

DISSERTATION

AUSWAHLVERFAHREN FÜR SPRITZBETONSYSTEME FÜR ZYKLISCHE TUNNELVORTRIEBE

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

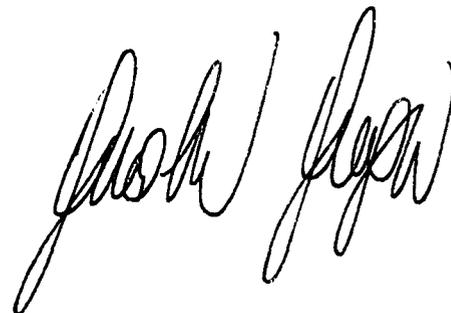
o.Univ.Prof. DI Dr.techn. Hans Georg Jodl
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dipl.-Ing. Gerald Goger

Matr.Nr.: 89 25 397
Rennbahnweg 27/10/1/10
1222 Wien



Wien, im Mai 2003

DANKSAGUNG

Der Brockhaus definiert den Begriff „Dissertation“ (lateinisch: Inauguraldissertation) *als selbstständige, schriftliche wissenschaftliche Abhandlung, die für die Zulassung zum Promotionsverfahren (Erwerb des Doktorgrades) an wissenschaftlichen Hochschulen gefordert wird.*

Auch wenn die Erarbeitung einer Dissertation entsprechend der angeführten Definition selbständig erfolgt, braucht es für das Gelingen neben persönlicher Zielstrebigkeit vor allem zahlreicher Fürsprecher, Kollegen und Freunde. Erst durch die Unterstützung aus diesem persönlichen Umfeld können „wissenschaftliche Krisen“ während der mehrjährigen Bearbeitung überwunden und immer wieder neue Motivation gewonnen werden.

Für die wissenschaftliche Betreuung meiner Dissertation möchte ich mich an dieser Stelle vor allem bei meinen „Doktorvätern“ **Prof. Jodl** und **Prof. Kusterle** bedanken. Mit wertvollen Anregungen, Fragestellungen und Ergänzungen haben sie wesentlich zum Gelingen der wissenschaftlichen Arbeit beigetragen. Außerdem ist mir Prof. Jodl während meiner Zeit als Mitarbeiter am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft immer als „väterlicher Freund“ in den unterschiedlichsten Angelegenheiten mit Rat und Tat zur Verfügung gestanden. Als ehemaliger Mitarbeiter des Institutes bin ich auch **Prof. Oberndorfer** zu großem Dank verpflichtet, der mir sehr viel bauwirtschaftliches Wissen mit auf den Weg gegeben hat.

Weiters möchte ich **Dr. Huber** meinen Dank aussprechen, der mich durch sein aufmunterndes Lob nach Durchsicht der ursprünglichen Unterlagen sehr zur Weiterbearbeitung des Themas angespornt hat. Einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Arbeit hat auch mein Freund **Peter Krammer** geleistet, der durch zahlreiche - manchmal schon lästige - Fragen zum Bearbeitungsstand der Dissertation immer und immer wieder „sanften“ Druck auf mich ausgeübt und mich so zur Fertigstellung der Arbeit angetrieben hat.

Ganz besonders möchte ich meinen **Eltern** danken, die mir die Möglichkeit zu einem Studium überhaupt erst ermöglicht haben und mich während meiner gesamten Ausbildungszeit immer finanziell und moralisch unterstützt haben.

Schlussendlich möchte ich noch einen „Oscar für die beste weibliche Hauptrolle“ an meine Freundin **Ljuba** verleihen, die nicht nur die gesamte Arbeit kritisch Wort für Wort durchgelesen hat, sondern mich durch alle Höhen und Tiefen begleitet und letztendlich entscheidenden Anteil am Abschluss der Arbeit hat.

KURZFASSUNG

Im ersten Kapitel wird das Forschungsziel der gegenständlichen Arbeit erläutert, es geht dabei um die Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems zur Auswahl von geeigneten Spritzbetonsystemen im Tunnel- und Stollenbau. Damit soll dem Benutzer einerseits „Expertenwissen“ zur Verfügung gestellt werden und andererseits eine strukturierte und klar nachvollziehbare Vorgangsweise bei der Problemlösung angeboten werden. Die allgemeine Struktur, die Anwendungsgebiete und -grenzen von **Entscheidungshilfesystemen** werden im zweiten Kapitel erläutert.

Im dritten Kapitel „**Spritzbetonverfahren**“ wird zunächst ein Überblick über die insgesamt acht analysierten Spritzbetonverfahrenstechniken gegeben. Als Grundlage für eine weiterführende Musterkalkulation werden in diesem Abschnitt für die einzelnen Spritzbetonsysteme übersichtliche Flussdiagramme entwickelt, die den baubetrieblichen Ablauf von der Anlieferung der Spritzbetonausgangsstoffe bzw. des Mischgutes zur Baustelle, über die Verarbeitung des Mischgutes vor Ort bis zum eigentlichen Spritzbetonauftrag lückenlos darstellen.

Die Erfassung von wesentlichen Beurteilungskriterien zur Auswahl von Spritzbetonsystemen erfolgt im Kapitel „**Erfassung von Beurteilungskriterien**“. Es werden dabei relevante Beurteilungskriterien für die Entscheidungsfindung herausgearbeitet und übersichtlich in Matrixform dargestellt. Durch die Berücksichtigung verschiedenster Kriterien bei der Entscheidungsfindung soll eine ganzheitliche Bewertung der Spritzbetonsysteme möglich sein.

Im Kapitel „**Musterkalkulation**“ werden die Kosten – auf Basis der baubetrieblichen Flussdiagramme und der ausgeschriebenen Vortriebsklassenverteilung des zyklischen und zeitkritischen Kalottenvortriebes - für einen Losekubikmeter Spritzbeton ermittelt. Das **Tabellenkalkulationsprogramm „Musterkalkulation“** (s. beiliegende CD-Rom) gibt bereits Richtwerte für Kostenansätze vor, die vom jeweiligen Anwender aber an die baustellenspezifischen Randbedingungen angepasst werden können.

Nach der Berechnung der Kosten für einen Losekubikmeter Spritzbeton werden sämtliche Spritzbetonsysteme einer ganzheitlichen Bewertung mittels einer **Nutzwertanalyse** mit dem **Tabellenkalkulationsprogramm „Zielwertmatrizen“** (s. beiliegende CD-Rom) unterzogen.

Im letzten Kapitel der Arbeit wird eine **Systemanwendung** durchgeführt, um die Plausibilität der Berechnungs- und Auswertungsergebnisse des Auswahlverfahrens bewerten zu können.

ABSTRACT

In the first chapter the research objective of this dissertation – the development of a decision-making support system for shotcrete processes in tunnel construction - is described. The target should be a user-friendly software application for the tunnel construction engineer. The structure and the range of application of such decision-making support systems is given in chapter 2.

An overview of shotcrete processes for a total of 8 analysed shotcrete systems is worked out in chapter 3. Flow charts for each shotcrete system display the operating sequences while shotcreting and build on this account the base for the sample calculations.

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 management, and of sample calculations for the estimation of economic factors.

Other significant parameters that cannot be quantified in financial terms (such as flexibility of a method, for instance) are likewise involved in the holistic 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.

In the last chapter of this dissertation an implementation of this system is carried out, to verify the plausibility of the results given by the decision making system.

Inhaltsverzeichnis

I	Einleitung.....	7
I.1	Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit.....	7
I.2	Begriffsbestimmungen.....	8
I.3	Abkürzungen.....	13
II	Experten- bzw. Entscheidungshilfesysteme	14
II.1	Definition.....	14
II.2	Unterschied zu konventionellen Programmen.....	15
II.3	Zielsetzung.....	16
II.4	Entwicklung.....	18
II.5	Struktur	20
II.5.1	Wissensbasis (knowledge base).....	20
II.5.2	Schlussfolgerungsmechanismus (inference machine):.....	20
II.5.3	Erklärungskomponente (explanation component)	20
II.5.4	Dialogteil (dialog management)	21
II.5.5	Wissensakquisition (knowledge acquisition)	21
II.5.6	Systemarchitektur.....	21
II.6	Klassifikation	23
II.6.1	Auskunftssysteme	23
II.6.2	Diagnosesysteme	23
II.6.3	Reparatursysteme	24
II.6.4	Vorhersagesysteme.....	24
II.6.5	Planungssysteme	24
II.6.6	Überwachungssysteme	24
II.6.7	Ausbildungssysteme.....	24
II.7	Anwendungsgebiete.....	25
II.7.1	REPCON – Beurteilung, Beseitigung und Vorbeugung von Oberflächenschäden an Betonbauteilen.....	26
II.7.2	BINAS – Bauwerksinspektions- und Analysesystem	27
II.8	Grenzen und Probleme	30
III	Spritzbetonverfahren.....	32
III.1	Geschichtliche Entwicklung.....	32
III.1.1	Überblick	32
III.1.2	Trockenspritzverfahren	32
III.1.3	Nassspritzverfahren.....	34
III.2	Anwendungsübersicht für Europa.....	35
III.2.1	Skandinavien (Schweden, Norwegen)	35
III.2.2	Schweiz.....	36
III.2.3	Deutschland	36
III.2.4	Österreich.....	37
III.2.5	Schlussfolgerung	38
III.3	Verfahrenstechnik	39
III.3.1	Überblick	39
III.3.2	Trockenspritzverfahren mit Trockenmischgut.....	41
III.3.3	Trockenspritzverfahren mit lagerfähigem Feuchtmischgut (FM-L).....	44
III.3.4	Trockenspritzverfahren mit sofort anwendbarem Feuchtmischgut (FM-S).....	47
III.3.5	Nassspritzverfahren (Dichtstrom).....	50
III.3.6	Nassspritzverfahren (Dünnstrom).....	53
IV	Erfassung von Beurteilungskriterien.....	55
IV.1	Überblick.....	55
IV.2	Verfahrensunabhängige Beurteilungskriterien	58
IV.2.1	Spritzbetonsorte	58
IV.2.2	Tunnelgeometrie.....	63
IV.2.3	Konstruktionsvarianten für den Schalenaufbau.....	66
IV.2.4	Geologie.....	69
IV.2.5	Bergwasser	74
IV.2.6	Projektstandort	76
IV.3	Baubetrieb.....	80
IV.3.1	Ausbruchs- und Vortriebsart	80
IV.3.2	Dosiertechnik.....	86
IV.3.3	Einsatzbereich.....	89
IV.3.4	Flexibilität und Verfügbarkeit.....	91
IV.3.5	Förderung, Förderleitung und Förderleistung.....	95
IV.3.6	Gerätedisposition.....	99
IV.3.7	Nachbearbeitung der Spritzbetonschale (Ebenflächigkeit)	104
IV.3.8	Personaldisposition.....	105
IV.3.9	Reinigung und Wartung der Spritzbetongeräte	108
IV.3.10	Restmengen	110
IV.3.11	Rückprall	111
IV.3.12	Spritzdüse, Benetzungstechnik und Düsenführung	116
IV.3.13	Störungsanfälligkeit	123
IV.3.14	Verschleiß.....	125
IV.3.15	Wintertauglichkeit	127
IV.3.16	Zusammenfassung	128

IV.4	Baustelleneinrichtung	132
IV.4.1	Art der Lagerung – Bindemittel und Gesteinskörnung	132
IV.4.2	Art der Lagerung – Mischgut	134
IV.4.3	Baustelleneigene Betonmischanlage	135
IV.4.4	Baustelleneigene Gesteinskörnungsaufbereitung und -trocknung	139
IV.4.5	Bewetterung	141
IV.4.6	Druckluft- und Energiebedarf	142
IV.4.7	Materialtransport und Materialumschlag	144
IV.4.8	Platzbedarf – Baustelleneinrichtung und Vortrieb	145
IV.4.9	Zusammenfassung	146
IV.5	Betontechnologie	148
IV.5.1	Bindemittel	148
IV.5.2	Frühfestigkeit	150
IV.5.3	Endfestigkeit	153
IV.5.4	Mischgut	155
IV.5.5	Verarbeitungstemperatur	157
IV.5.6	Verarbeitungszeit	158
IV.5.7	Wasser-Bindemittel-Wert	159
IV.5.8	Zugabewasser	160
IV.5.9	Zusatzmittel	160
IV.5.10	Zusatzstoffe	162
IV.5.11	Gesteinskörnung	163
IV.5.12	Zusammenfassung	164
IV.6	Arbeitssicherheit, Umwelt- und Gesundheitsschutz	166
IV.6.1	Arbeitsplatzbedingungen – Belastungen des Düsenführers	166
IV.6.2	Elution	168
IV.6.3	Qualitätsmanagement – Datenerfassung	169
IV.6.4	Staub	171
IV.6.5	Zusammenfassung	175
V	Musterkalkulation	177
V.1	Grundlagen	177
V.1.1	Abschlagsdauer, Spritzleistung und Vortriebsleistung	177
V.1.2	Berechnungsformeln	178
V.1.3	Berechnungsbeispiel	180
V.1.4	Aufbau der Musterkalkulation	182
V.2	Kalkulationsprogramm	184
V.2.1	Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“	184
V.2.2	Tabellenblatt „Weitere Kalkulationsparameter“	186
V.2.3	Tabellenblatt „Mischgutrezeptur“	186
V.2.4	Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“	188
V.2.5	Tabellenblatt „Spritzbetongeräte“	191
V.2.6	Tabellenblatt „Vortriebspersonal“	191
V.2.7	Tabellenblatt „Wirtschaftlichkeitsvergleich“	194
VI	Bewertung der Einflussparameter	196
VI.1	Nutzwertanalyse	196
VI.2	Nutzwertermittlung	202
VI.2.1	Tabellenblatt „Zielprogramm“	202
VI.2.2	Tabellenblatt „Baubetrieb“	202
VI.2.3	Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“	205
VI.2.4	Tabellenblatt „Betontechnologie“	207
VI.2.5	Tabellenblatt „Arbeitssicherheit und Datenerfassung“	207
VI.2.6	Tabellenblatt „Wirtschaftlichkeit“	209
VI.2.7	Tabellenblatt „Nutzwertermittlung“	209
VII	Systemanwendung	211
VII.1	Allgemeines	211
VII.2	Auswertung	213
VII.2.1	„Großer“ Tunnelquerschnitt und standfestes Gebirge	214
VII.2.2	„Großer“ Tunnelquerschnitt und nachbrüchiges Gebirge	215
VII.2.3	„Kleiner“ Tunnelquerschnitt und standfestes Gebirge	217
VII.2.4	„Kleiner“ Tunnel und nachbrüchiges Gebirge	218
VII.2.5	Schlussfolgerungen	219
VIII	Ausblick	221
VIII.1	Zusammenfassung	221
VIII.2	Schlussfolgerungen	225
IX	Verzeichnisse	227
IX.1	Literatur	227
IX.1.1	Expertensysteme - Entscheidungshilfesysteme	227
IX.1.2	Spritzbetonverfahren	227
IX.1.3	Erfassung von Einflussparametern	228
IX.1.4	Musterkalkulation	232
IX.1.5	Bewertung der Einflussparameter	232
IX.2	Abbildungen	233
IX.3	Tabellen	234
X	Anhang	

I Einleitung

I.1 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

Das **Forschungsziel** der gegenständlichen Arbeit ist die Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems für Spritzbetonverfahren im Tunnel- und Stollenbau. Es soll sich dabei um eine benutzerfreundliche Softwareentwicklung für Praktiker (Bauleiter, Geschäftsführer) handeln, mit der die einzelnen Spritzbetonverfahren nach unterschiedlichen Kriterien durchgerechnet und miteinander verglichen werden können.

