeln oftmals schwierig.
- Verbale Regeln sind oft für Computer nicht in verständlichen Algorithmen formalisierbar.
- Durch eine große Wissensbasis mit vielen Details wird ein System sehr leicht unübersichtlich und mit einfachen Testverfahren kaum mehr beherrschbar.
- Expertensysteme können ihre "eigene" Erfahrung nicht abschätzen und "verlassen" sich ausschließlich und zwangsläufig auf ihre Wissensbasis. Bremer [6] bezeichnet dieses Phänomen als "Stammtischmentalität" von Expertensystemen, denn "sie reden auch da noch kräftig mit, wo sie schon längst keine Ahnung mehr haben." Der Mensch schätzt seine Problemlösungskapazität besser ein und zieht im Zweifelsfall auch weitere Experten für seine Entscheidung hinzu.
- Bei komplexen Problemstellungen muss der Mensch noch immer abschätzen, ob vom System getroffene Entscheidungen und Lösungsansätze plausibel sind.
- Die Frage, wer bei möglichen Fehlfunktionen und Fehlentscheidungen die Verantwortung übernimmt, ist nicht eindeutig zu klären.

Deshalb sollte man statt des Begriffs "Expertensystems" besser den Begriff "Entscheidungshilfesystem" verwenden, weil sie eher dafür geeignet sind, den Experten bei seiner Arbeit zu unterstützen und ihm einen strukturierten Problemlösungsansatz anbieten. Der Aufbau eines Entscheidungshilfesystems zur Auswahl des optimal geeigneten Spritzbetonverfahrens im Tunnelbau stellt daher den Versuch dar, dem Bauleiter oder Kalkulanten bei der Entscheidungsfindung für ein klar abgegrenztes Teilgebiet des Tunnelbaus einen strukturierten, checklistenartigen und möglichst benutzerfreundlichen Problemlösungsansatz anzubieten.

### 3. Spritzbetonverfahrenstechnik

#### 3.1 Überblick

Spritzbeton ist je nach Verfahren ein Gemisch aus Zement, Zusatzstoffen, Spritzbindemittel, Zuschlä-

gen, Wasser und Zusatzmittel. Dieses Gemisch wird mit Hilfe verschiedener Verfahrenstechniken an die Düse transportiert und mit Druckluft auf die Auftragsfläche geschleudert, wobei die Verdichtung durch die Energie des Aufpralls erfolgt [1]. Im Tunnelbau bewährt sich das Stützmittel Spritzbeton besonders wegen seiner möglichen Verarbeitung über Kopf bei gleichzeitigem Entfall der Schalung, dem hohlraumfreien Anschluss an das Gebirge, der beliebigen Formgebung sowie dem möglichen Auftrag in dünnen Schichten und dem biegeweichen Verhalten im Erhärtungszustand.

Die wesentlichen Anforderungen an den Spritzbeton können im Überblick wie folgt dargestellt werden [1]:

- rasches Erstarren und hohe Frühfestigkeit
- hohe Auftragsleistung auch Überkopf
- gute Haftung am Untergrund
- Zurückdrängen von flächigem Wasserzutritt
- Erreichen einer definierten Festigkeitsklasse unter Berücksichtigung der Frühfestigkeit
- Wasserundurchlässigkeit
- Dauerhaftigkeit (z.B. Beständigkeit gegenüber chemischen Angriffen)
- Staubentwicklung
- Eluatverhalten

Für eine Klassifikation der Spritzbetonverfahrenstechniken werden die Zugabe von Trocken- und Nassgemischgut (Ausgangsmischung) in die Spritzmaschine, die Art der Materialförderung (Dünn- oder Dichtstrom) und die Art der Zugabe von Wasser bzw. des Erstarrungsbeschleuniger vor der Düse als Unterscheidungsmerkmale herangezogen.

Damit ergeben sich drei übergeordnete "moderne" Spritzbetonverfahrenstechniken:

- Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut
- Trockenspritzverfahren mit naturfeuchtem Mischgut
- Nassspritzverfahren im Dicht- bzw. Dünnstromverfahren

In Anlehnung an die Richtlinie Spritzbeton [12] werden einige wesentliche Unterschiede im Überblick in der *Tabelle 1* dargestellt.

#### 3.2 Baubetriebliche Flussdiagramme

Eine Übersicht über die analysierten Spritzbetonverfahren bei der Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems stellt sich in *Bild 2* dar (die Kurzbezeichnungen der einzelnen Verfahren werden in Klammer angegeben). Mit Eigenversorgung wird

dabei die Aufbereitung von Mischgut bzw. Zuschlag direkt auf der Baustelle (z.B. Einsatz einer baustelleneigenen Aufbereitungs- und Mischanlage) bezeichnet, während unter Fremdversorgung die Zulieferung des Mischgutes durch ein externes Transportbetonwerk verstanden wird.

Zur übersichtlichen und lückenlosen Darstellung der baubetrieblichen Abläufe von der Anlieferung des Materials auf die Baustelle bis zum Spritzbetonauftrag vor Ort werden für die angeführten Spritzbetonverfahren zunächst Flussdiagramme (Bild 3) entwickelt.

Damit sollen folgende Ziele erreicht werden:

- Erstens sollen jedem Verfahrensschritt die entsprechenden und relevanten Einflussparameter zugeordnet werden können und damit schlussendlich eine ganzheitliche Bewertung der Verfahren ermöglicht werden. Neben der Berücksichtigung pro-

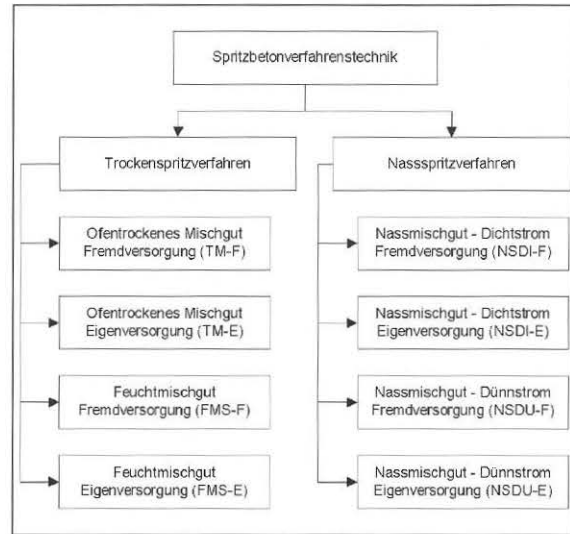


Bild 2: Übersicht über die untersuchten Spritzbetonverfahren

	Trockenspritzbeton			Nassspritzbeton
<b>MISCHGUT</b>				
Wassergehalt der Zuschläge	W < 0,2 M-%	Regelbereich W = 2,0 bis 4,0 M-% Streubereich W = 1,5 bis 5,0 M-%		W ≤ 8 M-%
Bezeichnung	Trocken-Mischgut	Feucht-Mischgut lagerfähig	Feucht-Mischgut mit sofortiger Anwendung	Nass-Mischgut (Pumpbeton)
Kurzbezeichnung	<b>TM</b>	<b>FM-L</b>	<b>FM-S</b>	<b>NM</b>
Bindemittel	Tunnelzement TZ und Zusatzstoffe oder SBM-T, FT	Tunnelzement TZ und Zusatzstoffe	SBM-FT	Tunnelzement TZ und Zusatzstoffe
Beigabe des EB	fallweise in der Mischanlage	bei der Verarbeitung	(fallweise bei der Verarbeitung)	bei der Verarbeitung
Herstellung	Werks- oder Baustellenmischung (Trockenanlage)	Werks- oder Baustellenmischung	Durchlaufmischung bei Verarbeitung	Werks- oder Baustellenmischung (Durchlaufbetrieb)
Lagerung	geschlossen (z.B.: Silo, Sack) – Eigenfeuchte muss beachtet werden	Geschützte Lagerung unbedingt erforderlich	Unkompliziert – z.B. Zwischendeponie im Tunnel	geschützt
Verfügbarkeit	keine Einschränkung	begrenzt verfügbar	keine Einschränkung	begrenzt verfügbar
Bereitstellung (ohne Langzeitverzögerung)	Bevorratung nach Bedarf	Produktion auf Bevorratung, Verarbeitung innerhalb der Lagerzeit (≤ 1,5 h)	Produktion für unmittelbaren Bedarf	Produktion auf Bevorratung, Verarbeitung innerhalb der Lagerzeit (max. 1,5 h)
<b>MISCHGUT-FÖRDERUNG</b>	Dünnstrom (Dosierglasschnecke) – Dichtigkeit wesentlich für Staubreduktion	Dünnstrom (Rotorspritzmaschine) – Dichtigkeit wesentlich für Staubreduktion	Dünnstrom (Rotorspritzmaschine)	Dichtstrom (Kolbenpumpe) Dünnstrom (Rotorspritzmaschine)
<b>GERÄTE</b>	Dosierglasschnecke, kompaktes Spritzmobil oder Silo + Fördereinheit	Hydrokuli, Förderband, Dosiereinrichtung für EB und Zement, SpB-Maschine	Fahrbare oder stationäre Misch- und Aufgabereinheit, SpB-Maschine	Kompaktes Spritzmobil, Transportbetonmischer
<b>FÖRDERLEITUNG</b>	Schlauch- oder Rohrleitung	Schlauch- oder Rohrleitung	Schlauch- oder Rohrleitung	Rohrleitungen (analog Pumpbeton)
<b>WASSERZUGABE</b>	Hauptbenetzungs- bzw. Vorbenetzungsdüse	Hauptbenetzungsdüse	Hauptbenetzungsdüse	In der Transport- oder Baustellenmischanlage
<b>ERSTARRUNGS-BESCHLEUNIGER ZUGABE</b>	bereits im Mischgut enthalten	Dosierung für flüssige und pulverförmige EB an der Düse	bereits im Mischgut enthalten	Dosiereinrichtung für flüssige und pulverförmige EB an der Düse
<b>AUFGABEN SPRITZDÜSE</b>	Gute Vermischung von Mischgut, Wasser	Gute Vermischung von Mischgut, Wasser und bei Bedarf auch EB	Gute Vermischung von Mischgut, Wasser und bei Bedarf auch EB	Beim Dichtstromverfahren muss der Dichtstrom durch die Düse aufgelockert und beschleunigt werden. Beim Dünnstromverfahren hat Düse nur Leitfunktion.
<b>DÜSENFÜHRUNG</b>	Manuell / Spritzmanipulator	Manuell / Spritzmanipulator	Manuell / Spritzmanipulator	Spritzmanipulator