Neben der Berücksichtigung der projektspezifischen Randbedingungen, werden die jeweiligen Verfahren hinsichtlich Baubetrieb, Baustelleneinrichtung, Betontechnologie, Sicherheit bzw. Gesundheitsschutz und Wirtschaftlichkeit analysiert und bewertet. Durch die strukturierte und checklistenartige Vorgangsweise bei der Entscheidungsfindung sollen potentielle Fehlermöglichkeiten minimiert und die Überlegungen zur endgültigen Auswahl eines Verfahrens transparent und lückenlos nachvollziehbar dargestellt werden.

Dem fachkundigen Ingenieur soll mit diesem neuentwickelten System eine objektive (mit Faktenwissen belegbare) Auswahl des bestgeeigneten Spritzbetonverfahrens für ein konkretes Tunnel- oder Stollenbauprojekt ermöglicht werden.

Das **Arbeitsprogramm** bei der Entwicklung des Entscheidungshilfesystems gliedert sich grob in folgende Schwerpunktsbereiche:

- Analyse der einzelnen Spritzbetonverfahrenstechniken (Trockenspritzverfahren mit erdfeuchtem bzw. ofentrockenem Mischgut, Nassspritzverfahren).
- Ermittlung maßgeblicher Entscheidungskriterien bei der Auswahl eines Spritzbetonverfahrens im Tunnel- und Stollenbau. Die ermittelten Entscheidungskriterien werden hinsichtlich Baubetrieb, Baustelleneinrichtung, Betontechnologie, Sicherheit bzw. Gesundheitsschutz und Wirtschaftlichkeit gegliedert.
- Bewertung der gewählten Entscheidungskriterien.
- Modellbildung für die einzelnen Spritzbetonverfahren und Entwicklung des Entscheidungshilfesystems.
- Überprüfung der Plausibilität der Vorschläge des Entscheidungshilfesystems an Hand unterschiedlicher Referenzprojekte.

1.2 Begriffsbestimmungen

- **Abschlag [38]:** in einem Zyklus geschaffener Teil des Hohlraumes.
- **Abschlagslänge [38]:** mittlere Tiefe des Abschlages.
- **Auftragsfläche [34]:** Untergrund zum Auftragen des Spritzbetons.
- **Basisvortrieb [38]:** Vortriebsposition in m mit einer definierten Mindestmenge an Stützmitteln und Zusatzmaßnahmen.
- **Bindemittel [34]:** Zement und hydraulisch wirksame Zusatzstoffe.
- **Dichtstromförderung [34]:** bezeichnet eine Pumpförderung von Nass-Mischgut ohne Auflockerung in der Förderleitung.
- **Dünnstromförderung [34]:** bezeichnet eine pneumatische Förderung der Ausgangsmischung zur Einbaustelle, hier wird das aufgelockerte Trocken- oder Nass-Mischgut in Flugförderung von der Spritzmaschine zur Düse gefördert.
- **Elution [34]:** Auslaugung von löslichen Anteilen eines Feststoffes im Kontakt mit einer Flüssigkeit.
- **Eigenüberwachung [33]:** Die Güteüberwachung besteht aus Eigen- und Fremdüberwachung. Unter der Eigenüberwachung ist die werkseigene Produktionskontrolle zu verstehen. Die Ergebnisse der Eigenüberwachung sind zu dokumentieren und im Zuge der Fremdüberwachung von der Prüfstelle zu überprüfen.
- **Entscheidungshilfesystem [12]:** Es handelt sich dabei um interaktive, auf Computer basierende Systeme, die dem Anwender helfen sollen, zielgerichtet Entscheidungen zu treffen. Ein solches System soll für den Entscheidungsprozeß wichtige Daten auffinden und aufbereiten, um den Benutzer – unter Einhaltung einer strukturierten, klar nachvollziehbaren Vorgangsweise – bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen.
- **Erstarrungsbeschleuniger [34]:** pulverförmiges oder flüssiges Zusatzmittel zur beschleunigten Reaktion des Zementes im aufgetragenen Spritzbeton.
- **Expertensystem [7]:** Computerprogramm, das Problemstellungen mit einer einem Experten vergleichbaren Leistung lösen kann, insbesondere in Bereichen, wo das Wissen diffus ist und in denen langjährige Erfahrung zur Lösung von Aufgaben benötigt wird. Expertensysteme werden aber auch da eingesetzt, wo die algorithmische Lösung zu umfangreich wird, z.B. beim Schach. Ein Expertensystem sollte eine Dialogkomponente, eine Problemlösungskomponente, eine Erklärungskomponente, eine Wissensakquisitionskomponente, eine Wissensbasis und eine Inferenzkomponente besitzen.
- **Expertensystemschale [10]:** Darunter wird die Entwicklungsumgebung eines Expertensystems mit allen Komponenten bis auf die Wissensbank verstanden. Erst durch die Programmierung der Wissensdatenbank entsteht ein voll funktionsfähiges Expertensystem.

- **Expertenwissen [13]:** wird vom Experten beigesteuert. Es handelt sich um Wissen aus dem konkreten Anwendungsbereich. Liegt meist in Form von Regeln vor. Beispiel: „Wenn der Motor zu heiß ist, dann prüfe den Keilriemen.“
- **Feuchtmischgut [34]:** Mischgut für Trockenspritzverfahren unter Verwendung von feuchten Zuschlägen, Bindemittel, Zusätzen, Wasser (verfahrensbedingt), ev. auch Fasern.
- **Flexibilität:** Fähigkeit eines Spritzbetonsystems sich rasch an unterschiedliche Vortriebsbedingungen (z.B. Änderung des Gebirgsverhaltens, starke Zunahme des Bergwasserandrangs, Versorgung mehrerer Vortriebsorte) anzupassen.
- **Fremdüberwachung [33]:** Die Fremdüberwachung ist aufgrund eines Überwachungsvertrages vorzunehmen, der vom In-den-Verkehr-Bringer und (falls dieser nicht auch der Erzeuger ist) vom Hersteller mit derjenigen Prüfstelle abzuschließen ist, welche bereits die Erstprüfung durchgeführt hat. Für jede Bezugsnorm und jedes Herstellungswerk ist ein eigener Überwachungsvertrag auf unbestimmte Zeit abzuschließen, der einen eindeutigen und detaillierten Bezug auf die der Überwachung unterliegenden Produkte aufweisen muss.
- **Gebirge [38]:** Teil der Erdkruste, zusammengesetzt aus Festgestein (Fels) oder Lockergestein (Boden), einschließlich der Anisotropien, Trennflächen und Hohlräume mit Füllungen aus flüssigen oder gasförmigen Bestandteilen.
- **Gebirgsart [38]:** Gebirge mit gleichartigen Eigenschaften, wie geologische, hydrogeologische oder geotechnische Eigenschaften.
- **Gebirgsverhaltenstyp [38]:** Bezeichnung für ein Gebirge mit gleichartigem Verhalten in Bezug auf Ausbruch des Gesamtquerschnittes, auf zeitliche und räumliche Verformung und auf Versagensform, ohne Berücksichtigung von Stütz- und Zusatzmaßnahmen.
- **Heuristik [14]:** allgemeine Bezeichnung für ein Verfahren zum Finden einer Problemlösung. Bezeichnung für einzelne Regeln zum Herbeiführen einer Lösung in komplexen Denkbereichen, wobei eine Lösung jedoch nicht mit Sicherheit garantiert werden kann („Daumenregel“).
- **Junger Spritzbeton [34]:** Spritzbeton bis zum Alter von 24 Stunden (je nach Frühfestigkeitsklasse J₁, J₂, J₃).
- **Mehrausbruch [38]:** über das plangemäße Ausbruchsprofil hinausgehender Ausbruch.
- **Mischgut [34]:** das für das jeweilige Spritzverfahren bereitgestellte Gemisch.
- **Mixed Face-Bedingungen [38]:** Bedingungen bei einem Abschlag, in dem gleichzeitig Gesteine mit sehr unterschiedlichem Löseverhalten auftreten und ein Lösen mit

Sprengarbeit einerseits und Bagger oder Teilschnittmaschine (TSM) andererseits erforderlich ist.

- **Nassmischgut [34]:** Mischgut für Nassspritzverfahren (meist Pumpbeton), aus Zuschlägen, Bindemitteln, Wasser, eventuell Zusatzmitteln und Fasern.
- **Nassspritzbeton [34]:** Spritzbeton mit Nassmischgut (im allgemeinen bei Dichtstromverfahren: Pumpbeton) als Ausgangsmischung.
- **Nullbeton [34]:** Spritzbeton ohne Erstarrungsbeschleuniger zur Beurteilung der Veränderung der technologischen Eigenschaften (z.B. Festigkeitsabfall).
- **Öffnungslänge [38]:** maximale Länge des Ausbruches der Sohle vor Einbringen des Ausbaues.
- **Plangemäßes Ausbruchsprofil [38]:** im Regelquerschnitt definiertes erforderliches Ausbruchsprofil, einschließlich Übermaß.
- **Regelquerschnitt [38]:** geplanter Querschnitt eines Hohlraumbauwerkes.
- **Rückfall [34]:** jenes Gemisch aus Spritzbeton und Untergrund, das infolge mangelnder Abreißfestigkeit des Untergrundes nicht haftet.
- **Rückprall [34]:** jener Anteil des Spritzgemisches (Mischgut und Zugabewasser), der unmittelbar beim Aufbringen von der Auftragsfläche zurückprallt. Rückprall besteht zum überwiegenden Teil aus Gesteinskörnung, zu einem geringeren Teil aus Bindemittel und Anmachwasser.
- **Spritzbeton [34]:** Beton, der durch Spritzen mit hoher Auftreffgeschwindigkeit aufgetragen und bei diesem Vorgang verdichtet wird.
- **Spritzbetonlage [34]:** in einem ununterbrochenen Arbeitsgang hergestellter Spritzbetonauftrag.
- **Spritzbetonschale [34]:** räumlich ausgeformter, aus einer oder mehreren Schichten ausgeführter Bauteil aus Spritzbeton, der eine eigenständige temporäre oder dauerhafte Stütz- und Tragfunktion aufweist (z.B. Außenschale, Gewölbe).
- **Spritzbetonschicht [34]:** flächenhafter Bauteil mit definierter Mindestdicke, der sich aus einer oder mehreren Lagen aufbaut (z.B. Versiegelungsschicht).
- **Spritz-Bindemittel [34]:** Sammelbegriff für schnellerstarrende Bindemittel, die ohne weitere Zugabe von Zusatzmitteln (EB) das erforderliche Erstarren und rasche Festigkeitsentwicklung des Jungen Spritzbetons gewährleisten.
- **Spritzdüse [34]:** Ein Rohr mit einem Mischkörper für die Zugabe von Flüssigkeit und/oder Luft durch die das Mischgut die Förderleitung verlässt. Zugeleitet werden beim Trockenspritzverfahren Zugabewasser und gegebenenfalls pulverförmige oder flüssige Zusatzmittel und Zusatzstoffe, beim Nassspritzverfahren im Dichtstrom Luft und eventuell Zusatzmittel.

- **Standzeit [39]:** Zeitraum, während dessen das Gebirge nach dem Herstellen freier Flächen ohne Stützung standsicher bleibt.
- **Stollen [38]:** lang gestreckter, flach geneigter unterirdischer Hohlraum mit Ausbruchsquerschnitt bis 20 m².
- **Stützmaßnahmen [38]:** Vorkehrungen zur Stützung des Gebirges und zur Sicherung des Hohlraumes
- **Stützmittel [38]:** Elemente der Stützmaßnahmen wie Anker, Stahlbögen, Spritzbeton und Bewehrung.
- **Stützmittelzahl [38]:** Quotient aus der Summe der bewerteten Stützmittel pro Meter Tunnel und den jeweils zugehörigen Bewertungsflächen.
- **Systemverhalten [38]:** Verhalten des Gesamtsystems, resultierend aus Gebirge und gewählten Baumaßnahmen.
- **Teilflächen [38]:** Ausbrüche, die die jeweilige Ortsbrust unterteilen, über die Unterteilung in Teilquerschnitte hinausgehen und nach dem Öffnen sofortig eine Erstsicherung erfordern.
- **Teilquerschnitt [38]:** Unterteilung des plangemäßen Ausbruchsprofils zum Zwecke des Vortriebes. (Anmerkung: Auch ein Ulmenstollen kann aus mehreren Teilquerschnitten bestehen.)
- **Transportbeton [33]:** Beton, der in frischem Zustand durch eine Person oder Stelle geliefert wird, die nicht der Verwender ist. Transportbeton im Sinne dieser Norm ist auch vom Verwender außerhalb der Baustelle hergestellter Beton oder auf der Baustelle nicht vom Verwender hergestellter Beton.
- **Trockenmischgut [34]:** Mischgut für Trockenspritzverfahren unter Verwendung von trockenen Zuschlägen, Bindemittel, Zusätzen, Wasser (verfahrensbedingt), ev. auch Fasern.
- **Tunnel [38]:** langgestreckter, unterirdischer Hohlraum mit Ausbruchsquerschnitten über 20 m² vornehmlich für den Straßen- und Eisenbahnverkehr.
- **Tunnelzement [34]:** Ein für die Herstellung von Spritzbeton und Innenschalenbeton besonders geeigneter Zement.
- **Übermaß [38]:** Teil des plangemäßen Ausbruchsprofils, der den Zweck hat, die zu erwartenden Gebirgsverformungen aufnehmen zu können.
- **Verarbeitungszeit [34]:** Zeit zwischen Zusammenführen von erdfeuchtem Gesteinskörnung und Zement bzw. Herstellung des Nassmischgutes bis zum Auftrag des Spritzbetons und Zeit zwischen Zusammenführen erdfeuchter Zuschläge mit Spritzbindemittel SBM-FT und dem Austritt aus der Düse.
- **Verfügbarkeit:** Eigenschaft eines Spritzbetonsystems, die richtige Menge Spritzbeton zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Vortriebsort bereitzustellen. Die Verfügbarkeit von

Spritzbeton stellt nach der übereinstimmenden Aussage von Bauleitern einen der Hauptvorteile eines Spritzbetonsystems dar.