Tab. 1: Überblick über Spritzbetonverfahrenstechnik

jektspezifischer, verfahrensunabhängiger Randbedingungen werden die einzelnen Verfahren hinsichtlich Baubetrieb, Baustelleneinrichtung, Bontechnologie und Sicherheit bzw. Gesundheitschutz analysiert.

Zweitens dienen die Flussdiagramme als Grundlage für die Musterkalkulation und stellen damit die Basis einer Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Verfahren dar. Durch die checklistenartige Vorgangsweise bei der Erarbeitung der Musterkal-

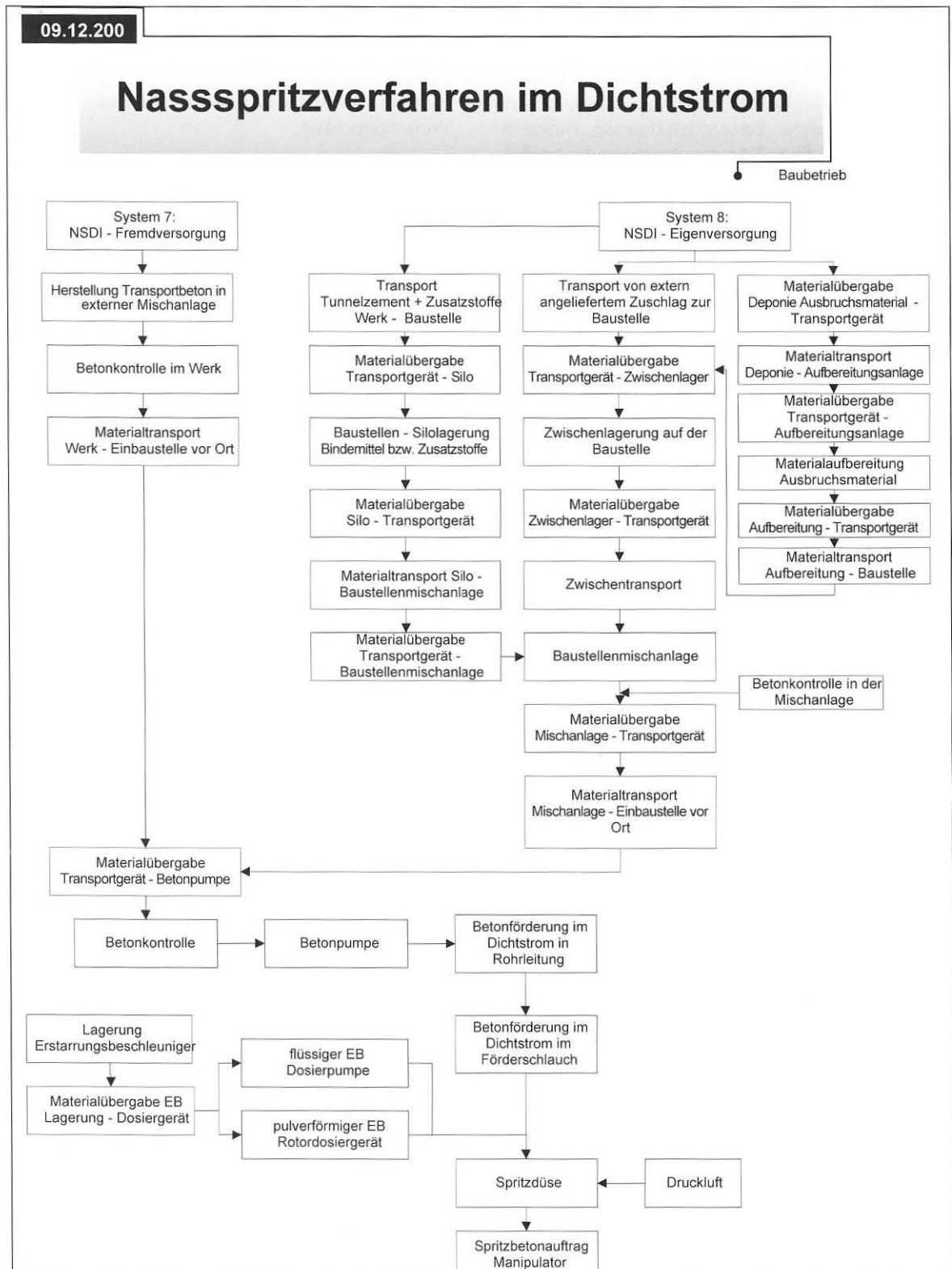


Bild 3: Flussdiagramm "Nassspritzverfahren im Dichtstrom"

kulationen soll das Risiko des "Vergessens" einzelner Verfahrensschritte bei der Kostenermittlung vermieden werden.

Beispielhaft wird in *Bild 3* ein Flussdiagramm zur Darstellung der baubetrieblichen Abläufe für das Nassspritzverfahren im Dichtstrom (sowohl für Eigen- als auch für Fremdversorgung des Mischguts) angeführt. Bei der Eigenversorgung wird zusätzlich eine Unterscheidung getroffen, ob der Zuschlag in einer baustelleneigenen Aufbereitungsanlage aufbereitet oder von einem baustellenexternen Kieswerk zugeliefert wird.

#### 4. Beurteilungskriterien

##### 4.1 Überblick

Einen wesentlichen Schritt bei der Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems zur Auswahl eines geeigneten Spritzbetonverfahrens im Tunnelbau stellt der Aufbau einer entsprechenden Wissensbasis dar. Durch die Analyse von insgesamt 83 aktuellen, fachspezifischen Publikationen (Dissertationen, Diplomarbeiten und Artikeln aus einschlägigen Fachzeitschriften) wird in einer Datenbank Wissen über die Verfahren übersichtlich in Matrixform darge-

stellt. Mit dieser Vorgangsweise werden relevante Beurteilungskriterien für die Entscheidungsfindung herausgearbeitet, wobei die Gliederung dieser Kriterien nach den folgenden übergeordneten Beurteilungsaspekten erfolgt:

- Verfahrensunabhängige Parameter,
- Baubetrieb,
- Baustelleneinrichtung,
- Betontechnologie,
- Sicherheit- bzw. Gesundheitsschutz und
- Wirtschaftlichkeit.

Der Sinn der Gliederung der Kriterien nach den o.a. Beurteilungsaspekten liegt darin, eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Spritzbetonverfahrenstechniken zu gewährleisten. Es soll nicht nur eine ausschließliche Beurteilung der einzelnen Verfahren nach den ermittelten Kosten erfolgen, sondern eine erweiterte Bewertung nach z.B. baubetrieblichen oder betontechnologischen Aspekten möglich sein.