- **Vortrieb [38]:** Leistungen zur Herstellung eines untertägigen Hohlraumes, im besonderen Lösen, Laden und Verfuhr sowie Stützmitteleinbau.
- **Vortrieb, zyklischer [38]:** Vortriebsart, bei der die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und des Stützmitteleinbaues im Wesentlichen zeitlich nacheinander und mit Hilfe von Einzelgeräten ausgeführt werden. Das Lösen erfolgt in der Regel durch Sprengen, Bagger oder TSM.
- **Vortrieb, kontinuierlicher [38]:** Vortrieb mit Hilfe einer Tunnelvortriebsmaschine (Tunnelbohrmaschine, Schild, usw.) bei der die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und des Stützmitteleinbaues im Wesentlichen gleichzeitig ausgeführt werden.
- **Vortriebsbereich [38]:** Arbeitsbereich im jeweiligen Teilquerschnitt mit definierter Länge, in welchem die Ausbruchsarbeiten und die festgelegten Stützmaßnahmen durchzuführen sind.
- **Vortriebsklassen [38]:** Einteilung der Vortriebsarbeiten nach den bautechnischen Maßnahmen, welche der Verrechnung des Ausbruches und der Ermittlung der Vortriebsdauer dienen.
- **Vortriebsmannschaft [38]:** Baustellenpersonal, welches mit Vortriebsarbeiten beschäftigt und schwerpunktmäßig untertage eingesetzt ist.
- **Vortriebsunterbrechung [38]:** Zeit, in der im Vortriebsbereich Arbeiten durchgeführt werden, die jedoch nicht nach vereinbarten Vortriebsklassen abgerechnet werden können und auch planmäßig nicht vorgesehen sind.
- **Zusatzmittel [33]:** Stoff, der während des Mischvorgangs des Betons in kleinen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben wird, um die Eigenschaften des Frischbetons oder Festbetons zu verändern.
- **Zusatzstoffe [33]:** Feinverteilter Stoff, der im Beton verwendet und während des Mischvorganges des Betons zugegeben wird, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder um bestimmte Eigenschaften zu erreichen. Die ÖNORM B 4710-1 beinhaltet zwei Arten von anorganischen Zusatzstoffen:
 - nahezu inaktive Zusatzstoffe (Typ 1)
 - puzzolanische oder latenthyadraulische Zusatzstoffe (Typ 2)

I.3 Abkürzungen

AT	Arbeitstag
EB	Erstarrungsbeschleuniger
EB-AF	Alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger
EB-AH	Alkalihaltiger Erstarrungsbeschleuniger
ev.	eventuell
FM-L	Feucht-Mischgut lagerfähig
FM-S	Feucht-Mischgut mit sofortiger Anwendung
i.d.R.	in der Regel
NM	Nass-Mischgut
o.a.	oben angeführt
s.	siehe
SBM	Spritz-Bindemittel
SBM-FT	Spritz-Bindemittel für SpB mit feuchten Zuschlägen
SBM-T	Spritz-Bindemittel für SpB mit trockenen Zuschlägen
SpB	Spritzbeton
TM	Trockenmischgut
TZ	Tunnelzement
u.a.	unten angeführt
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

II Experten- bzw. Entscheidungshilfesysteme

II.1 Definition

Ein Mensch wird im täglichen Sprachgebrauch dann als Experte bezeichnet, wenn er über detailliertes Fachwissen in einem eingegrenzten Bereich verfügt. Dieser eingeschränkte Wissensbereich wird auch als Domäne (engl. domain) bezeichnet. Ein Experte beherrscht und manipuliert also die 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? **Expertensysteme** sind unter dem Schlagwort der künstlichen Intelligenz bekannt geworden und zielen im Wesentlichen darauf ab, mit Hilfe von Symbolwissen das Verhalten menschlicher Experten nachzuvollziehen.

Schupp definiert Expertensysteme wie folgt [11]: *Ein Expertensystem ist ein Computersystem, welches gebietsspezifisches Expertenwissen speichern, verwalten, gezielt auswerten und zu Auskünften an einen Benutzer oder zur Abwicklung bestimmter Aufgaben (z.B. einer Produktionssteuerung) nutzen kann. Deshalb spricht man auch häufig statt von „Expertensystemen“ von wissensbasierten Systemen.*

Nach Professor Edward Feigenbaum von der Universität Stanford/Kalifornien ist ein Expertensystem *ein intelligentes Computerprogramm, das Wissen und Schlussfolgerungsmechanismen (Inferenzverfahren) benutzt, um solche Probleme zu lösen, die beträchtliches menschliches Expertenwissen und ein gutes Urteilsvermögen erfordern würden. Das auf diesem Niveau benötigte Wissen in Verbindung mit den verwendeten*

Inferenzverfahren kann als Modell für das Expertenwissen der versiertesten Praktiker des jeweiligen Fachgebiets angesehen werden [6].

Eine anschauliche Erklärung des Begriffs Expertensystem gibt Professor Fenves von der Universität Pittsburgh, indem er *vier notwendige Eigenschaften solcher Systeme nennt [17]:*

- *Trennung von Wissen und Kontrolle*
- *Durchschaubarkeit des Programmablaufs*
- *Klarheit der Wissensrepräsentation*
- *Möglichkeit der modulartigen Programmerweiterung*

Diese Merkmale werden in den folgenden Abschnitten der gegenständlichen Arbeit noch erklärt.

Bei den **Entscheidungshilfesystemen** wiederum handelt sich um interaktive, auf EDV basierende Systeme, die dem Anwender helfen sollen, zielgerichtet 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 aufbereitet und der Benutzer wird schlussendlich bei der Entscheidungsfindung mit Expertenwissen unterstützt.

Zum Unterschied von Expertensystemen, die von einem oder mehreren Autoren (dem Knowledge Engineer) fix erstellt werden und der Benutzer vom Programm selber mehr oder weniger stark geführt wird, wird bei den Entscheidungshilfesystemen der Benutzer stärker in das Aufstellen der zu berechnenden Modelle und deren Abstimmung mit dem wirklichen Verhalten vor Ort eingebunden. Die Entwicklung des zu modellierenden Systems ist gerade bei Entscheidungshilfesystemen ein wesentlicher und anspruchsvoller Bestandteil der Aufgabenbearbeitung und keinesfalls eine triviale Aufgabe [3].

II.2 Unterschied zu konventionellen Programmen

Konventionelle Programme ermöglichen es, große Datenmengen zu speichern und schnell und fehlerfrei mit Hilfe komplexer Algorithmen zu verarbeiten bzw. Ergebnisse nach verschiedensten Anforderungen zu sortieren, anzuzeigen und auszugeben. Es werden immer eindeutig richtige Lösungen geliefert, sofern die Dateneingabe korrekt erfolgt ist.

Entscheidungshilfesysteme unterscheiden sich gegenüber der traditionellen Programmierung dadurch, dass das System anstelle der herkömmlichen Datenbasis eine Wissensbasis besitzt (vgl. [11]). Diese speichert nicht nur Fakten (z.B. einzelne Datensätze), sondern auch

Regeln (d.h. Vorschriften der Wissensverarbeitung). Durch den Dialog mit dem Fachexperten oder Wissensingenieur, aber auch automatisch (z.B. durch die statistische Auswertung der Ergebnisse früherer Konsultationen) kann die Wissensbasis „dazulernen“. Ausgehend von den gespeicherten Fakten und Regeln in der Wissensbasis kann das System mit Hilfe von Heuristiken, also bestimmten Verarbeitungstechniken und Suchstrategien, neues Wissen produzieren. Diese Eigenschaft wird auch als aktive und passive Lernfähigkeit bezeichnet. Schlussendlich kann das System sein Vorgehen bei der Problemlösung und die Gründe für einen getroffenen Lösungsvorschlag erklären.

Mit dieser Erklärungskomponente kann das Expertensystem das in seiner Wissensbasis strukturierte Fachwissen nicht nur anwenden, sondern auch dem Benutzer vermitteln. Eine Gegenüberstellung der wesentlichen Unterschiede zwischen konventioneller Programmierung und Expertensystemen werden in der nachfolgenden Tabelle 1 nochmals zusammenfassend dargestellt.

Merkmale	Konventionelle Programmierung	Expertensysteme
Lösungskonzept definiert in:	Algorithmen	Heuristiken
Implementierung des Wissens:	Numerisch adressierte Datenbank	Symbolisch strukturierte Wissensbasis in einem globalen Arbeitsspeicher
Programmierung:	Orientierung nach Zahlen	Orientierung nach Symbolen
Verarbeitungsweise:	Sequentielle, stapelweise Verarbeitung	Interaktive Verarbeitung
Hilfestellung während der Programmausführung:	Erklärungen und Rückfragen während des Ablaufs nicht möglich	Erklärungen und Rückfragen während des Ablaufs möglich

Tabelle 1: Hauptunterschiede zwischen konventioneller Programmierung und Expertensystem [6]

Nach [6] sollte für Expertensysteme daher die Programmiergrundregel

Programm = Algorithmen + Datenstruktur durch die Regel

Programm = Logik + Methoden + Fakten ersetzt werden.

II.3 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: „Irrtum, 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.

Vorrangiges Ziel beim Einsatz von Entscheidungs- bzw. Expertensystemen ist vor allem das in den Unternehmen vorhandene Wissen älterer, erfahrener Mitarbeiter für jüngere Kolleginnen und Kollegen nutzbar zu machen. Nachdem Aufgabenstellungen im Bauwesen zunehmend interdisziplinäres Wissen erfordern, sollen dem unerfahrenen Mitarbeiter strukturierte Problemlösungsansätze für komplexe Aufgabenstellungen angeboten werden. Durch die Verwendung eines Entscheidungshilfesystems reduziert sich das Risiko von Fehlermöglichkeiten und gleichzeitig ergeben sich durch die konsequente Anwendung klar strukturierte, nachvollziehbare Lösungsschritte.

Daher müssen Entscheidungshilfesysteme auch weitgehend interaktiv aufgebaut sein, damit der Anwender den Dialog jederzeit unterbrechen und während des Problemlösungsprozesses auch Entscheidungen des Systems hinterfragen bzw. Erklärungen verlangen kann. Die erhaltenen Lösungsansätze sind weder völlig richtig noch falsch, sondern im Rahmen von Ermessensspielräumen plausibel und vernünftig und stellen nur eine mögliche Unterstützung bei der Entscheidungsfindung dar. Die eigentliche Entscheidung und das Vertreten der Lösung kann dem Benutzer durch das System jedoch nicht abgenommen werden.

Zusammengefasst ergeben sich folgende, wesentliche Zielsetzungen des Einsatzes solcher Systeme (vgl. [10]):

- 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.

II.4 Entwicklung

In diesem Abschnitt sollen allgemeine Hinweise für die praktische Entwicklung eines Experten- bzw. Entscheidungshilfesystems gegeben werden. Das „Phasenmodell“ einer wissensbasierten Systementwicklung wird in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt (s. [11] und [15]).

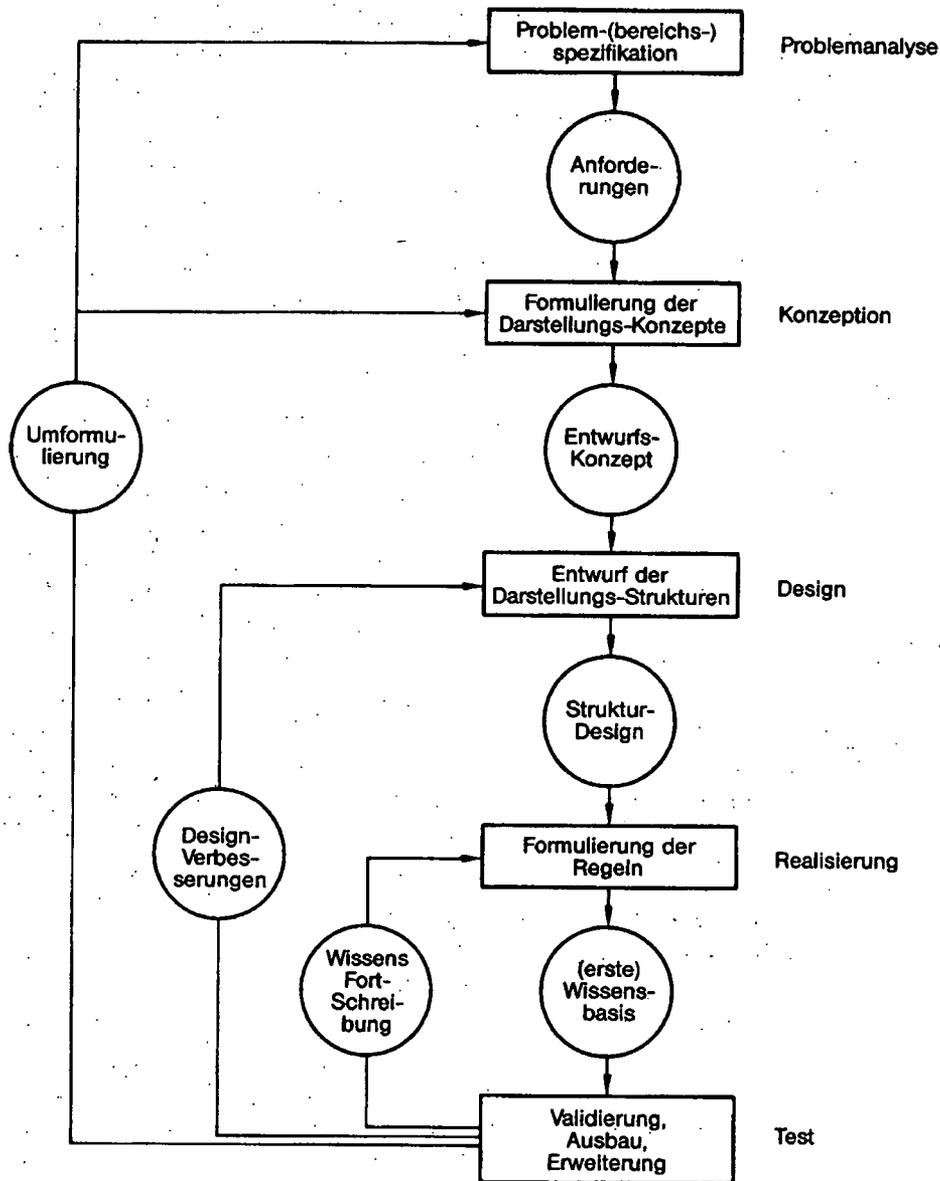


Abbildung 1: Phasenmodell einer wissensbasierten Systementwicklung [15]

In der Phase der **Problemspezifikation** wird zunächst festgestellt, welche Probleme überhaupt zu lösen sind und welcher Aufwand (in zeitlicher und materieller Hinsicht) dafür zu erwarten ist. Danach werden die Anforderungen an das Entscheidungshilfesystem formuliert und ein Darstellungskonzept erarbeitet. Die Anforderungen an das Entscheidungshilfesystem zur Auswahl von Spritzbetonverfahren für Tunnel- und Stollenbaustellen liegen zum einen in der Erfassung und Speicherung sämtlicher relevanter Daten der konkreten Tunnel- und Stollenbaustelle und zum anderen in der Analyse und Bewertung der Spritzbetonverfahren

hinsichtlich Baubetrieb, Baustelleneinrichtung, Betontechnologie, Sicherheit und Gesundheitsschutz sowie Wirtschaftlichkeit.