In *Bild 4* sind die verfahrensunabhängigen und die baubetrieblichen Beurteilungskriterien aufgelistet. Dabei werden unter den verfahrensunabhängigen Parametern jene Kriterien verstanden, die bei dem zu bearbeitenden Tunnel- bzw. Stollenbauprojekt

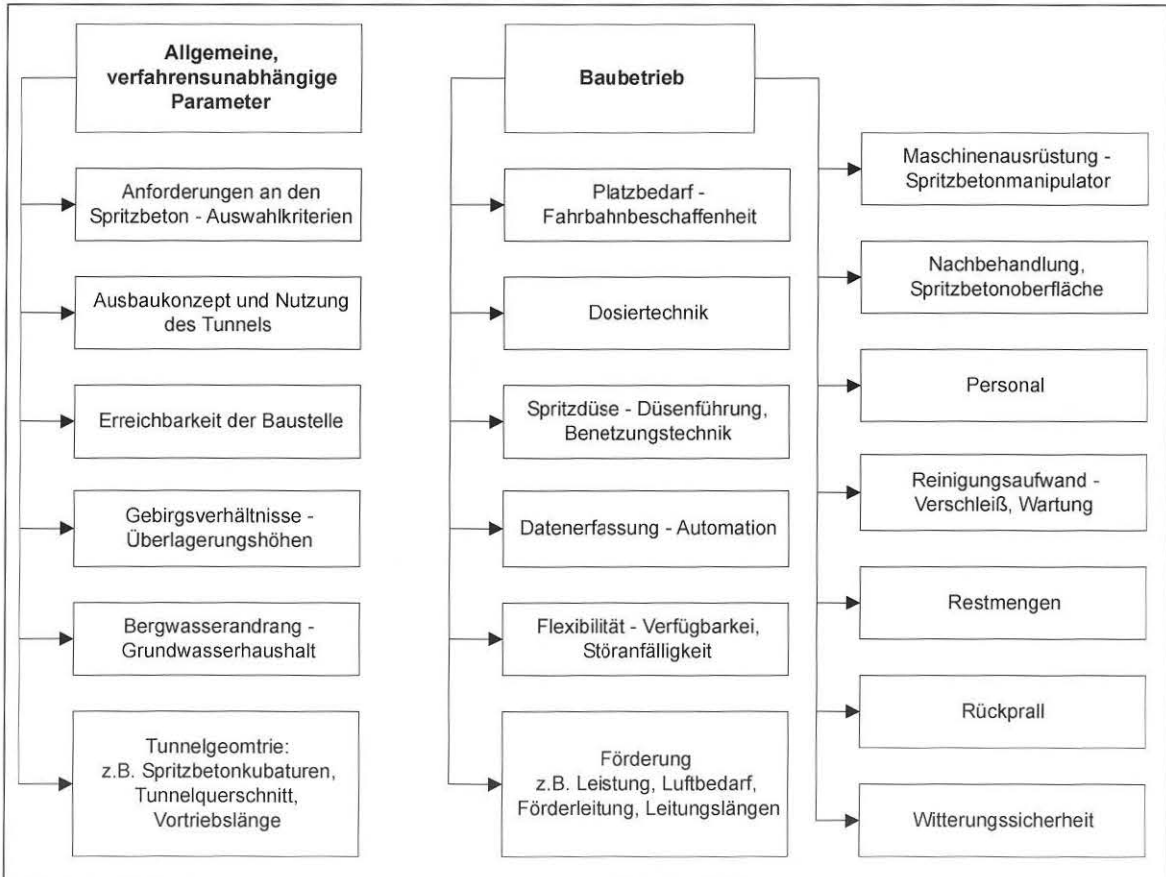


Bild 4: Verfahrensunabhängige und baubetriebliche Beurteilungskriterien



durch die Tunnelgeometrie (z.B. Querschnitt, Vortriebslänge), die Lage der Baustelle und die geologischen und hydrologischen Verhältnisse vorgegeben und damit unabhängig vom angewendeten Spritzbetonverfahren sind. Als wesentliche Anforderungen an den Spritzbeton können z.B. Früh- bzw. Endfestigkeit, Dauerhaftigkeit und Widerstandsfähigkeit angeführt werden.

Für eine Bewertung nach baubetrieblichen Kriterien sind vor allem Förderleistung und Rückprall, der erforderliche Personal- und Geräteaufwand sowie die Flexibilität und die Verfügbarkeit der Verfahren zu nennen.

Die übrigen Beurteilungskriterien der Baustelleneinrichtung, der Betontechnologie und des Sicherheit- und Gesundheitsschutzes sind in *Bild 5* dargestellt. Beispielhaft können die Anforderungen an die Lagerfähigkeit des Mischgutes, der Platzbedarf der Baustelleneinrichtung, die Anforderungen an die Mischgutrezeptur oder die Staumentwicklung vor Ort als wesentlich angeführt werden.

Der wirtschaftliche Aspekt wird an dieser Stelle nicht explizit angeführt, sondern im Kapitel 5 "Musterkalkulation" ausführlich erläutert.

#### 4.2 Baustelleneinrichtung

Die jeweiligen Beurteilungsaspekte bzw. -kriterien für die insgesamt 8 analysierten Spritzbetonsysteme (*Bild 2*) werden in der Wissensdatenbank übersichtlich und klar strukturiert in Matrixform gespeichert. Damit soll einerseits dem Anwender die Entscheidungsgrundlage bei der Auswahl eines geeigneten Spritzbetonverfahrens transparent und nachprüfbar vorliegen, andererseits soll durch diese Form der Wissensdarstellung bzw. -ablage auch die Aufnahme von neuem Wissen in die Datenbank erleichtert werden.

Nach Eingabe der verfahrensunabhängigen Beurteilungskriterien durch den Benutzer, wird die Wissensdatenbank schrittweise abgearbeitet und die Vor- und Nachteile der Spritzbetonverfahren gegeneinander abgewogen. Die Datenbankabfrage nach der "Witterungsempfindlichkeit" des Mischgutes ergibt z.B. für das Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut die Ausgabe "Unempfindlich", während für das Trockenspritzverfahren eine "geschützte Zwischenlagerung des Zuschlages im Tunnel" vorgeschlagen wird.

Auszugsweise wird die Wissensdatenbank für den Beurteilungsaspekt "Baustelleneinrichtung" für vier

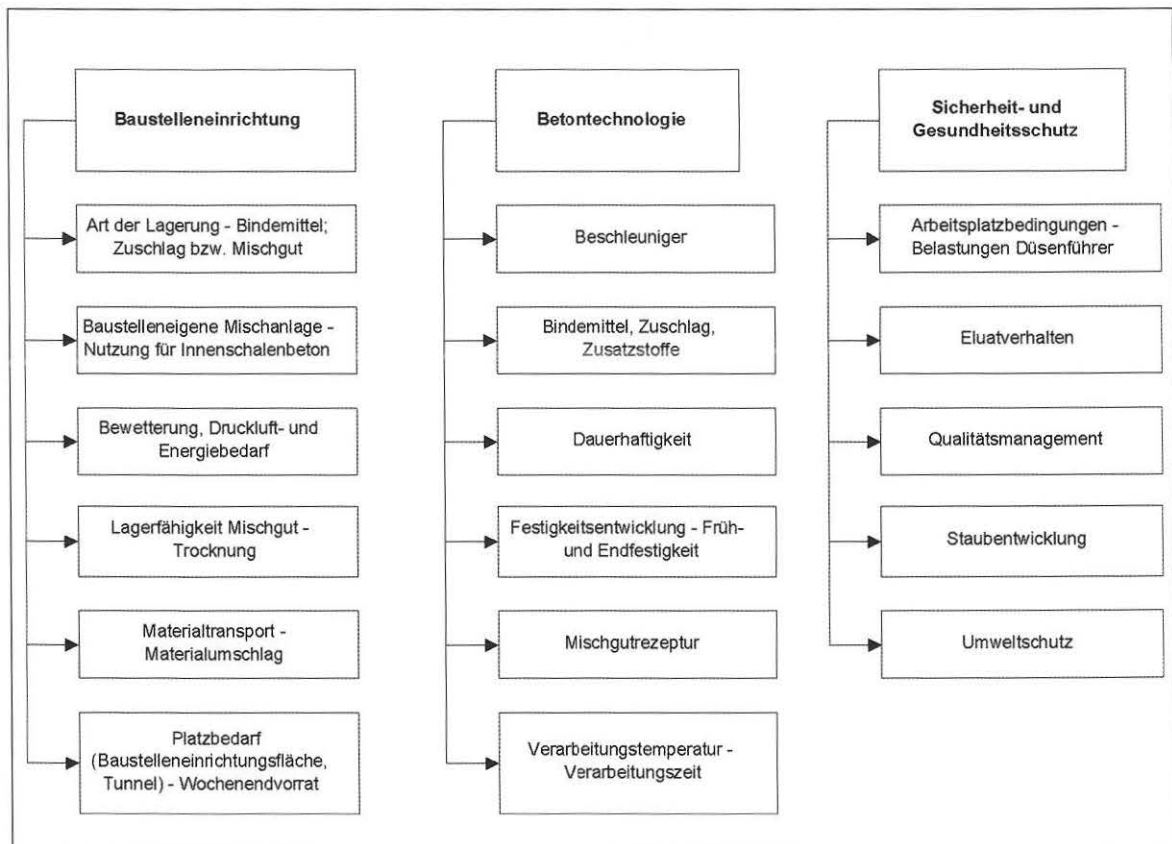


Bild 5: Übersicht über Beurteilungskriterien der Baustelleneinrichtung, der Betontechnologie und des Sicherheit- bzw. Gesundheitsschutzes

unterschiedliche Spritzsysteme mit Fremdversorgung des Mischgutes (Kurzbezeichnungen Bild 2) in der Tabelle 2 dargestellt.

Entsprechend der Methode der Nutzwertanalyse wird diese Matrix in weiterer Folge als "Zielertragsmatrix" (s. Kapitel 6) bezeichnet. Dabei beschreibt jedes "Matrixkästchen" ein Beurteilungskriterium für ein bestimmtes Verfahren und definiert den "Zielertrag".