Im **Darstellungskonzept** wird die Form der Wissensorganisation und der Wissenserfassung festgelegt. Es wird definiert, welches Wissen in welcher Form formalisiert und gespeichert werden muss. Aus diesen Überlegungen resultiert ein **Entwurf der Darstellungsstrukturen** (Planung der Wissensdarstellung, „Design“). Die Wissensorganisation und die Wissenserfassung sollen für die unterschiedlichen Spritzbetonverfahren mit Hilfe von Datenbanken erfolgen, in denen wichtige Projektdaten gespeichert und bei Bedarf statistisch ausgewertet werden können. Durch die laufende Zunahme und Wartung von Projektdaten ist die Lernfähigkeit dieser „Wissensbasis“ gewährleistet. In dieser Phase wird die Darstellung von Fakten und Regeln, die Arbeitsweise des Schlussfolgerungsmechanismus und des Dialogteils sowie die Speicherung der Datenstrukturen realisiert (s. auch Kapitel II.5). Ein wesentliches Entwurfsziel liegt in der einheitlichen Kodierung der verschiedenen Fakten und Regeln, um die Implementierung und Weiterentwicklung der Prozeduren später zu erleichtern.

Auf Grundlage des Entwurfs der Darstellungsstrukturen wird das tatsächliche Fachwissen in **Fakten und Regeln formuliert** (Wissensspezifikation). Für die einzelnen Spritzbetonverfahren lassen sich beispielhaft folgende Fakten und Regeln („Wenn-Dann-Beziehungen“) formulieren:

- *Wenn* die Staubbelastung beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut die zulässigen MAK-Werte überschreitet, *dann* ist entweder eine Vorbenetzungsdüse zu verwenden oder das Verfahren ist aus Gesundheitsschutzgründen auszuschneiden.
- *Wenn* der Rückprallanteil beim Spritzbetonauftrag ca. 10 % betragen soll, *dann* ist das Nassspritzverfahren zu bevorzugen.
- *Wenn* der optimale Düsenabstand zur Auftragsfläche nicht eingehalten wird, *dann* erhöht sich der Rückprallanteil beim Spritzbetonauftrag.

Durch die Festlegung von Fakten und Regeln wird gleichzeitig eine erste Wissensbasis für den Einsatz in einer Entwurfphase aufgebaut. Bei der Anwendung des Expertensystems in einer **Testphase** wird dann an der Validierung und dem kontinuierlichen Ausbau der Wissensbasis gearbeitet. Dieser Schritt erfolgt durch die laufende Eingabe relevanter Daten von Referenzprojekten. Durch diese laufende Wissensfortschreibung muss das Fakten- und Regelwissen auch ständig adaptiert und an neue Gegebenheiten angepasst werden. Im Zuge dieser Adaptierungen kann sich auch eine Umformulierung der Darstellungskonzepte bzw. der Problemspezifikation als notwendig herausstellen.

II.5 Struktur

In den nachfolgenden Kapiteln II.5.1 bis II.5.5 werden die erforderlichen Komponenten eines Expertensystems zur Lösung praktischer Aufgaben und die grundsätzliche Struktur derartiger Systeme beschrieben (s. auch [7], [10] und [11]).

II.5.1 Wissensbasis (knowledge base)

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. Zumeist wird das Wissen in Form von Fakten (deklaratives Wissen) und Regeln (prozedurales Wissen), oder auch Rahmen (Beschreibung von Objekten, vereinigt deklaratives und prozedurales Wissen) und Skripten (Beschreibung von Abläufen, repräsentiert stark standardisierte, komplexe Handlungsabläufe) dargestellt. Unter deklarativem Wissen wird dabei eine statische Ansammlung von Fakten (z.B. aus der Literatur) verstanden, während prozedurales Wissen vor allem auf Erfahrung beruht und Informationen darüber enthält, wie Wissen konstruiert, verknüpft und angewandt wird.

II.5.2 Schlussfolgerungsmechanismus (inference machine):

„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 geeignete Problemlösungsansätze. Ein kleines Beispiel für einen Schlussfolgerungsmechanismus bei der Auswahl eines Spritzbetonverfahrens für das Projekt XY: **Wenn** große Mengen an Spritzbeton und hohe Spritzleistungen (Größenordnung 20 m³/h und Düse) erforderlich sind, **dann** ist das Nassspritzverfahren dem Trockenspritzverfahren vorzuziehen.

II.5.3 Erklärungskomponente (explanation component)

Die Erklärungskomponente zeigt dem Benutzer, durch welche Regeln und Fakten ein Ergebnis zustande kam. Dem Anwender kann sowohl der Lösungsweg 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 XY aus nachfolgenden Gründen nicht in Frage, weil:

- keine baustelleneigene Mischanlage vorhanden ist und
- das nächste Transportbetonmischwerk ca. 75 km von der Baustelle entfernt ist.

II.5.4 Dialogteil (dialog management)

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 z.B. die Verwendung einer Vorbenetzungsdüse vor.

II.5.5 Wissensakquisition (knowledge acquisition)

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. Durch Wissensakquisition lernt das System von Fachleuten oder aus Datenbanken. 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.

II.5.6 Systemarchitektur

Bei Expertensystemen sind die Kontrollstrukturen und das zu verarbeitende Wissen voneinander getrennt (s. Abbildung 2). Das fachspezifische Wissen wird von Fachexperten und Wissensingenieuren eingebracht, während der Programmierer die Darstellungsregeln für dieses Wissen kennen muss, um die allgemeine Struktur zu entwickeln. Die Kontrollstruktur kann unverändert für ganz verschiedene, fachspezifische Wissensbasen eingesetzt werden, wenn die Darstellungsstruktur und die Manipulationen mit dem jeweiligen Fachwissen für verschiedene Gebiete ähnlich sind.

Man spricht dann von sogenannten Expertensystemschalen, darunter werden Expertensysteme mit leerer Wissensbasis verstanden. Zur Nutzung solcher Systeme braucht die entsprechende Wissensbasis dann nur mehr von Fachexperten und Wissensexperten mit Fakten und Regeln gefüllt zu werden.

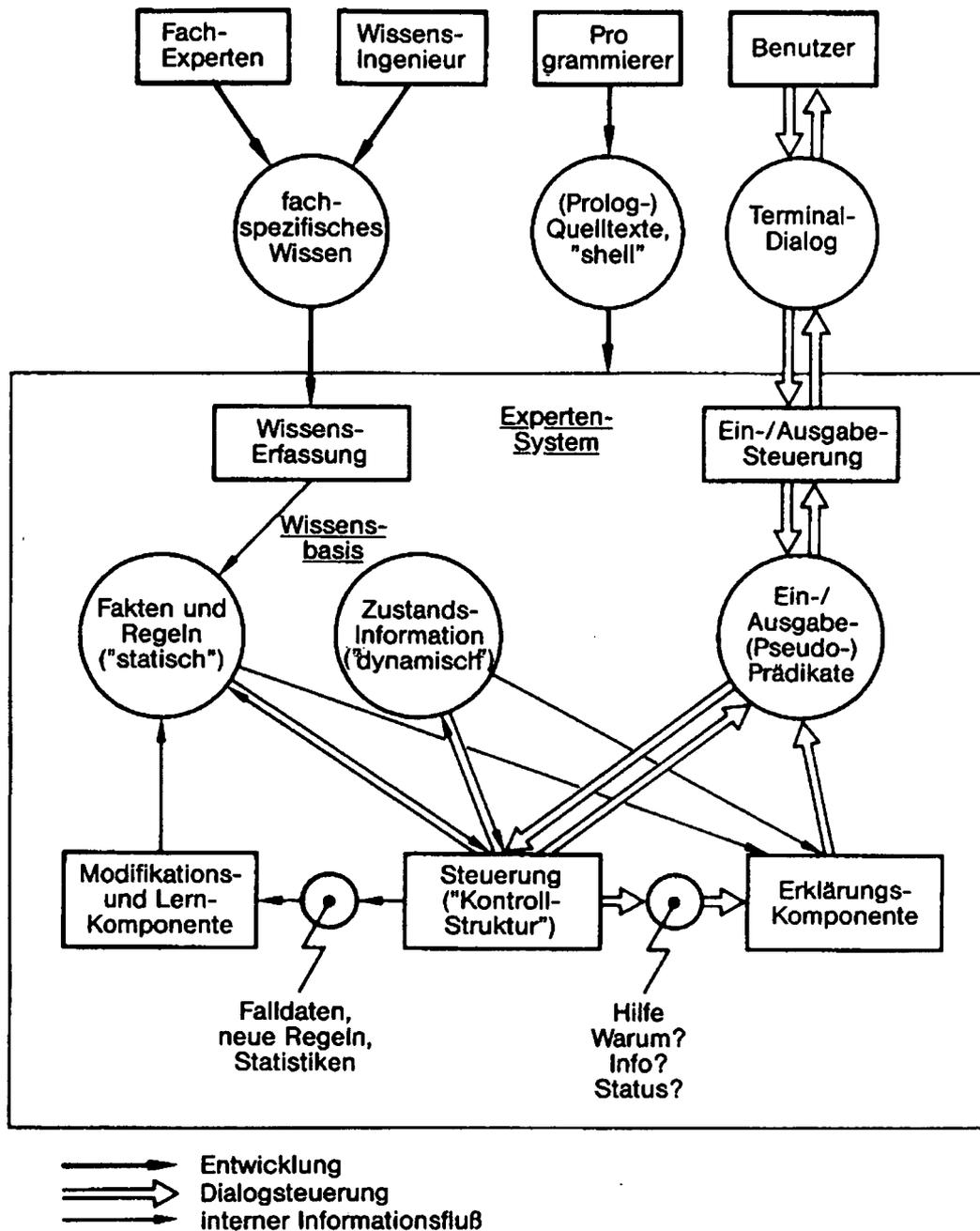


Abbildung 2: Systemarchitektur eines Entscheidungshilfesystems [11]

Der Anwender benützt das fertige Expertensystem 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 Erklärungskomponente den Problemlösungsprozess jederzeit unterbrechen und „Expertenwissen“ einholen. Nach Beendigung des internen Kommunikationsflusses erfolgt die Datenausgabe wieder über die Kontrollstruktur und den Terminaldialog.

II.6 Klassifikation

Eine Klassifikation der Expertensysteme nach P. Schnupp und C.T. Nguyen Huu (vgl. [11]) stellt die wichtigsten Systemtypen und ihre typischen Anwendungsmöglichkeiten einander gegenüber. In der nachfolgenden Abbildung 3 wird eine – aus der Sicht des Autors für das Bauwesen relevante - mögliche Klassifikation von Expertensystemen dargestellt, wobei Erläuterungen und Anwendungsbeispiele zu den einzelnen Kategorien in den folgenden Abschnitten detailliert aufgezeigt werden.

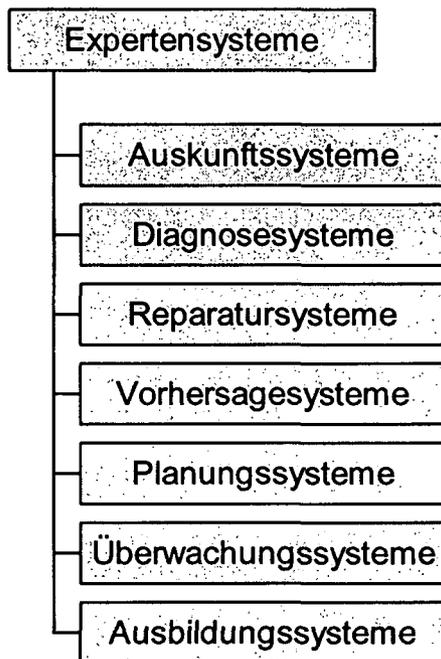


Abbildung 3: Klassifikation von Expertensystemen

II.6.1 Auskunftssysteme

Auskunftssysteme verwenden Falldaten, die vom Benutzer in einem interaktiven Dialog eingegeben werden, um durch die Inhalte der Wissensbasis Auskunft über Problemstellungen zu geben (z.B. Routenplaner – Auswahl der schnellsten bzw. kürzesten Strecke zwischen zwei Ortschaften; Analyse wirtschaftlicher Kennzahlen eines Unternehmens, einer Baustelle).

II.6.2 Diagnosesysteme

Bei Diagnosesystemen handelt es sich um umfangreichere Auskunftssysteme, die sich vor allem durch eine größere Anzahl einfließender Fakten und Regeln unterscheiden und damit verbunden auch höhere Unsicherheiten aufweisen (z.B. soll aus Angaben über Mängel bzw. Schadensmerkmale bei Bauwerken eine Diagnose über die Ursache eines gegenwärtigen Zustandes ermöglicht werden).

II.6.3 Reparatursysteme

Reparatursysteme beinhalten nicht nur das zur Fehlererkennung nötige Wissen, sondern auch wesentliche Informationen zur Behebung von erkannten Störungen. Zu dieser Gruppe wird auch ein von Michael Sohni an der Technischen Hochschule Darmstadt entwickeltes Expertensystem zur Beurteilung, Beseitigung und Vorbeugung von Oberflächenschäden bei Betonbauteilen gezählt (s. [6]). Mit solchen Systemen sollen „menschliche Experten“ bei Fehlersuchen und Reparaturen unterstützt werden.

II.6.4 Vorhersagesysteme

Vorhersagesysteme benutzen bei der Auswertung von vorhandenen Daten mathematische Gesetzmäßigkeiten, statistische Methoden oder Heuristiken und leiten daraus zu erwartende Entwicklungen in der Zukunft ab. Die Schwäche solcher Systeme liegt vorwiegend in dem stark vereinfachten Modell der komplexen Zusammenhänge. Anwendungsbereiche sind z.B. die Wettervorhersage, Wirtschaftsprognosen oder die Prognose von zukünftigen Verkehrsentwicklungen.

II.6.5 Planungssysteme

Mit Hilfe von Planungssystemen soll der Anwender bei komplexen militärischen und wirtschaftlichen, aber auch wissenschaftlichen Planungsaufgaben unterstützt werden. Sie enthalten Modelle über Prozessabläufe und deren vermuteten bzw. sicheren Auswirkungen. Ein Expertensystem zur Auswahl eines geeigneten Spritzbetonverfahrens für Tunnelbauprojekte wäre – entsprechend der Klassifikation von P. Schupp und C.T. Nguyen Huu – den Planungssystemen zuzuordnen.

II.6.6 Überwachungssysteme

Überwachungssysteme vergleichen Sollgrößen und Benutzereingaben bzw. Daten aus Meßgeräten und informieren den Anwender über den jeweiligen Prozeßzustand, Abweichungen und gegebenenfalls kritische Zustände. Sogenannte Steuerungssysteme sind eine Erweiterung der Überwachungssysteme und erlauben die Modellbildung vollständiger Regelkreise, indem sie bei Störungen und Abweichungen steuernd in den Prozessablauf eingreifen.

II.6.7 Ausbildungssysteme

Zunächst wird durch die Eingabe von Daten in die Wissensbasis der aktuelle Wissensstand des Benutzers gespeichert. Danach werden konkrete Problemstellungen simuliert und auf Basis des gespeicherten Wissensstands des Anwenders entsprechende Lösungsansätze

erarbeitet. Die wesentlichen Lösungsschritte werden mit zusätzlichen Beispielen erklärt und in übersichtlicher und nachvollziehbarer Form dargestellt.

II.7 Anwendungsgebiete

Der Großteil der Expertensysteme im Bauwesen wurde zum Teil als Prototyp entwickelt und hat den wissenschaftlichen, universitären Bereich nicht verlassen. Für den baupraktischen Einsatz bei komplexen Problemstellungen erschien die Nutzung solcher Systeme zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung nicht zweckmäßig, denn die Erfahrung von menschlichen Fachexperten zur Prüfung der vorgeschlagenen Lösungsansätze auf Plausibilität war nach wie vor unverzichtbar.

Zu den Anwendungsgebieten von Expertensystemen im Bauwesen gehören [6]:

- **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.

Bei den Expertensystemen im Bauwesen handelt es sich daher vorwiegend um Insellösungen, d.h. Problemlösungsansätze werden nur für stark eingegrenzte Teilbereiche des Bauwesens erarbeitet und für den Nutzer übersichtlich dargestellt. In diesem Abschnitt werden zwei Experten- bzw. Entscheidungshilfesysteme in ihren Grundzügen vor- und hinsichtlich ihres Aufbaus grob dargestellt.

Das Programm REPCON (englischer Begriff für REPair of CONcrete) beschäftigt sich mit der Beurteilung, Beseitigung und Vorbeugung von Oberflächenschäden an Betonbauteilen [6]. Das Bauwerksinspektions- und Analysesystem BINAS dient der Bestandsanalyse von Bauwerken mit dem Ziel der Reduzierung des Instandhaltungsaufwandes durch Technik- und Managementmaßnahmen [2].

II.7.1 REPCON – Beurteilung, Beseitigung und Vorbeugung von Oberflächenschäden an Betonbauteilen

Dieses Programm wurde an der Technischen Hochschule Darmstadt von Dr. M. Sohni entwickelt [6] und soll dem verantwortlichen Ingenieur als Diagnose- und Beratungssystem bei der Entscheidung über Instandsetzungsmaßnahmen von Betonbauwerken dienen. Das Expertensystem hilft bei der Ermittlung von Schadensursachen und liefert zusätzlich noch mögliche Reparaturvorschläge als Grundlage für die Erarbeitung eines Instandsetzungsplans.

Der **Programmaufbau** des Expertensystems REPCON wird in der Abbildung 4 dargestellt.

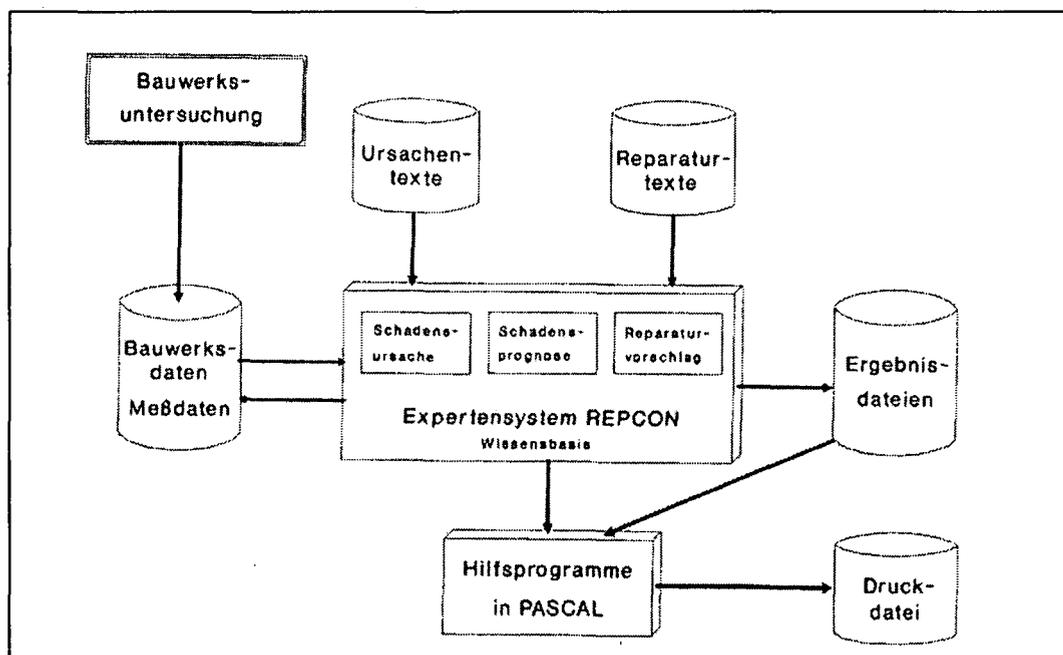


Abbildung 4: Programmaufbau von REPCON [6]

Bei der Bauwerksuntersuchung werden vom Benutzer Bauwerks- und Messdaten erhoben. Die Wissensbasis soll dem Anwender als Zielvorgabe Expertenwissen zur Schadensursache und zur Schadensprognose zur Verfügung stellen, sowie potentielle Reparaturvorschläge aufzeigen.

Die Erklärungskomponente umfasst dabei Ursachentexte (Erläuterungen zu den Schadensursachen) und Reparaturtexte (Erläuterungen zu den Reparaturvorschlägen). Sind alle Lösungsvorschläge erarbeitet, werden die Eingabedaten und die daraus resultierenden Schlussfolgerungen in Ergebnisdateien geschrieben.

Hilfsprogramme – in der Programmiersprache PASCAL – erzeugen Dateien, die entweder ausgedruckt oder mittels Textverarbeitungsprogrammen weiterbearbeitet werden können.

Die grundsätzliche **Vorgangsweise** bei der Erarbeitung von Instandsetzungsvorschlägen lässt sich mit Hilfe der Abbildung 5 erklären.

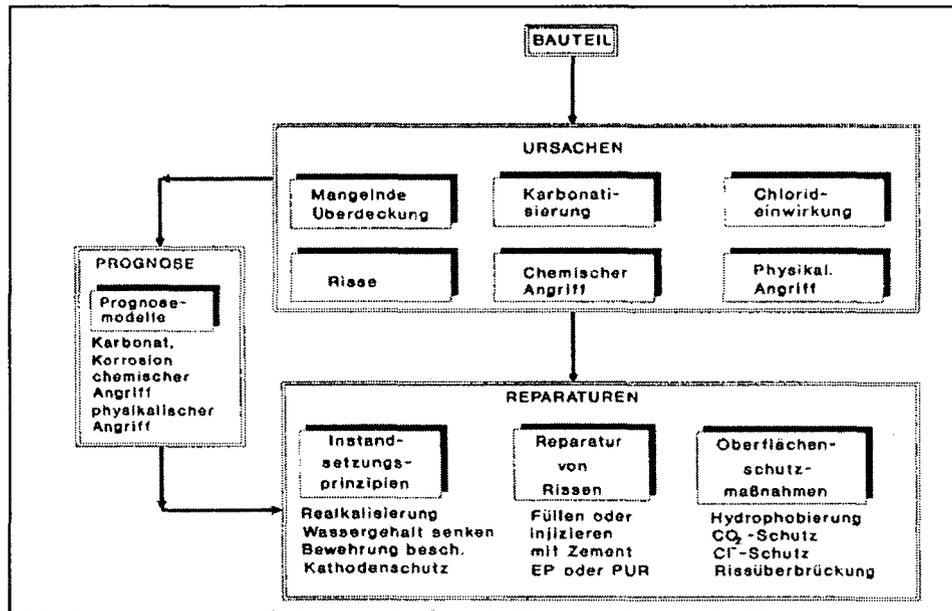


Abbildung 5: Vorgangsweise bei der Erarbeitung von Instandsetzungs- bzw. Reparaturvorschlägen [6]

Nach der Eingabe der Daten des entsprechenden Bauteils (z.B. Alter, Funktion) werden die nachfolgenden **Ergebnisse** erzielt:

- Zunächst werden mögliche Schadensursachen nach insgesamt sechs Regelgruppen (z.B. mangelnde Betonüberdeckung der Bewehrung, Risse, chemische Angriffe) untersucht.
- Darauf aufbauend kann mit Hilfe eines Prognosemodells die jeweilige Schadensursache bewertet, ein möglicher Schadensverlauf ermittelt und die Dringlichkeit einer potentiellen Instandsetzungs- bzw. Reparaturmaßnahme bestimmt werden.

Die jeweiligen Regeln zu den Reparaturen werden den Empfehlungen der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ entnommen.

II.7.2 BINAS – Bauwerksinspektions- und Analysesystem

Das Entscheidungshilfesystem BINAS wurde 1997 von D. Quang Ngo und von U. Rüppel an der Technischen Hochschule in Darmstadt entwickelt [2]. Nachdem die laufenden Instandhaltungskosten je nach Art eines Bauwerks in Deutschland pro Jahr ca. 1 – 6 % des Wiederbeschaffungswertes ausmachen, wurde BINAS zur Reduzierung des Instandhaltungsaufwandes durch Technik- und Managementmaßnahmen unter Berücksichtigung folgender **Zielsetzungen** entwickelt:

- Zunächst soll mit diesem Entscheidungshilfesystem eine objektive Feststellung und Beurteilung von Bauwerkszuständen (Standicherheit, Gebrauchstauglichkeit) getroffen werden. In der Phase der Bauwerksinspektion bzw. Bestandsaufnahme wird der IST - Zustand eines Gebäudes als Grundlage für eine nachfolgende Bestandsanalyse erstellt.
- Die Bestandsanalyse erfordert die Verarbeitung einer Fülle von Informationen des Ist- bzw. Soll – Zustandes des Bauwerks. Danach werden mögliche Schadensursachen, Schadensmechanismen sowie durchzuführende Sanierungsmaßnahmen ermittelt.

BINAS basiert auf dem Konzept der virtuellen Inspektion von Bauwerken. Unter der virtuellen Inspektion wird dabei die Unterstützung der „realen“ Bauwerksinspektion des fachkundigen Ingenieurs durch ein Computersystem verstanden. Dabei wird der menschliche Experte sowohl bei der Entwicklung der Inspektionsplanung, als auch bei der Dokumentation von erfassten Informationen bei der Bestandsaufnahme unterstützt.

Der **Programmaufbau** von BINAS wird in der Abbildung 6 dargestellt.

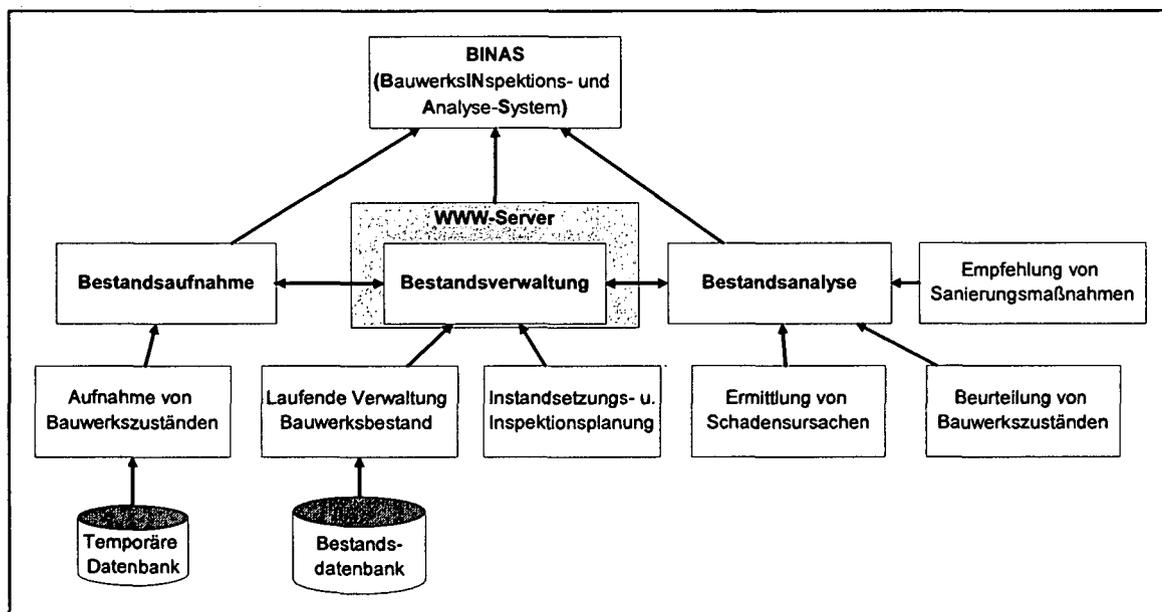


Abbildung 6: Programmaufbau von BINAS [2]

Die **Bestandsverwaltung** stellt die Zentrale für den Datenaustausch dar und verwaltet systematisch Informationen über sämtliche Bauwerks- bzw. Bauteilbestände und die Instandsetzungs- und Inspektionsplanung. Bei der **Bestandsaufnahme** werden die gerade aufgenommenen Bauwerkszustände zunächst in einer temporären Datenbank gespeichert und nach jeder abgeschlossenen Inspektion in die zentrale Bestandsverwaltung übertragen.

In der Phase der **Bestandsanalyse** erfolgt die Ermittlung potentieller Schadensursachen bei fehlerhaften Bauteilen. Ein Bauteilkatalog beinhaltet für eine möglichst strukturierte

Vorgangsweise bei der Inspektion notwendige Informationen zu den jeweiligen Bauteilen (z.B. Inspektionsintervalle, Inspektionsmethoden) und ermöglicht damit eine effiziente Aufnahme und Verarbeitung von Daten. Ein hypermediales Dialogfenster zur Schadensaufnahme wird beispielhaft in der Abbildung 7 dargestellt.

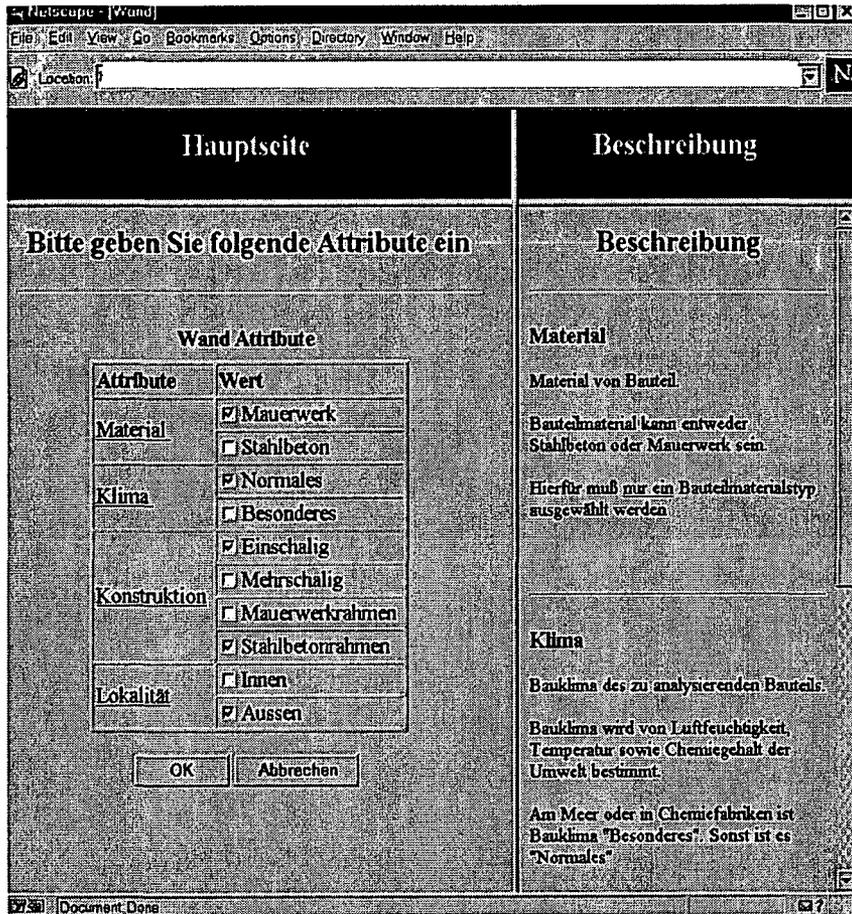


Abbildung 7: Schadensaufnahme über hypermediales Dialogfenster [2]

Durch die Aufnahme typischer Schäden sowie den zugehörigen bauteilbezogenen Informationen (z.B. Schadensursachen), wird die Grundlage der Wissensbasis von BINAS gebildet. Mögliche Ursachen für Schäden werden abgefragt und anschließend an die zentrale Bestandsverwaltung übermittelt.