## 5. Musterkalkulation

### 5.1 Allgemeines

Die Grundlage für die Musterkalkulation der einzelnen Spritzbetonverfahren bei einem zyklischen Vortrieb wird durch die Vortriebsklassenverteilung von Kalotte und Strosse in der Ausschreibung gebildet. Der Vortrieb in der Kalotte wird demzufolge in

<b>Beurteilungskriterien</b>	<b>TM – F</b>	<b>FMS - F</b>	<b>NSDI – F</b>	<b>NSDU – F</b>
Art der Lagerung Bindemittel	-	Silo	-	-
Art der Lagerung Mischgut	Silo (unter Druckluft – 10 bar) – Zusatzmaßnahmen gegen Entmischung erforderlich	Mischgut wird direkt vor Ort erzeugt – keine Lagerung erforderlich	Mischgut von Betonwerk angeliefert – keine Lagerung erforderlich	Mischgut von Betonwerk angeliefert – keine Lagerung erforderlich
Art der Lagerung Zuschlag	-	Silo, geschützte Lagerung (Maßnahmen im feuchten Tunnel und bei Außenlager)	-	-
Baustelleneigene Betonmischanlage	Nein	Nein – Mischguterzeugung vor Ort mit Mixomat	Nein	Nein
Bewitterung	Hohe Staubentwicklung erfordert sehr gute Belüftung – Mehrkosten	Geringere Staubentwicklung als bei TM – höherer Energieaufwand als beim NSDU/NSDI	Geringe Staubentwicklung führt zu geringem Energieaufwand für die Bewitterung	Geringe Staubentwicklung führt zu geringem Energieaufwand für die Bewitterung
Druckluftbedarf	Hoch – pneumatische Förderung über Dosierblasschnecke	Hoch – pneumatische Förderung über Spritzmaschine + Vermengung der Ausgangsstoffe	Gering – hydraulische Förderung über Kolbenpumpe	Hoch – pneumatische Förderung über Spritzmaschine
Energiebedarf	Geringer Leistungsbedarf an der Spritzmaschine – durch kurze Schlauchleitung und zusätzliche Beschleunigerluft an der Vorbenetzungsdüse	Geringer Leistungsbedarf an der Spritzmaschine	Großer Energiebedarf an der Kolbenpumpe	Geringer Leistungsbedarf an der Spritzmaschine
Lagerfähigkeit Mischgut	Bis zu 3 Monate	-	-	-
Materialtransport	Sack, Silo – LKW, Big-Bag	Silo – LKW für Bindemittel, LKW für Zuschlag	Fahrmischer	Fahrmischer
Materialumschlag	Durch mehrmaliges Umfüllen und Umblasen Gefahr von Entmischungen!	Kein Problem	Kein Problem	Kein Problem
Nutzung der Mischanlage für Innenschalenbeton	Nein	Nein	Nein	Nein
Platzbedarf (Baustelleneinrichtungsfläche)	Gering	Gering	Gering	Gering
Platzbedarf (Tunnel)	Gering	Hoch – beengte Verhältnisse machen Erzeugung vor Ort schwierig (z.B. Ulmenstollen)	Hoher Platzbedarf für Spritzmanipulator und Fahrmischer bei engen Vortrieben im schlechten Gebirge	Hoher Platzbedarf für Spritzmanipulator und Fahrmischer bei engen Vortrieben im schlechten Gebirge
Trocknung der Zuschläge	-	-	-	-
Witterung	Unempfindlich (-15°C)	Zwischenlager im Tunnel guter Schutz – eventuell Zusatzmaßnahmen erforderlich	Zufahrt vom Transportbetonwerk zur Baustelle problematisch	Zufahrt vom Transportbetonwerk zur Baustelle problematisch
Wochenendvorrat	Kein Problem	Kein Problem	Wochenendfahrverbot beachten	Wochenendfahrverbot beachten

Tab. 2: Zielertragsmatrix Baustelleneinrichtung

Analogie zu dem Begriff "Schlüsselgerät" als "Schlüsselvortrieb" bezeichnet. Unter einem Schlüsselgerät [10] wird ein maßgebendes Baugerät verstanden (Engpassmaschine), dessen Ausfall die gesamten Bauarbeiten einer Arbeitsstelle zum Erliegen bringt. Für terminkritische Leistungsbereiche kann für diesen Geräteausfall vorbeugend ein Ersatzgerät (Standby - Gerät) vorgehalten werden.

Mit der Bezeichnung "Schlüsselvortrieb" soll daher die besondere Bedeutung des Kalottenvortriebes bei der Auswahl eines Spritzbetonverfahrens betont werden, d.h. unter Berücksichtigung baustellenspezifischer Randbedingungen erfolgt bei der Auswahl eines Spritzbetonsystems die Ermittlung der Kosten, der Vortriebsdauer und die Vergütung der zeitgebundenen Baustellengemeinkosten im wesentlichen über den Kalottenvortrieb. Auf diesen Schlüsselvortrieb ist neben der Personal- auch die Gerätedisposition abzustimmen und die Baustelleneinrichtung zu dimensionieren. Die Vortriebsorte Strosse und Sohle fließen bei der Auswahl eines geeigneten Spritzbetonverfahrens ebenfalls durch die Analyse der Beurteilungsaspekte in den Entscheidungsfindungsprozess ein.

Der zyklische (konventionelle) Vortrieb ist eine Vortriebsart, bei der die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und des Stützmitteleinbaus im Wesentlichen zeitlich nacheinander und mit Hilfe von Einzelgeräten ausgeführt werden. Das Lösen erfolgt in der Regel durch Sprengen, Bagger oder Teilschnittmaschinen. [14] Ein Abschlag, d.h. ein in einem Zyklus geschaffener Teil des Hohlrums, kann hinsichtlich der Reihenfolge der einzelnen Arbeitsvorgänge beispielhaft wie folgt dargestellt werden (Bild 6).

Die Sicherung des Hohlraumrandes bzw. der Ortsbrust mit Spritzbeton liegt immer am kritischen Weg (Bild 6), die Spritzbetonarbeiten bestimmen somit

wesentlich die Gesamtdauer eines Abschlages. Daraus resultieren die erzielbaren Vortriebsleistungen in den jeweiligen Vortriebsklassen und die Gesamtvortriebsdauer.

Es wird die Annahme getroffen, dass sich durch eine Änderung des Spritzbetonsystems (z.B. die Umstellung von Trockenspritz- auf Nassspritzverfahren) in der Leistungs- bzw. Kostenermittlung eines Abschlages lediglich die Zeitdauern für das Auftragen des Spritzbetons (z.B. wegen der unterschiedlichen Förderleistungen und/oder dem geringeren Rückprall) ändern. Die - vom Spritzvorgang als unabhängig betrachteten - Zeitdauern für die übrigen Vortriebstätigkeiten (z.B. das Bohren und Laden der Sprenglöcher, das Schüttern oder den Einbau von Baustahlgitter und Tunnelbögen) bleiben unverändert und sind damit unabhängig vom gewählten System.

Die eventuell aus einer Veränderung der Spritzbetonverfahrenstechnik resultierenden unterschiedlichen Rüstzeiten für die jeweiligen Spritzbetonsysteme werden den Zeitdauern für den Spritzbetonauftrag zugezählt und beeinflussen somit kalkulatv nicht die übrigen Vortriebstätigkeiten.

Der Aufbau der Musterkalkulation und die prinzipielle Vorgangsweise bei der Dateneingabe durch den Anwender lässt sich in der Bild 7 darstellen.

Zur Kostenermittlung sind vom Anwender im Kalkulationsprogramm zunächst die verfahrensunabhängigen Beurteilungskriterien bei der Auswahl eines Spritzbetonverfahrens einzugeben, dazu zählen beispielsweise die geometrischen Abmessungen des Tunnels, die Anzahl der Vortriebe oder die Vortriebsklassen- bzw. Stützmittelverteilung.

Danach sind für die ausgeschriebene Vortriebsklassenverteilung des Schlüsselvortriebes die Zeitdauern der einzelnen Vortriebsvorgänge (z.B. Kalkulation

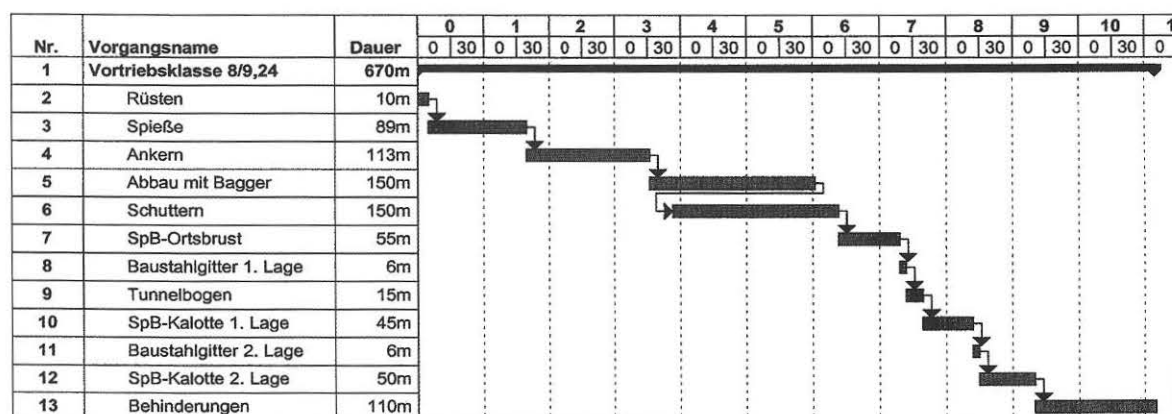


Bild 6: Beispiel für einen Abschlagszyklus in der Vortriebsklasse 8/9,24 [13]

des Zeitbedarfes für Bohren, Laden, Schüttern) für jede Vortriebsklasse zu ermitteln und in entsprechende Tabellen einzutragen. Für die überschlägi-

ge Ermittlung der Abschlagszyklen und den zugehörigen Vortriebsleistungen in den einzelnen Vortriebsklassen ist in einem ersten Schritt eine erfor-

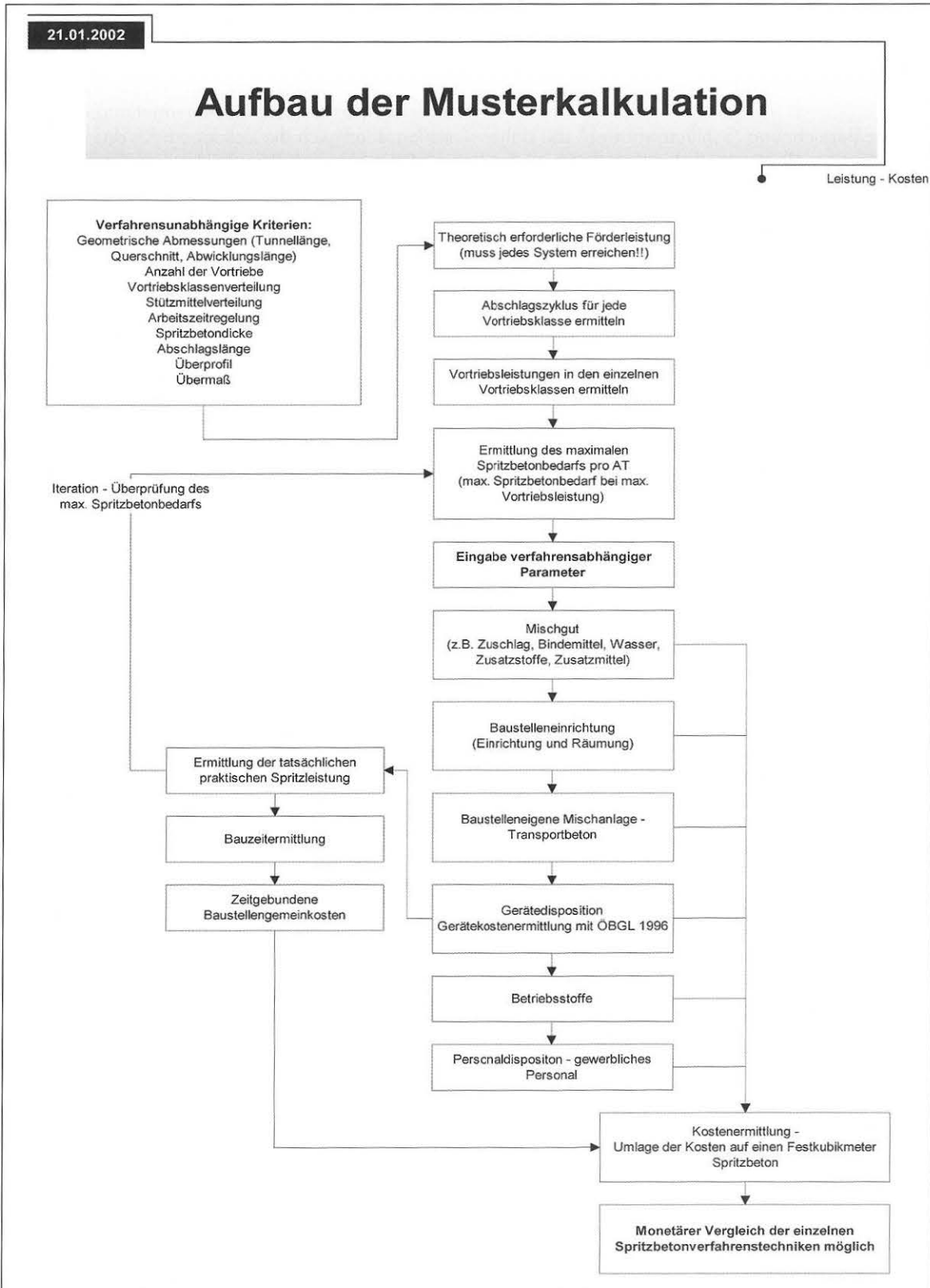


Bild 7: Aufbau der Musterkalkulation

derliche, theoretische Mindestspritzbetonförderleistung anzugeben, um die Einhaltung der vertraglich vorgegebenen Vortriebsdauer - auf der Grundlage der ausgeschriebenen Vortriebsklassenverteilung - mit jedem Spritzbetonsystem gewährleisten zu können.

Unter Berücksichtigung der geometrischen Tunnelabmessungen und der ausgeschriebenen Vortriebsklassenverteilung wird dann in weiterer Folge der maximale Spritzbetonbedarf pro Arbeitstag ermittelt. Mit Hilfe des maximalen Spritzbetonbedarfs wird eine Dimensionierung der Baustelleneinrichtung (z.B. Bestimmung der Anzahl der erforderlichen Silos für Zuschlag und Bindemittel, Festlegung der Leistungsfähigkeit einer baustelleneigenen Mischanlage, Ermittlung der erforderlichen Wochenendbevorratung von Mischgut) vorgenommen und die Personal- und Gerätedisposition getroffen.

Im nächsten Schritt werden die verfahrensabhängigen Parameter vom Nutzer in entsprechende Eingabeformulare eingetragen bzw. werden vom Entscheidungshilfesystem für jede untersuchte Spritzbetonverfahrenstechnik Bandbreiten für die angeführten Beurteilungskriterien vorschlagen, um mit Hilfe von z.B. vorgegebenen Mischgutrezepturen oder Geräte- und Personaldispositionen rasche überschlägige Berechnungen und Vergleiche durchführen zu können.

Die Kostenermittlung erfolgt auf der Grundlage der Österreichischen Baugeräteliste 1996 (ÖBGL

1996), für Geräte die nicht in der ÖBGL 1996 enthalten sind wird eine Neuwertkalkulation durchgeführt. Entsprechende Gerätedispositionen und zugehörige Gerätekenndaten für den wirtschaftlichen Spritzbetonauftrag werden in Tabellen abgelegt. Diese Gerätezusammenstellungen sind als vom System vorgeschlagene Kalkulationsgrundlage zu verstehen, können aber im Zuge der Analyse vom Anwender abgerufen und abgeändert werden. Auf Basis der gewählten Gerätedispositionen ergeben sich gegenüber der o.a. theoretischen Mindestspritzbetonförderleistung in weiterer Folge aber auch unterschiedliche Förderleistungen für einzelne Systeme. In einem Iterationsprozess muss daher die Ermittlung des maximalen Spritzbetonbedarfs und damit verbunden auch die Dimensionierung der Baustelleneinrichtung für jedes Spritzbetonsystem erfolgen (vgl. Bild 7 - "Iteration: Überprüfung des max. Spritzbetonbedarfs").

Die unterschiedlichen Förderleistungen einzelner Spritzbetonsysteme führen zu unterschiedlichen Vortriebsleistungen und haben damit nicht nur einen wesentlichen Einfluss auf die Vortriebsdauer, sondern auch auf die Vergütung der zeitgebundenen Baustellengemeinkosten.

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden in einem letzten Schritt sowohl die zeitgebundenen Baustellengemeinkosten, sowie die Kosten der Baustelleneinrichtung, die Personal- und Gerätekosten und die Materialkosten auf einen Festkubikmeter Spritzbeton umgelegt. Die Musterkalkulation

Verfahrensunabhängige Parameter	Kenndaten
<b>Tunnelgeometrie</b>	
• Tunnellänge	5.000 m
• Mittlere Spritzbetondicke	0,15 m
• Faktor zur Berücksichtigung von Überprofil, Übermaß und Mehrausbruch	1,4
• Abwicklungslänge Gesamttunnelquerschnitt	28,00 m
• Abwicklungslänge Kalottenquerschnitt	18,00 m
<b>Baustellenrandbedingungen</b>	
• Spritzbetonbedarf in Festkubikmeter [fm <sup>3</sup> ]	29.400 fm <sup>3</sup>
• Geforderte Mindestspritzbetonförderleistung [fm <sup>3</sup> /AT]	10 fm <sup>3</sup> /AT
• Betonbedarf für Ortbetoninnenschale [fm <sup>3</sup> ]	46.000 fm <sup>3</sup>
• Maximale Vortriebsleistung pro Arbeitstag [AT]	9 m/AT
• Anzahl der Vortriebe	1
<b>Gesamtdauer für das Tunnelbauprojekt, davon</b>	53 Monate (=36+15+2)
• Vortriebsdauer	36 Monate
• Betonierdauer Ortbetoninnenschale	15 Monate
• Baustelleneinrichtung und -räumung	2 Monate
<b>Mischgutrezeptur</b>	
• Tunnelzement	350 kg/m <sup>3</sup>
• Wasser	195 l/m <sup>3</sup>
• Kies	1.800 kg/m <sup>3</sup>
• Flugasche	60 kg/m <sup>3</sup>
• Beschleuniger	20 kg/m <sup>3</sup>

Tab. 3: Kalkulationsbeispiel - Zusammenstellung der verfahrensunabhängigen Parameter

dient zum ausschließlich monetären Vergleich der Spritzbetonsysteme, für eine ganzheitliche Beurteilung und Bewertung wird im Kapitel 6 die Methode der Nutzwertanalyse herangezogen. Damit können auch nicht monetär messbare Einflussparameter in den Entscheidungsfindungsprozess einbezogen werden.