Der bereits gespeicherte SOLL – Zustand wird dabei mit dem abgefragten IST – Zustand verglichen und daraus werden entsprechende Problemlösungsansätze abgeleitet. Die Schadensanalyse nach der Mustervergleich-Methode erfolgt, d.h. die Lösung eines Problems wird aus einer Menge ähnlicher und gelöster Probleme abgeleitet.

Als **Ergebnis** der Analyse werden mögliche Schadensmechanismen und Schadensursachen dem Benutzer als Entscheidungshilfe angezeigt. Die endgültige Entscheidung über vorgeschlagene Problemlösungsansätze müssen anschließend vom Fachingenieur getroffen werden.

II.8 Grenzen und Probleme

Alleine die Tatsache, dass nur wenige „echte“ Expertensysteme auf dem Gebiet des Bauingenieurs im Einsatz sind, erklärt sich aus den engen Grenzen der Anwendungsgebiete solcher Systeme. Nur in kleinen, überschaubaren Teilbereichen zeigt sich, dass Computer vergleichbare Ergebnisse wie menschliche Experten erzielen können.

Der menschliche Experte kann jedoch – gerade im Bauwesen - mit seiner Erfahrung Problemstellungen lösen, indem aktuelle Probleme mit bereits bekannten Ansätzen aus der Vergangenheit verglichen und angepasst werden. Im Überblick lassen sich die Grenzen und Probleme von Expertensystemen wie folgt darstellen (vgl. auch [8]):

- Experten können oftmals ihr Wissen nur schwer beschreiben bzw. ist die Erklärung von komplexen Sachverhalten durch einfache Regeln oftmals schwierig.
- Verbale Regeln sind manchmal 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 [8] 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.

Durch die aufgezeigten Probleme und Grenzen werden Expertensysteme eigentlich ihrem Namen nicht gerecht, denn sie sind noch nicht in der Lage den menschlichen Experten völlig zu ersetzen. Deshalb sollte man statt des Begriffs „Expertensystem“ besser den Begriff „Entscheidungshilfesystem“ verwenden, weil sie eher dafür geeignet sind, den Experten bei seiner Arbeit zu unterstützen und ihm einen strukturierten Problemlösungsansatz anzubieten. Im täglichen Einsatz müssen die Ergebnisse nach wie vor vom Anwender ständig kontrolliert werden. Der Benutzer muss also weiterhin auf seinem Fachgebiet geschult sein, um vermeidbare Fehlfunktionen und unplausible Lösungsansätze zu erkennen und entsprechend reagieren zu können.

Gerade im Bauwesen dürfen solche Entscheidungshilfesysteme auch nicht überbewertet werden. Nachdem die Aufgabenstellungen variieren und unterschiedlichste Anforderungen an Planer und Ausführende gestellt werden, ist es schwieriger passende Systeme für das Bauwesen als z.B. für die stationäre Industrie zu entwickeln. Der Aufbau eines Entscheidungshilfesystems zur Auswahl des optimal geeigneten Spritzbetonverfahrens im Tunnelbau stellt daher den Versuch dar, dem Bauleiter bei der Entscheidungsfindung für ein klar abgegrenztes Teilgebiet des Tunnelbaus einen strukturierten, checklistenartigen und möglichst benutzerfreundlichen Problemlösungsansatz anzubieten.

III Spritzbetonverfahren

III.1 Geschichtliche Entwicklung

III.1.1 Überblick

Zunächst sollen die Ursprünge der Trocken- bzw. Nassspritzverfahren getrennt voneinander beleuchtet werden. Einen groben Überblick über die zeitliche Entwicklung der jeweiligen Verfahren gibt die nachfolgende Abbildung 8 wieder.

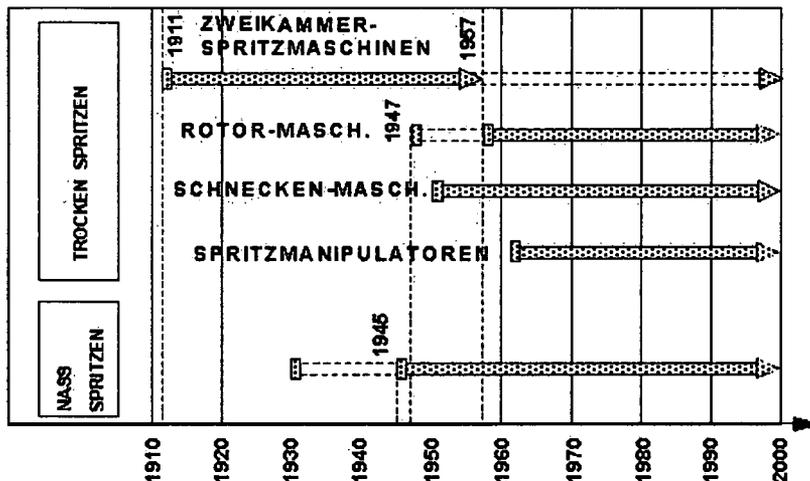


Abbildung 8: Historische Übersicht über die Spritzbetonverfahren [20]

Die Anfänge des Trockenspritzverfahrens reichen bis in das Jahr 1911 zurück, während das Nassspritzverfahren sich im Untertagebau erst ab 1945 richtig durchsetzen konnte. Bevor die Verfahrenstechnik analysiert wird, soll zunächst die historische Entwicklung der einzelnen Verfahren vorgestellt werden.

III.1.2 Trockenspritzverfahren

Den Anstoß für die Entwicklung des Trockenspritzverfahrens gab **Carl Ethan Akeley**. Der 1864 in den USA geborene Ornithologe und Tierpräparator entwickelte 1907 eine „Gipsspritze“ (plastergun), mit welcher Tierhäute mit Gips überzogen und damit konserviert werden konnten. Dabei wurde trockener Gips mittels Druckluft über eine Schlauchleitung zu einer Düse transportiert, wo dann das notwendige Wasser über eine zusätzliche Leitung zugegeben wurde. 1911 erhielt Akeley nach einigen Adaptierungen der Maschine für die Anwendung im Bauwesen das Patent für eine Zweikammerspritzmaschine unter dem Namen „Cement Gun“ (s. Abbildung 9). Erstmals eingesetzt wurde das Gerät bei der Auskleidung eines Wasserversorgungsstollen in New York.

Bei dieser Zweikammerspritzmaschine wurde die obere Kammer chargenweise mit dem Mischgut beschickt. In der unteren Kammer befand sich ein Taschenrad, mit dem das

Spritzgut in die Ablaskammer gelangte und von dort unter Druckluft zur Spritzdüse gefördert wurde (s. Abbildung 9).

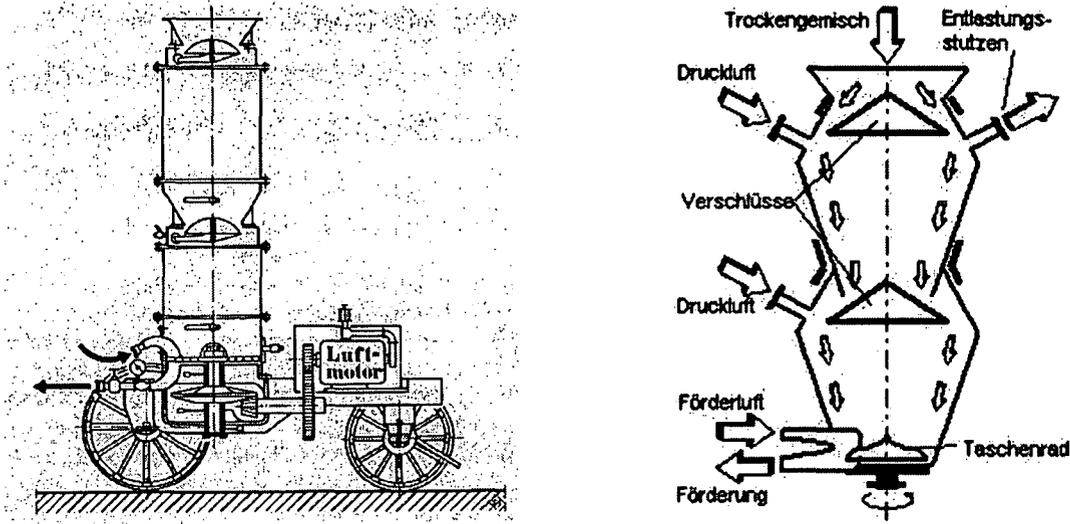


Abbildung 9: Erstes Modell der Cement Gun 1910 (linkes Bild - [25]) und Prinzipskizze einer Zweikammerspritzmaschine (rechtes Bild - [20])

Erst nach Ende des Ersten Weltkrieges begann in Europa die Entwicklung einer ähnlichen Spritzmaschine. Der Berliner Ingenieur **Carl Weber** gründete 1921 die „Torkret GmbH“ und verwendete seine modifizierte Zweikammermaschine neben der Verkleidung von Stollen und Schächten auch für die Sanierung von Betonbauteilen. Durch geringe Maschinenleistungen, die zwingend erforderliche Verwendung von Trockenmischgut, ein maximal mögliches Größtkorn des Mischgutes von 8 mm und durch den Nachteil der diskontinuierlichen Förderung, stagnierte die technische Weiterentwicklung dieser Zweikammermaschinen.

Der Schweizer Ingenieur **Georg Senn**, der spätere Gründer der ALIVA AG, entwickelte ab 1942 eine Schneckenmaschine zur Förderung von Spritzgut.

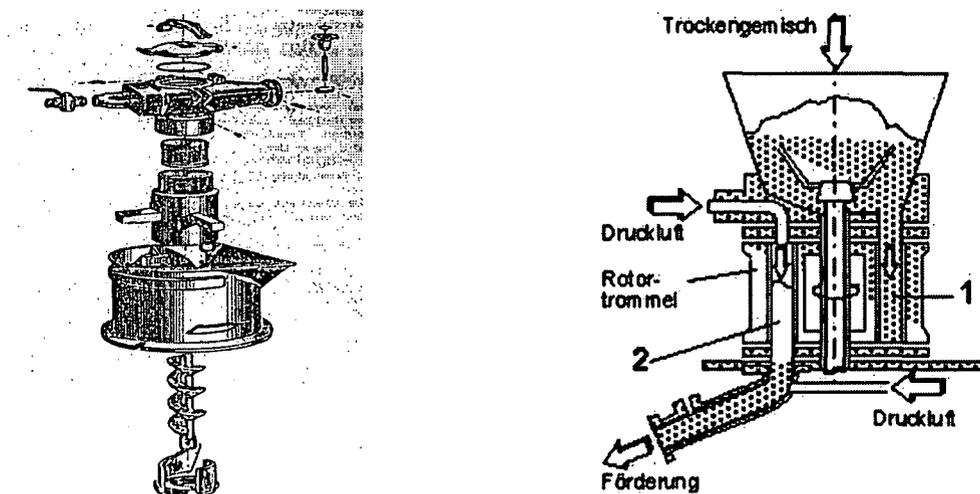


Abbildung 10: Schneckenmaschine (linkes Bild) und Rotormaschine (rechtes Bild) - [30]

Dabei wurde über eine archimedische Schnecke das Mischgut in die Förderleitung gehoben, wobei mit dieser Maschine Trockenmischgut mit bis zu 30 mm Korngröße kontinuierlich gefördert werden konnte (s. Abbildung 10). Die Verschleißkosten bei diesen Schneckenmaschinen war allerdings erheblich.

Nach dem zweiten Weltkrieg eroberte die Rotorspritzmaschine der Firma **Meynadier** den Markt (s. Abbildung 10). Durch einen Einfülltrichter gelangte dabei das Gemisch durch einen Rotor mit senkrechter Drehachse (ähnlich dem Magazin eines Revolvers) in die Förderleitung und wurde mittels Druckluft zur Düse gefördert.

III.1.3 Nassspritzverfahren

Die Ursprünge des Nassspritzverfahrens gehen bereits in das Jahr 1889 zurück, damals wurde erstmals versucht mit einem Schaufelrad Mörtel auf eine vorgegebene Auftragsfläche zu schleudern. Ein Verfahren zum Verputzen von Wänden wurde vom Dresdner **Joseph von Vass** entwickelt, der 1908 dem Nassspritzverfahren durch die Anmeldung seiner Verfahrenstechnik zum Patent zum Durchbruch verhalf. Der aufzubringende Mörtel wurde dabei in Rohrleitungen oder Schläuchen zu einer Düse gepresst und dort mit Druckluft beschleunigt und an die Wand geschleudert. Bedingt durch die Störanfälligkeit der Maschinen, den Schwierigkeiten bei der Zugabe von Erstarrungsbeschleunigern und der diskontinuierlichen Förderung konnte sich das Verfahren am Markt vorerst nicht durchsetzen.



Abbildung 11: Mörtelspritzmaschine – Bauart Moser-Kraftbau aus dem Jahr 1918 [25]

Erst 1950 erfuhr das Nassspritzverfahren im Untertagebau (s. auch Abbildung 8) durch die Erfordernis von großen Spritzbetonmengen, unter Berücksichtigung der Anforderungen einer möglichst geringen Staubentwicklung und einem geringem Rückprallanteil, einen Aufschwung. Seither wurde auch die Forschung auf dem Gebiet der Fördertechnik intensiviert, um eine optimale Verarbeitung des Betongemischs zu gewährleisten.

III.2 Anwendungsübersicht für Europa

In den einzelnen europäischen Ländern haben sich aufgrund der stark variierenden geologischen Randbedingungen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sehr unterschiedliche Spritzbetontraditionen im Untertagebau entwickelt.



Abbildung 12: Europakarte [27]

Die Gründe für den Einsatz bestimmter Spritzbetonverfahren (Trocken- oder Nassspritzverfahren) mit unterschiedlichen Fördertechniken (Dünn- oder Dichtstromverfahren) lassen sich nach Lauffer [23] für einige ausgewählte europäische Staaten wie folgt darstellen (s. Kap. III.2.1 bis III.2.4):

III.2.1 Skandinavien (Schweden, Norwegen)

In diesen beiden nordeuropäischen Staaten kommt fast ausschließlich das **Nassspritzverfahren** (i.d.R. mit Stahlfaser- und Mikrosilikazugabe) zur Anwendung. Als wesentliche Vorteile des Nassspritzverfahrens gegenüber dem Trockenspritzverfahren können für den skandinavischen Raum folgende Aspekte angeführt werden:

- Bedingt durch eine sehr günstige Geologie, erfolgen Tunnelvortriebe zumeist in standfestem Gebirge.
- Die Anforderungen an die Oberflächenqualität der Tunnelauskleidung sind sehr gering.
- Druckstollen für Wasserkraftwerke müssen über große Strecken gar nicht ausgekleidet werden.
- Es werden keine hohen Anforderungen an die Frühfestigkeit gestellt.
- Der Auftrag – zumeist dünner Schichten hochwertiger Spritzbetonschalen – erfolgt kontinuierlich.