## 5.2 Kalkulationsbeispiel für das Nassspritzverfahren im Dichtstrom

Die prinzipielle Vorgangsweise bei der Ermittlung der Kosten je Festkubikmeter Spritzbeton soll für das Nassspritzverfahren im Dichtstrom (System mit Eigenversorgung "NSDI-E" und System mit Fremdversorgung "NSDI-F") anhand eines Musterprojektes beispielhaft gezeigt werden.

### 5.2.1 Verfahrens unabhängige Parameter

In der *Tabelle 3* werden zunächst die verfahrens unabhängigen Parameter und die vorgegebenen Baustellenrandbedingungen für das Musterprojekt zusammengestellt.

### 5.2.2 Kostenermittlung

Das Ergebnis der Kostenkalkulation analog der beschriebenen Vorgangsweise im Punkt 5.1 wird für einen Festkubikmeter Spritzbeton für die beiden Systeme NSDI-F und NSDI-E in der *Tabelle 4* dargestellt. Bei der Anwendung des Entscheidungshilfesystems können dabei sowohl selektiv Verfahren kalkuliert werden, aber auch gleichzeitig sämtliche 8 analysierten Spritzbetonsysteme einander kalkulatorisch gegenübergestellt werden.

KOSTENART	NSDI-F [€/fm <sup>3</sup> ]	NSDI-E [€/fm <sup>3</sup> ]
Mischgut	65	61,6
Geräte	15,7	22,7
Personal	15,4	22,4
Betriebsstoffe	5,3	6
Zeitgebundene Baustellengemeinkosten	1	0
Sonstige Kosten (Verschleiß, Reinigung)	6,6	6,6
<b>Gesamt</b>	<b>109,0 €/fm<sup>3</sup></b>	<b>119,3 €/fm<sup>3</sup></b>

Tab. 4: Kostengegenüberstellung NSDI-F und NSDI-E

Damit zeigt sich, dass unter alleiniger Berücksichtigung der Kosten je Festkubikmeter Spritzbeton das Spritzbetonsystem mit Fremdversorgung (NSDI-F) im gegenständlichen Beispiel zu bevorzugen wäre. Die wesentlichen Kostenunterschiede der beiden Systeme ergeben sich dabei für die in der *Tabelle 4* Kostenarten wie folgt:

⇒ Mischgut

In der Kalkulation wird für die Fremdversorgung

(Lieferung frei Baustelle) mit Mischgut ein Ansatz von 65 Euro/fm<sup>3</sup> Spritzbeton gewählt.

Bei der Kostenermittlung für das Nassspritzverfahren mit Eigenversorgung müssen die Rohstoffe (Zement, Zuschlag, Beschleuniger, ...), die Silos zur Lagerhaltung von Zement und Zuschlag bzw. die Vorhaltung einer eigenen Baustellenmischanlage berücksichtigt werden.

- Die Kalkulation der Rohstoffkosten ergibt dabei entsprechend der geforderten Mischgutzusammensetzung 49,9 Euro/fm<sup>3</sup>.

- Die maximale Vortriebsleistung von 9 Metern pro Arbeitstag wird beim System NSDI-E zur Dimensionierung der Silos für Zement und Zuschlag herangezogen, wobei ein Wochenendvorrat für insgesamt 3 Arbeitstage zu berücksichtigen ist. Damit ergibt sich ein Lagerbedarf von 44 t Zement (gewählt: 1 Silo mit ÖBGL-Nr. 1301-0050) und 225 t Zuschlag (gewählt: 2 Silo mit ÖBGL-Nr. 1310-0150). Umgelegt auf die Vortriebsdauer von 36 Monaten und 29.400 Festkubikmeter Spritzbeton ergeben sich aus der zusätzlich erforderlichen Baustelleneinrichtung Kosten in der Höhe von 2,8 Euro/fm<sup>3</sup> Spritzbeton.

- Die Betonmischanlage wird auf eine Leistung von 35 Festkubikmeter pro Stunde (ÖBGL-Nr.: 1130-0750) ausgelegt, wobei die Anlage sowohl für die Erzeugung von Spritzbeton als auch für den Beton der Innenschale verwendet wird. Damit legen sich die Kosten der Anlage und des zugehörigen Personals über 51 Monate (=Vortriebsdauer + Betoninnenschale) auf insgesamt 75.400 m<sup>3</sup> (=29.400 m<sup>3</sup> + 46.000 m<sup>3</sup>) Beton um. Damit ergeben sich Kosten in der Höhe von 8,9 Euro/fm<sup>3</sup> Spritzbeton.
- Die Gesamtkosten für das Mischgut ergeben sich damit zu 61,6 Euro/fm<sup>3</sup>.

⇒ Gerätedisposition und Betriebsstoffe

Die Vortriebsgeräte setzen sich für das System der Fremdversorgung wie folgt zusammen:

- 1 x Spritzbetonmanipulator (inkl. Betonpumpe, Vorratsbehälter für Beschleuniger und Spritzarm mit Spritzdüse)
- 1 x Kompressor
- 1 x Druckluftbehälter

Aus dieser Gerätezusammenstellung und unter Berücksichtigung der ÖBGL 1996 resultieren monatliche Kosten von ca. 12.800 Euro/Monat bzw. umgelegt auf die gesamte Vortriebsdauer und den Gesamtspritzbetonbedarf Kosten von 15,7 Euro/fm<sup>3</sup>.

Beim System NSDI-E sind - unter Berücksichtigung der Vortriebslänge von 5.000 m und der erforderlichen Betonförderleistung - im gegenständlichen Fall zusätzlich zwei Fahrmischer für den Transport

des Spritzbetons von der baustelleneigenen Mischanlage zum Einbauort kalkulativ zu berücksichtigen. Damit ergeben sich gegenüber dem System NSDI-F Mehrkosten in der Höhe von 7,0 Euro/fm<sup>3</sup> bzw. Gerätekosten von 22,7 Euro/fm<sup>3</sup> (= 15,7 + 7,0).

Die gewählte Gerätedisposition bildet die Grundlage zur Ermittlung der Kosten für die Betriebsstoffe, die Werte sind in der Tabelle 4 angegeben.

⇒ Personaldisposition

Für die Kalkulation der Lohnkosten werden für das System NSDI-F ein Maschinenführer, ein Düsenführer und zwei Mann für Hilfsdienste berücksichtigt. Damit ergeben sich bei einem Mittellohn von 32 Euro/h und einer geforderten Spritzbetonförderleistung von 10 fm<sup>3</sup>/h Kosten von 15,4 Euro/fm<sup>3</sup>.

Beim System NSDI-E müssen noch zwei zusätzliche Gerätefahrer für die beiden Fahrmischer berücksichtigt werden, es ergeben sich Kosten von insgesamt 22,4 Euro/fm<sup>3</sup>.

⇒ Sonstige Kosten

Die sonstigen Kosten berücksichtigen jene Kosten, die sich aus dem Verschleiß des Spritzbetonmanipulators, der Schläuche und Düsen ergeben und werden entsprechend den Ansätzen der Diplomarbeit von A. Strubreiter [16] mit 6,6 Euro/fm<sup>3</sup> Spritzbeton angenommen. Für den Verschleiß ist die Art der Versorgung mit Spritzbeton (Eigen- oder Fremdversorgung) unbedeutend, daher werden die sonstigen Kosten für beide Verfahren in der gleichen Höhe angesetzt.

⇒ Zeitgebundene Baustellengemeinkosten

In den baustellenspezifischen Randbedingungen wird die Forderung nach einer Mindestspritzbetonförderleistung von 10 fm<sup>3</sup>/h getroffen. Die maximale Förderleistung des Nassspritzverfahrens im Dicht-

strom lässt sich aus der Literatur mit ca. 20 Kubikmeter lose pro Stunde (das entspricht ca. 18 fm<sup>3</sup>/h bei einem Verdichtungsfaktor von f=1,10) angeben, d.h. beide Verfahren erfüllen diese Anforderung auf jeden Fall.

Höhere Spritzbetonleistungen bedingen schnellere Vortriebsleistungen und damit kürzere Vortriebsdauern. Damit hat das gewählte Spritzbetonverfahren auch einen wesentlichen Einfluss auf die Vortriebsdauer und auf die Vergütung der zeitgebundenen Baustellengemeinkosten. Für einen ganzheitlichen monetären Vergleich der Spritzsysteme müssen diese Auswirkungen auf die zeitgebundenen Baustellengemeinkosten ebenfalls berücksichtigt und auf einen Festkubikmeter Spritzbeton umgelegt werden.

Der Faktor "Versorgungssicherheit" berücksichtigt Unwägbarkeiten über die gesamte Vortriebsdauer, die aus der unterschiedlichen Mischgutzulieferung der einzelnen Spritzbetonsysteme resultieren. Eine eigene Baustellenmischanlage weist z.B. hinsichtlich der Versorgungssicherheit gegenüber einer externen Mischanlage Vorteile auf, weil im Allgemeinen von der Mischanlage zum Einbauort keine große Fahrdistanzen zu überwinden sind und auch keine sonstigen externen Abhängigkeiten (z.B. Verkehrsstau, Fehler bei der Betonbestellung) bestehen. Im Beispiel wird der Faktor für das System NSDI-F daher mit dem Wert "0,90" bzw. für das System NSDI-E mit dem Wert "0,95" berücksichtigt.

Der Faktor "Betriebsunterbrechung" berücksichtigt die Störanfälligkeit von Systemen, also z.B. die Häufigkeit von "Stopfern" oder Geräteausfällen. Nachdem beim Nassspritzverfahren im Dichtstrom die Förderung hydraulisch erfolgt, ist die Gefahr von "Stopfern" als eher gering einzustufen. Durch

	NSDI-F	NSDI-E
Mittleres Spritzbetonvolumen pro Abschlag	10,8 fm <sup>3</sup>	10,8 fm <sup>3</sup>
Theoretische Spritzbetonförderleistung	12,0 fm <sup>3</sup> /h	12,0 fm <sup>3</sup> /h
Faktor „Versorgungssicherheit“ (vgl. [16])	0,9	0,95
Faktor „Betriebsunterbrechung“ (vgl. [16])	0,95	0,95
Tatsächliche Spritzbetonförderleistung	10,3 fm <sup>3</sup> /h (=12,0*0,90*0,95)	10,8 fm <sup>3</sup> /h (=12,0*0,95*0,95)
Mittlere Spritzzeit pro Abschlag	1,05 h (=10,8/10,3)	1,00 h (=10,8/10,8)
Gesamtanzahl der Abschläge	3.000 Stk.	3.000 Stk.
Spritzzeit [h] über die Vortriebsdauer	3.150 h (=3000*1,05)	3.000 h (=3000*1,0)
<b>Spritzzeit [Monat] über Vortriebsdauer</b>	<b>4,69 Monate</b> (=3.150/24*28)	<b>4,46 Monate</b> (=3.000/24*28)
Zeitgebundene Baustellengemeinkosten (ZGBK)	130.000 €/Monat	130.000 €/Monat
Vergütung der ZGBK über die Spritzzeit	609700	579800
<b>Umlage der ZGBK auf 29.400 fm<sup>3</sup> Spritzbeton</b>	<b>20,7 €/fm<sup>3</sup></b>	<b>19,7 €/fm<sup>3</sup></b>

Tab. 5: Berücksichtigung der zeitgebundenen Baustellengemeinkosten

die Art der Mischgutzulieferung wird dieser Faktor nicht beeinflusst und im gegenständlichen Beispiel daher mit einem Wert von "0,95" berücksichtigt.

Die Vorgangsweise wird im Beispiel für einen "mittleren" Abschlag in der Tabelle 5 gezeigt.

Durch die Berücksichtigung der Einflussparameter "Versorgungssicherheit" bzw. "Betriebsunterbrechung" ergeben sich für die Systeme NSDI-F und NSDI-E unterschiedliche tatsächliche Spritzbetonförderleistungen. Im Beispiel führt das zu einer Verkürzung der Bauzeit um ca. 0,23 Monate beim System NSDI-E. Bei einer pauschalen Vergütung der zeitgebundenen Baustellengemeinkosten mit 130.000 Euro/Monat ergeben sich - umgelegt auf 29.400 Festkubikmeter Spritzbeton - für System NSDI-F Mehrkosten von 1,0 Euro/fm<sup>3</sup>.

6. Nutzwertanalyse

Nach Zangemeister [11] ist eine Nutzwertanalyse die Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen (entspricht im gegenständlichen Fall den Auswahlmöglichkeiten an Spritzbetonsystemen für ein Tunnelbauprojekt) mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers (= Bewertung der Beurteilungsaspekte und -kriterien) bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen. Die Abbildung dieser Ordnung erfolgt durch die Angabe der Nutzwerte (Gesamtwerte) der Spritzbetonsysteme und soll - inklusive einer übersichtlichen Darstellung des Entscheidungsfindungsprozesses - letztendlich eine gute Grundlage für die Auswahl eines Spritzbetonsystems darstellen.

Der schematische Ablauf einer Nutzwertanalyse zeigt sich in Bild 8. Die prinzipielle Vorgangsweise bei der Anwendung dieser Systematik bei der Auswahl eines Spritzbetonverfahrens wird in diesem Kapitel schrittweise anhand von Beispielen für unterschiedliche Spritzbetonsysteme (TM-F, FMS-F und NSDI-F) gezeigt.

Unter dem Zielprogramm wird die geordnete Darstellung von allgemeinen und speziellen, projektbezogenen Zielen verstanden. Eine mögliche Zielsetzung des Anwenders wäre z.B. die Auswahl eines Spritzbetonverfahrens mit dem geringsten Rückprallwert. Bei der Anwendung des Systems werden entsprechende Beurteilungsaspekte bzw. deren vertiefende Beschreibung durch die Beurteilungskriterien nach der bestmöglichen Erfüllung der Zielsetzung (im gegenständlichen Fall: "Rückprall") untersucht.

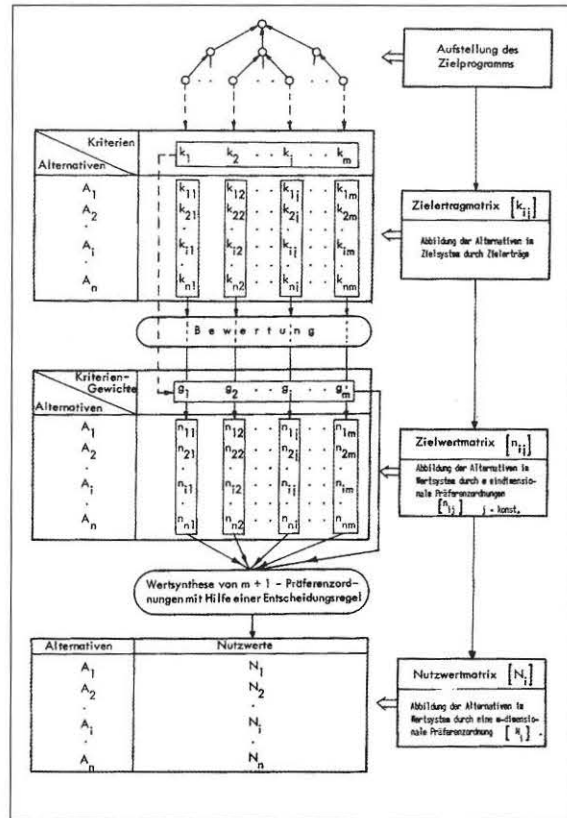


Bild 8: Schematische Darstellung des Ablaufes einer Nutzwertanalyse [11]

Gleichzeitig mit der Erstellung des Zielprogramms wird auch die Zielhierarchie festgelegt, d.h. die Ziele werden nicht nur nach Beurteilungsaspekten und -kriterien geordnet, sondern auch in Hinblick auf ihre Bedeutung bei der Auswahl eines Spritzbetonsystems gewichtet. Damit soll im Zuge des Bewertungsverfahrens z.B. der Beurteilungsaspekt "Wirtschaftlichkeit" gegenüber dem Beurteilungsaspekt "Betontechnologie" unterschiedlich stark berücksichtigt werden können (vgl. Tabelle 6 - Faktor 60 für "Wirtschaftlichkeit" bzw. Faktor 10 für "Betontechnologie").

Die Struktur eines Zielprogramms bzw. die Zielhierarchie mit einer beispielhaften Gewichtung der Beurteilungsaspekte (eine Eichung der Gewichtung

Stufe	Nr.	Zielprogramm Beurteilungsaspekte „Spritzbetonsysteme“	Gewichtung
1	1	Baubetrieb	15
1	2	Baustelleneinrichtung	10
1	3	Betontechnologie	10
1	4	Sicherheit- und Gesundheitsschutz	5
1	5	Wirtschaftlichkeit	60
		<b>Summe</b>	<b>100</b>

Tab. 6: Zielprogramm der Beurteilungsaspekte



soll anhand von ausgewählten Tunnelbauprojekten erfolgen) lässt sich in einfachster Form (Tabelle 6) darstellen.

Mit der Bezeichnung "Stufe 1" in der Tabelle 6 wird die oberste Ebene in der Zielhierarchie gemeint, darunter werden also übergeordnete Oberziele (= Beurteilungsaspekte) verstanden. Die Summe der Gewichtungsfaktoren muss je Stufe immer den Wert 100 ergeben. In der "Stufe 2" werden die Beurteilungskriterien den Oberzielen zugeordnet und ebenfalls nach ihrer Bedeutung gewichtet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Beurteilungskriterien (also die Stufe 2) und deren Gewichtung in der Tabelle 6 allerdings nicht explizit angeführt.

Nach der Erstellung eines Zielprogramms und der Festlegung der Zielhierarchie werden in einem nächsten Schritt Zielertragsmatrizen für die einzelnen Beurteilungsaspekte erstellt. Die Zielertragsmatrix für die Baustelleneinrichtung wird für vier unterschiedliche Spritzbetonsysteme im Kapitel 4.2 (Tabelle 2) dargestellt. Dabei wird unter einem Zielertrag ein "Matrixkästchen" mit numerischem oder verbalem Inhalt verstanden, d.h. ein Zielertrag beschreibt ein Spritzbetonsystem bezüglich eines bestimmten Beurteilungskriteriums.