III.2.2 Schweiz

In der Schweiz wird vorwiegend das **Nassspritzverfahren** eingesetzt. Der vorwiegende Einsatz dieses Verfahrens lässt sich wie folgt erklären:

- Ein Großteil der Schweizer Verkehrstunnel wurde in den letzten Jahrzehnten maschinell vorgetrieben (Schildmaschinen und Tübbingausbau bzw. Tunnelbohrmaschinen), wobei besonders maschinelle Vortriebe einen leistungsfähigen, kontinuierlichen Spritzbetonauftrag erfordern und damit das Nassspritzverfahren bevorzugen.
- Die Schweizer Zement- und Zusatzmittelindustrie verfolgt konsequent die Entwicklung des Nassspritzverfahrens.
- Die Auflagen der SUVA (Schweizer Unfallversicherungsanstalt) hinsichtlich der Staubbelastung können bei den Trockenspritzverfahren nur mit großen Mehraufwendungen erfüllt werden.

III.2.3 Deutschland

Bei den zahlreichen bergmännisch vorgetriebenen Tunneln an der Neubaustrecke Köln/Rhein-Main der Deutschen Bahn zeigt sich ein **differenziertes Bild** (s. Tabelle 2):

Nr.	Tunnel	Baujahr	Arge	Länge [m]	Spritzverfahren
1	Frankfurter Kreuz	1997	Züblin/Stuag	1.632	TM-T
2	Schulwald	97/2000	ATAC	4.500	TM-T, NM-afr
3	Hellenberg	1997	ATAC	552	TM-T
4	Niedernhausen	98/99	Züblin	2.765	NM-ah
5	Idstein	1998	Walter	2.069	TM-T
6	Limburg	97/99	ATLE	2.395	NM-ah
7	Elzer Berg	98/99	ATM	1.110	TM-T
8	Lange Issele	98/99	All	1.015	FM-afr
9	Eichen-Diekenscheid	1999	KDD	400	NM-afr
10	Eichheide	98/99	ATLE	1.750	NM-ah
11	Dickheck	99/2000	ATM	570	NM-afr
12	Wahnscheid	98/99	ATM	735	TM-T, NM-afr
13	Himmelberg	98/2000	ATM	2.395	TM-T, NM-afr
14	Dernbach	98/2000	KDD	3.285	NM-afr
15	Deesener Wald	1999	KDD	1.270	NM-afr
16	Ferrihal	98/2000	ATAC	1.555	FM-S
17	Ammerich	98/99	ATAC	755	FM-S
18	Güntherscheid	98/99	Arge M	1.130	FM-S
19	Rottbitze	99/2000	Arge M	820	FM-S
20	Aegidienberg	99/2000	Arge M	1.240	FM-S
21	Ittenbach	99/2000	Arge M	1.145	FM-S
22	Siegaue	1999	Zübl./Univers.	2.202	NM-ah
Summe				35.290	rd. 1 Mio m ³ SpB

Erläuterungen: Stand Januar 1999

NM-ah: Naß-Mischgut, alkalihaltiger Beschleuniger
 NM-afr: Naß-Mischgut, alkalifreier Beschleuniger
 TM-T: Trocken-Mischgut, ofengetrocknete Zuschlagstoffe
 FM-S: Feucht-Mischgut, Spritzbetonzement, sofort verarbeitet
 FM-afr: Feuchtmischgut, Transportbeton, alkalifreier Beschleuniger

Tabelle 2: Übersicht über die – nach der NÖT aufgefahrenen - zweigleisigen Tunnel [35]

Bei den bergmännisch vorgetriebenen Tunneln der Neubaustrecke waren insgesamt rund 1,0 Mio. m³ Spritzbeton erforderlich. Dabei wurde zu 46 % Trockenspritzbeton bzw. zu 54 % Nassspritzbeton verwendet, es kamen also beide Spritzbetonverfahrenstechniken (unter Berücksichtigung ihrer spezifischen Unterarten) beinahe gleichermaßen zum Einsatz.

Als Gründe für „ein leichtes Übergewicht“ des Nassspritzverfahrens gegenüber dem Trockenspritzverfahren könnten für Deutschland folgende Argumente geltend gemacht werden:

- Die Tunnelbauprojekte an der Neubaustrecke sind durch große Querschnitte, eine schwierige Geologie und damit erforderliche hohe Mengen an Spritzbeton gekennzeichnet und bevorzugen daher das Nassspritzverfahren.
- Die Mischanlagen werden größtenteils direkt beim Tunnelportal aufgebaut - diese kurze Entfernung zwischen Mischanlage und Spritzbetoneinbauort stellt eine gute Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz des Nassspritzverfahrens dar.

III.2.4 Österreich

In Österreich kam bis zum Jahr 1992 hauptsächlich das **Trockenspritzverfahren** zur Anwendung. Zu diesem Zeitpunkt wurden ca. 95 % der Tunnelvortriebe mit dem Trockenspritzverfahren durchgeführt. Die Wahl des Trockenspritzverfahrens begründete sich in den nachstehenden Punkten:

- Die Vortriebsarbeiten erfolgen vorwiegend nach konventionellen Vortriebsmethoden mit Spritzbetonsicherung des Gebirges.
- Schwieriges Gebirge ist in Österreich die Regel und erfordert (insbesondere beim Ausbruch von Teilquerschnitten) oftmalige, schnelle und kleinflächige Versiegelungen freier Oberflächen mit Spritzbeton.
- Österreich verfügt über eine ausreichende Anzahl an hochqualifizierten Mineuren, die große Erfahrung bei der Verarbeitung und dem Aufbringen von Vortriebsspritzbeton mitbringen.

Im Laufe der Jahre hat sich der Trend aber deutlich vom Trockenspritz- zum **Nassspritzverfahren** verschoben. Bereits 1998 schreibt Lauffer [23] über erste Anwendungen des Nassspritzverfahrens in Österreich (z.B. 1997 beim östlichen Teil des Zammer Tunnels und 1999 beim Blisodonatunnel) und weist auf die zukünftige starke Bedeutung des Nassspritzverfahrens hin. Die Tabelle 3 gibt einen Überblick über den Einsatz der unterschiedlichen Verfahren bei Verkehrstunnelbauten für die Zeiträume 1997 – 1999 und 2000 – 2001.

Spritzbetonverfahren	2001 – 2000	1999 - 1997
NM	60 %	19 %
TM	12 %	25 %
FM-S	28 %	45 %
FM-L	0 %	11 %

Tabelle 3: Spritzverfahren im österreichischen Verkehrswegebau [22]

Dabei zeigt sich eine deutliche Verschiebung zu Gunsten des Nassspritzverfahrens, wobei sich die zunehmende Anwendung des Verfahrens insbesondere in der hohen Qualität des hergestellten Spritzbetons sowie in den guten arbeitsplatzhygienischen Bedingungen begründen dürfte. Außerdem sind die Preise für alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger in den letzten 5 Jahren um ca. 50 % gesunken, damit erscheint das Nassspritzverfahren auch wirtschaftlich konkurrenzfähig. Die baupraktischen „Großversuche“ unter sehr ungünstigen Zuständen (flächiger Wasserandrang) am Zammertunnel bzw. am Blisadonatunnel konnten die österreichischen Baufirmen zusätzlich von der Attraktivität des Nassspritzverfahrens überzeugen und haben damit auch zu dieser Trendumkehr beigetragen.

III.2.5 Schlussfolgerung

Nach diesem kurzen Überblick über die Spritzbetonverfahrenstechniken innerhalb Europas soll als Zusammenfassung der o.a. Erkenntnisse R. Sternath [35] zitiert werden: *„Es bleibt festzustellen, dass die Auswahl des zum Einsatz vorgesehenen Spritzbetonsystems sehr sorgfältig auf den jeweiligen Einsatzzweck abgestimmt werden muss. Mit allen eingesetzten Systemen wird bei der NBS(Neubaustrecke Köln – Rhein/Main) guter Spritzbeton erzeugt.“*

Mit der Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems für Spritzbetonverfahren im Tunnelbau soll ein Beitrag zur analytischen Vorgangsweise bei der Auswahl eines Verfahrens angeboten werden, eventuell vorhandene Ressentiments gegenüber anderen Spritzbetonverfahren sollen dabei sukzessive abgebaut werden.

Um zunächst einen Überblick über die derzeit verwendeten Spritzbetonverfahren, die baubetrieblichen Abläufe und die kostenrelevanten Parameter zu erhalten, werden die einzelnen Verfahrenstechniken in den Abschnitten III.3.2 bis III.3.5 dargestellt.

III.3 Verfahrenstechnik

III.3.1 Überblick

Spritzbeton ist je nach Verfahren ein Gemisch aus Zement, Zusatzstoffen, Spritzbindemittel, Zuschlägen, Wasser und Zusatzmittel. Dieses Gemisch wird mit Hilfe verschiedener Verfahrenstechniken an die Düse transportiert und mit Druckluft auf die Auftragsfläche geschleudert. Die Verdichtung des Spritzbetons erfolgt durch die Energie des Aufpralls [21]. Die Anwendung von Spritzbeton erstreckt sich über das gesamte Bauwesen. Insbesondere im Tunnelbau bewährt sich das Stützmittel Spritzbeton aber 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.

Mögliche Anforderungen an den Spritzbeton können im Überblick wie folgt dargestellt werden [21]:

- 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)
- Geringe Staubentwicklung
- Geringes Eluatverhalten

Für eine Klassifikation der Spritzbetonverfahrenstechniken werden die Zugabe von Trocken- und Nassmischgut (Ausgangsmischung) in die Spritzmaschine, die Art der Materialförderung (Dünn- oder Dichtstrom) und die Art der Zugabe von Wasser bzw. des Erstarrungsbeschleunigers vor der Düse als Unterscheidungsmerkmale herangezogen. Damit ergeben sich insgesamt drei übergeordnete Spritzbetonverfahrenstechniken:

- Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut (< 0,2 % Eigenfeuchte)
- Trockenspritzverfahren mit naturfeuchtem Mischgut (2,0 – 4,0 % Eigenfeuchte)
- Nassspritzverfahren im Dicht- oder Dünnstromverfahren mit pulverförmigen oder flüssigen Erstarrungsbeschleunigern (< 8,0 % Eigenfeuchte)

Unter Berücksichtigung der o.a. Kriterien und der Zusammensetzung bzw. Herstellung des Mischguts, der Materialförderung und der Verarbeitung vor Ort, kann folgender grober Überblick über die Spritzbetonverfahren in Tabellenform gegeben werden (s. Tabelle 4):

	Trockenspritzbeton			Nassspritzbeton
MISCHGUT				
Wassergehalt der Gesteinskörnung	$W < 0,2 \text{ M-\%}$	Regelbereich $W = 2,0$ bis $4,0 \text{ M-\%}$ Streubereich $W = 1,5$ bis $5,0 \text{ M-\%}$		$W \leq 8 \text{ M-\%}$
Bezeichnung	Trocken-Mischgut	Feucht-Mischgut lagerfähig	Feucht-Mischgut mit sofortiger Anwendung	Nass-Mischgut (Pumpbeton)
Kurzbezeichnung	TM	FM-L	FM-S	NM
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 Mischeranlage	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 Langzeit- verzögerung)	Bevorratung nach Bedarf	Produktion auf Bevorratung, Verarbeitung innerhalb der Lagerzeit ($\leq 1,5 \text{ h}$)	Produktion für unmittelbaren Bedarf	Produktion auf Bevorratung, Verarbeitung innerhalb der Lagerzeit (max. $1,5 \text{ h}$)
MISCHGUT- FÖRDERUNG	Dünnstrom (Dosierglasschnecke) – Dichtigkeit wesentlich für Staubreduktion	Dünnstrom (Rotorspritzmaschine) – Dichtigkeit wesentlich für Staubreduktion	Dünnstrom (Rotorspritzmaschine)	Dichtstrom (Kolbenpumpe) Dünnstrom (adaptierte Rotorspritzmaschine)
GERÄTE	Dosierglasschnecke, kompaktes Spritzmobil oder Silo + Fördereinheit	Hydrokuli, Förderband, Dosiereinrichtung für EB und Zement, SpB- Maschine	Fahrbare oder stationäre Misch- und Aufgabeeinheit, SpB- Maschine	Kompaktes Spritzmobil, Transportbetonmischer
FÖRDERLEITUNG	Schlauch- oder Rohrleitung	Schlauch- oder Rohrleitung	Schlauch- oder Rohrleitung	Rohrleitungen (analog Pumpbeton)
WASSERZUGABE	Hauptbenetzungs- bzw. Vorbenetzungsdüse erforderlich	Hauptbenetzungsdüse	Hauptbenetzungsdüse	Direkt in der Transport- oder Baustellenmischeranlage
ERSTARRUNGS- BESCHLEUNIGER ZUGABE	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
SPRITZDÜSE	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.
DÜSENFÜHRUNG	Manuell / Spritzmanipulator	Manuell / Spritzmanipulator	Manuell / Spritzmanipulator	Spritzmanipulator

Tabelle 4: Überblick über Spritzbetonverfahrenstechnik

III.3.2 Trockenspritzverfahren mit Trockenmischgut

Das für dieses Verfahren erforderliche ofentrockene Trockenmischgut (TM) setzt sich aus trockenen Zuschlägen mit Tunnelzement (eventuell Zusatzstoffen) oder mit Spritzbindemittel (SBM-T oder SBM-FT) zusammen. Das Trockenmischgut wird zumeist als Werkmischung hergestellt, kann aber auch – bei entsprechenden Spritzbetonkubaturen und sofern eine Trocknungsanlage vorhanden ist – in einer baustelleneigenen Mischanlage gemischt werden. Die Eigenfeuchte des Trockenmischguts darf nach der Richtlinie für Spritzbeton des Österreichischen Betonvereins [34] max. 0,2 Massen-% betragen, diese Anforderungen an den Feuchtegehalt müssen sowohl bei der Herstellung als auch bei der Lagerung und dem Transport entsprechend berücksichtigt werden. Diese Anforderungen an das ofentrockene Mischgut bedingen drei Eigenschaften, die besonderer Beachtung bedürfen [23]:

- Entmischungsneigung im Vorratssilo.
- Erhöhtes Staubpotential beim Materialumschlag (Silo – TM-Mobile bzw. direkt beim Spritzbetonauftrag).
- Erhöhte Mischguttemperatur infolge der Gesteinskörnungstrocknung.