Beispielhaft wird ein zeilenweiser Auszug aus der Zielertragsmatrix "Baubetrieb" in der Tabelle 7 dargestellt. Der Zielertrag für das Beurteilungskriterium "Rückprall" (in diesem Fall wird der Zielertrag als numerischer Wert beschrieben) ergibt sich für das Trockenspritz- bzw. für das Nassspritzverfahren mit [1]:

Zielertrag	Spritzbetonverfahren (Bezeichnung nach Abbildung 2)		
	TM	FMS	NSDI
Rückprall	40%	22%	15%

Tab. 7: Zeilenweiser Auszug aus der baubetrieblichen Zielertragsmatrix für den Rückprall

In einem nächsten Schritt erfolgt nun eine schrittweise Bewertung der Zielerträge nach einem festgelegten Schlussfolgerungsmechanismus. Jedem Bewertungsvorgang liegt dabei eine Zeile der Zielertragsmatrix als sachliche Informationsbasis zugrunde, das Beurteilungskriterium "Rückprall" bewegt sich beispielsweise in Abhängigkeit des Spritzbetonsystems innerhalb einer Bandbreite von 15 bis 40 % (vgl. Tabelle 7).

Die Spritzbetonsysteme werden zunächst in der sogenannten Zielwertmatrix hinsichtlich der Beurteilungsaspekte bzw. der untergeordneten Beurteilungskriterien nach Rängen geordnet. Dem geeignetsten System entspricht unter Berücksichtigung einer verbal oder numerisch beschriebenen Zielsetzung der erste Rang und dem schlechtgeeignetsten System der letzte Rang. Für das Beurteilungskriterium "Rückprall" ergibt sich mit Hilfe der Tabelle 7 und unter Berücksichtigung des Schlussfolgerungsmechanismus (entspricht der Forderung nach dem geringsten Rückprallwert) folgende Rangordnung:

Rangordnung	Spritzbetonverfahren (Bezeichnung nach Abbildung 2)		
	TM	FMS	NSDI
Rückprall	Rang 3	Rang 2	Rang 1

Tab. 8: Zeilenweiser Auszug aus der baubetrieblichen Zielwertmatrix für den Rückprall

Auf der Grundlage der Zielwertmatrix erfolgt mit Hilfe dieser ordinalen Präferenzordnung (d.h. die Reihung der Verfahren erfolgt nach Rängen) nun eine Reihung der Alternativen nach der Rangsummenregel. Die zugeordneten Rangplätze der einzelnen Beurteilungskriterien werden getrennt nach Beurteilungsaspekten in der entsprechenden Zielwertmatrix spaltenweise aufsummiert und gewichtet. Unter der Berücksichtigung des vorab definierten Zielprogramms (Tabelle 6) und einer Zielwertmatrix für ein fiktives Tunnelbauprojekt ermittelt sich damit die Reihung dreier ausgewählter Spritzbetonsysteme nach der Rangsummenregel beispielsweise analog Tabelle 9.

	Gewichtung	Rangordnung Spritzbetonverfahren		
		TM	FMS	NSDI
Baubetrieb	15	1	3	2
Baustelleneinrichtung	10	1	2	3
Betontechnologie	10	1	3	2
Sicherheit- und Gesundheitsschutz	5	3	2	1
Wirtschaftlichkeit	60	2	3	1
Rangsumme = Nutzwert		170	285	145

Tab. 9: Ordinale Zielwertmatrix der Beurteilungsaspekte - Nutzwertbestimmung

Die Rangsumme ermittelt sich - unter Berücksichtigung der Gewichtung der entsprechenden Beurteilungskriterien) für das Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut zu einem Wert von 170 (= 15\*1 + 10\*1 + 10\*1 + 5\*3 + 60\*2). Die niedrigste Rangsumme stellt nach dieser Methode den höchsten Nutzwert da. Damit wäre in diesem Fall das Nassspritzverfahren im Dichtstrom den anderen beiden Verfahren vorzuziehen.

## 7. Ergebnis

In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Geotechnik an der Universität für Bodenkultur soll

eine benutzerfreundliche Software zur Auswahl eines geeigneten Spritzbetonverfahrens im Tunnel- und Stollenbau für den Praktiker entwickelt werden. Dem Anwender soll mit der Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems nicht nur eine Wissensdatenbank über die einzelnen Verfahren zur Verfügung gestellt werden, sondern auch eine schlüssige und nachvollziehbare Bewertung der einzelnen Verfahren nach der Methode der Nutzwertanalyse für ein bestimmtes Tunnelbauprojekt ermöglicht werden.

Durch die Erarbeitung von festgelegten Beurteilungsaspekten und untergeordneten Beurteilungskriterien soll eine ganzheitliche Bewertung der Eignung möglicher Verfahren hinsichtlich Baubetrieb, Baustelleneinrichtung, Betontechnologie, Sicherheit- und Gesundheitsschutz bzw. Wirtschaftlichkeit gewährleistet werden. Flussdiagramme zur Darstellung baubetrieblicher Abläufe und Musterkalkulationen sollen nicht nur eine transparente Aufbereitung von Entscheidungsgrundlagen ermöglichen, sondern auch potentielle Fehlermöglichkeiten minimieren und dem Anwender wesentliche Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren nach verschiedenen Beurteilungsaspekten aufzeigen.

Die prinzipielle Vorgangsweise bei der Anwendung einer Nutzwertanalyse zur Lösung eines komplexen Problems, sowie die Reihung von Alternativen nach der Rangsummenregel und die gewichtete Ermittlung von Nutzwerten wird im gegenständlichen Artikel beispielhaft dargestellt. Durch die Ermittlung von Nutzwerten soll dem Anwender übersichtlich und möglichst einfach eine Beurteilung der Spritzbetonverfahren für ein Tunnelbauprojekt ermöglicht werden.

Der Aufbau eines Entscheidungshilfesystems zur Auswahl des optimal geeigneten Spritzbetonverfahrens im Tunnelbau soll den Versuch darstellen, dem Bauleiter oder Kalkulanten bei der Entscheidungsfindung für ein klar abgegrenztes Teilgebiet des Tunnelbaus einen strukturierten, checklistenartigen und möglichst benutzerfreundlichen Problemlösungsansatz anzubieten. Für den zukünftigen Einsatz des Entscheidungshilfesystems sind die Gewichtungen der Beurteilungsaspekte und -kriterien noch an ausgeführten Referenzprojekten bzw. durch Gespräche mit Experten zu eichen. Damit soll schlussendlich die Praxistauglichkeit des Entscheidungshilfesystems mit Fakten unterlegt werden können.

## 8. Literaturverzeichnis

### [1] BM für wirtschaftliche Angelegenheiten:

Bewertung von neuentwickelten Spritzbeton-

verfahrenstechniken. Straßenforschung - Heft 474, 1998.

### [2] BINAS:

Ein Entscheidungshilfesystem für die Bestandsanalyse von Bauwerken.

### [3] Gehri, M.:

Computerunterstützte Baustellenführung. Dissertation am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft. ETH-Zürich, 1992.

### [4] Sohni, M.:

Entwicklung eines Expertensystems zur Beurteilung. Beseitigung und Vorbeugung von Oberflächenschäden an Betonbauteilen. Dissertation am Institut für Massivbau, Technische Hochschule Darmstadt, 1992.

### [5] Schnupp, P.; Leibbrandt, U.:

Expertensysteme - nicht nur für Informatiker. Springer-Verlag, 1986.

### [6] Bremer, A.:

Expertensysteme. Vortrag beim Seminar Datenverarbeitung, Lehrstuhl Datenverarbeitung, Ruhr-Universität Bochum, 2000.

### [7] Diederichs, C.J.:

Expertensysteme zur Lösung bauwirtschaftlicher und baubetrieblicher Probleme. Bauwirtschaft Heft 2, 1988.

### [8] Schnupp, P.; Nguyen Huu, C.T.:

Expertensystem-Praktikum, Springer Verlag, 1987.

### [9] Snizek, S.; Koch, H.; Prem, J.:

Handbuch Entscheidungshilfen. BMVIT - Straßenforschung, Heft 514, 2001.

### [10] Oberndorfer, W.; Jodl, H.G.; et. al.:

Handwörterbuch der Bauwirtschaft. Österreichisches Normungsinstitut, 2001.

### [11] Zangemeister, C.:

Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Verlag Wittmannsche Buchhandlung, 1973.

### [12] Österreichischer Betonverein:

Richtlinie Spritzbeton. Ausgabe 1998.

### [13] Goger, G.; Jodl, H.G.:

Skriptum "Ausgewählte Bauverfahren". Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, TU - Wien, 2001.

- [14] **ÖNORM B 2203-1:**  
Untertagebauarbeiten. Werkvertragsnorm.  
Stand 12.01.2001.
- [15] **Fenves, S.:**  
What is an Expert System. Expert Systems in  
Civil Engineering, ASCE, In Kostem and  
Maher - pp. 1 - 6, New York 1986.
- [16] **Stubreiter, A.:**  
Wirtschaftlichkeitsvergleich von verschiedenen  
Spritzbetonverfahren im Tunnelbau. Diplomarbeit - Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft,  
Universität Innsbruck, 1998.