Das werkseitig gelieferte oder auf der Baustelle vorbereitete Trockenmischgut wird daher mit geschlossenen Transportfahrzeugen zur Baustelle transportiert und zunächst in stationären Silos in der Nähe des Tunnelportals zwischengelagert. Die Lagerfähigkeit des TM beträgt bis zu mehreren Monaten. Während der Zwischenlagerung müssen die Vorratssilos aus folgenden Gründen unter atmosphärischem Überdruck stehen:

- Bei kurzen Tunnellängen bis zu derzeit 400 m ist eine Förderung des TM direkt vom Vorratssilo über eine Dosierblasschnecke (Förderschnecke mit Hohlseele) bis zur Spritzdüse möglich. Der Überdruck im Vorratssilo drückt dabei das Trockenmischgut in die Dosierblasschnecke, von dort erfolgt genau dosiert die weitere Materialförderung mittels Druckluft über Rohr- und Schlauchleitungen bis zum Einbauort (s. Abbildung 13).

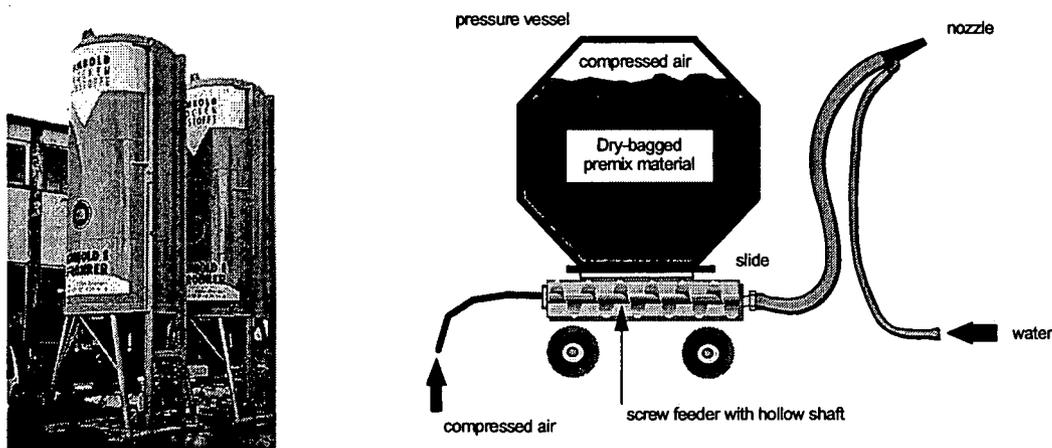


Abbildung 13: Spritzbetonsilo Fa. Rombold [28] (links) – Prinzipskizze Spritzsystem [32] (rechts)

- Bei großen Entfernungen zwischen dem Vorratssilo und dem Einbauort im Tunnel (mehr als 400 m) kann das Trockenmischgut nicht mehr mit Druckluft über die gesamte Vortriebslänge vom stationären Vorratssilo zur Spritzdüse (= Einbauort) geblasen werden. Für diesen Fall werden sogenannte „TM-Mobile“ (s. Abbildung 14) als flexible Transport- bzw. Spritzgeräte eingesetzt.

Auf diesen tunneltauglichen radgebundenen Fahrzeugen sind zumeist zwei Druckkessel für das Trockenmischgut (Fassungsvermögen ca. 10 m³ pro Druckkessel) und zwei Dosierblasschnecken montiert, die das Mischgut dem Druckluftstrom zuteilen. Als Förderleitungen vom TM-Mobil zum Einbauort dienen Schlauchleitungen, die geradlinig oder möglichst in weiten Bögen zu verlegen sind und direkt an die Dosierblasschnecke am TM-Mobil angeschlossen werden.

An der Spritzdüse wird – unter entsprechendem Druck – Wasser zugegeben, der eventuell erforderliche Erstarrungsbeschleuniger ist bereits im Mischgut enthalten. Zur Staubreduktion können erforderlichenfalls Vorbenetzungsdüsen verwendet werden.

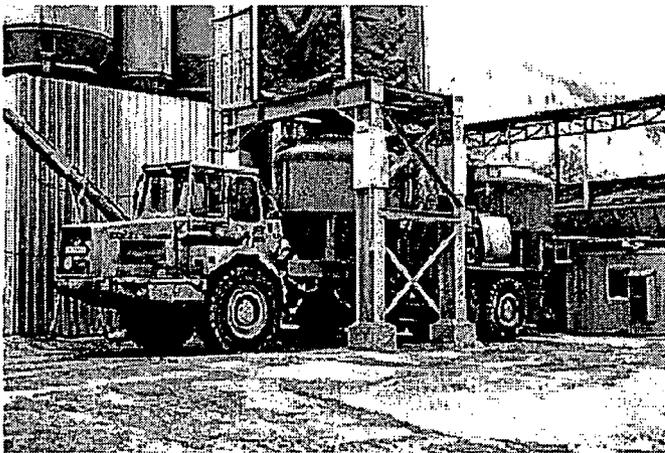


Abbildung 14: TM-Mobil am Tunnel Laimberg (Oberösterreich)

- Das Eindringen von atmosphärischer Luft mit einem hohen Luftfeuchtigkeitsgehalt und damit eine Erhöhung der Eigenfeuchte des Trockenmischguts muss verhindert werden.
- Bei der Verwendung von Spritzbindemittel ergeben sich durch die geschlossenen Systeme (stationäre Drucksilo bzw. TM-Mobile) Verbesserungen hinsichtlich des Staubanfalles bei der Verarbeitung der ofentrockenen Mischungen.

Die baubetrieblichen Abläufe von der Anlieferung des Materials zur Baustelle bis zum Spritzbetonauftrag sind für das Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut in der Abbildung 15 dargestellt und bilden gleichzeitig die Grundlage für die entsprechende Musterkalkulation (s. Kapitel V).

Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut

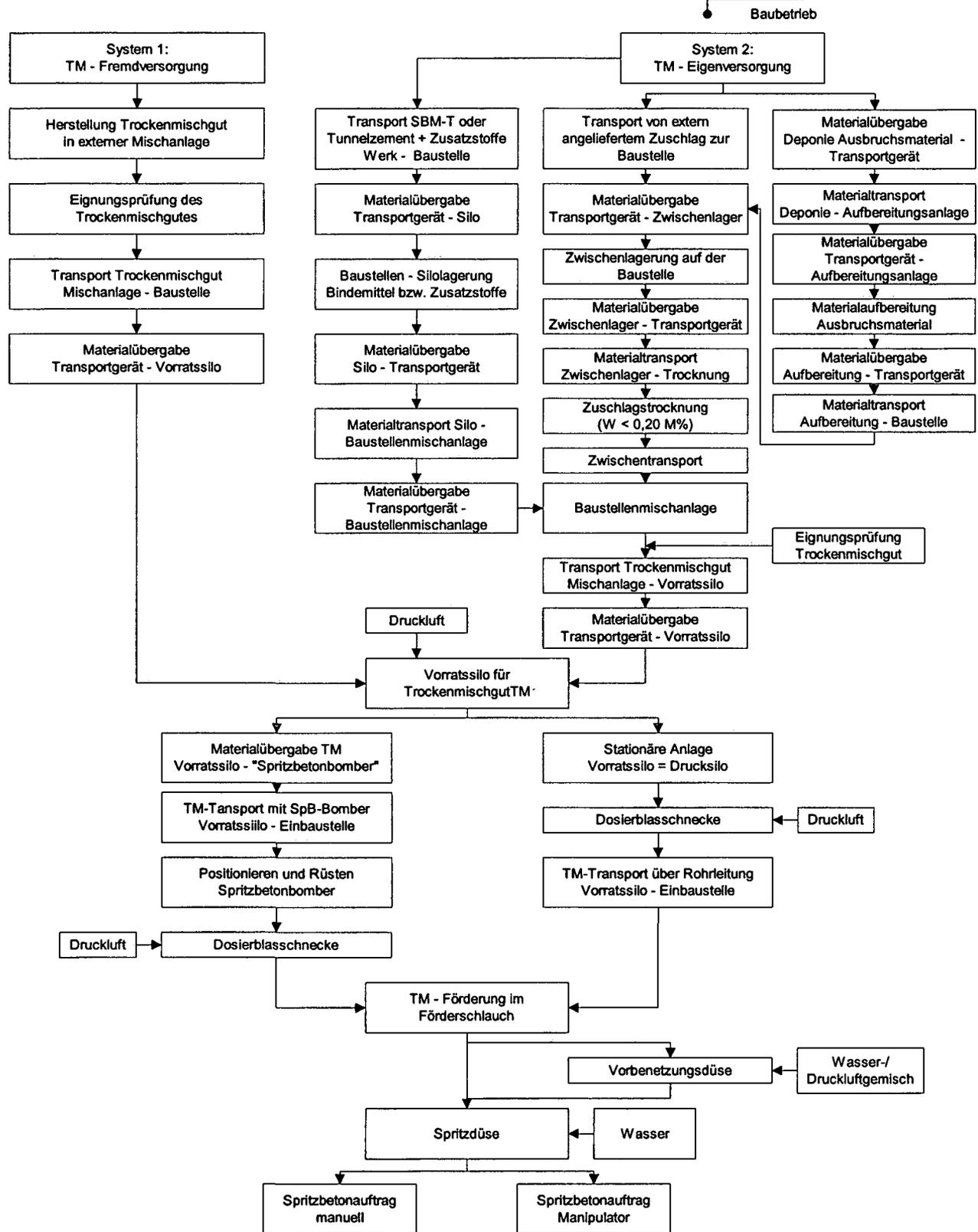


Abbildung 15: Flussdiagramm „Trockenspritzverfahren mit Trockenmischgut TM“

III.3.3 Trockenspritzverfahren mit lagerfähigem Feuchtmischgut (FM-L)

Das Feuchtmischgut setzt sich aus naturfeuchten Zuschlägen (die Eigenfeuchte liegt i.d.R. zwischen 2,0 Massen-% und 4,0 Massen-%), Tunnelzement und Zusatzstoffen zusammen. Das Feuchtmischgut kann sowohl in einem Transportbetonwerk, als auch in einer baustelleneigenen Mischanlage hergestellt werden und wird mittels LKW zur Verarbeitungsstelle transportiert und dort im Hydrokuli zwischengelagert.

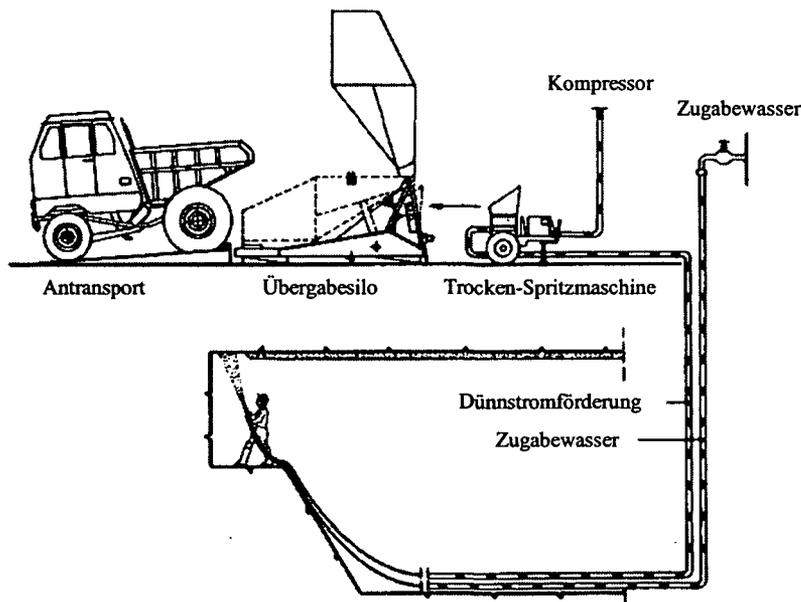


Abbildung 16: Prinzipskizze des Bauablaufs bei Verwendung von lagerfähigem Feuchtmischgut [25]

Es ist darauf zu achten, dass die Entfernung zwischen der Mischanlage bzw. dem Transportbetonwerk so bemessen wird, dass die zulässige maximale Verarbeitungszeit von 1,5 Stunden nicht überschritten wird. Die Mischgutförderung im Dünnsstromverfahren erfolgt häufig mit Rotorspritzmaschinen (s. Abbildung 17).

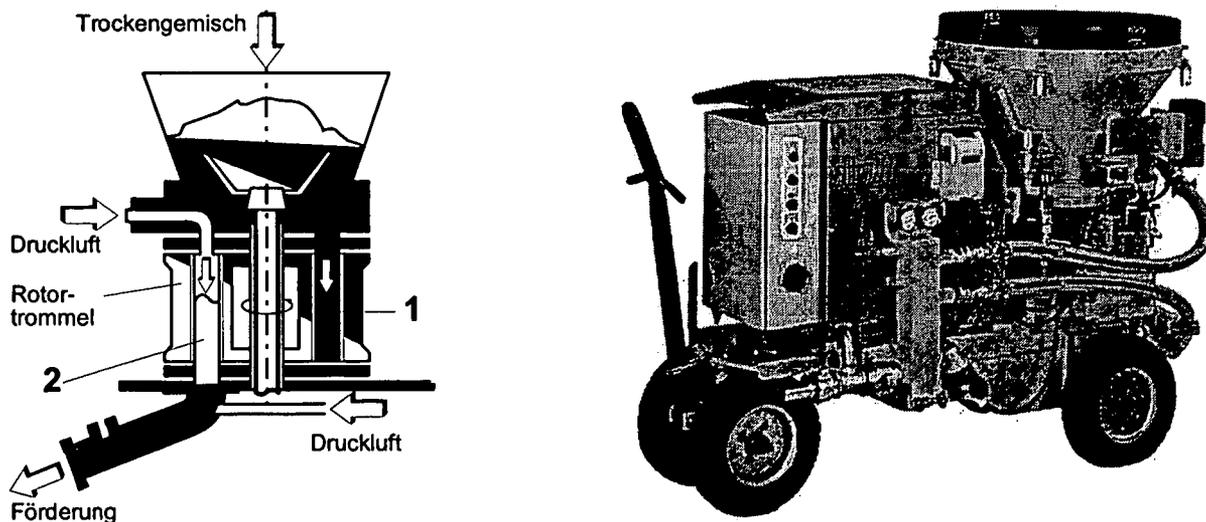


Abbildung 17: Schnitt durch Rotorspritzmaschine (links) [20] – Spritzmaschine ALIVA 262 (rechts) [26]

Bei der Rotorspritzmaschine kommt das Material zunächst in einen offenen Vorratsbehälter. Darunter befindet sich eine Rotationstrommel (vergleichbar dem Magazin eines Revolvers), die mechanisch angetrieben wird. Im Bereich 1 wird das Material in den Trommelzylinder gefüllt, im Bereich 2 wird das Material durch die Beaufschlagung mit Druckluft aus dem Trommelzylinder nach unten in die Förderleitung gepresst (s. Abbildung 17). Zur Abdichtung der rotierenden Trommel zwischen den beiden Bereichen 1 und 2 wird ober- und unterhalb der Trommel eine Gummiplattendichtung eingelegt. Diese Gummidichtungen unterliegen einem erheblichen Verschleiß und müssen regelmäßig erneuert werden, um bei auftretenden Undichtigkeiten nicht allzu große Staubentwicklungen zu verursachen.

Die Zugabe des flüssigen oder pulverförmigen Erstarrungsbeschleunigers erfolgt direkt bei der Verarbeitung (s. Abbildung 18). Bei der Verwendung flüssiger EB sorgen Dosierpumpen für eine exakte Dosierung, bei pulverförmigen EB werden Schneckendosiergeräte oder Kettenbandförderer eingesetzt.

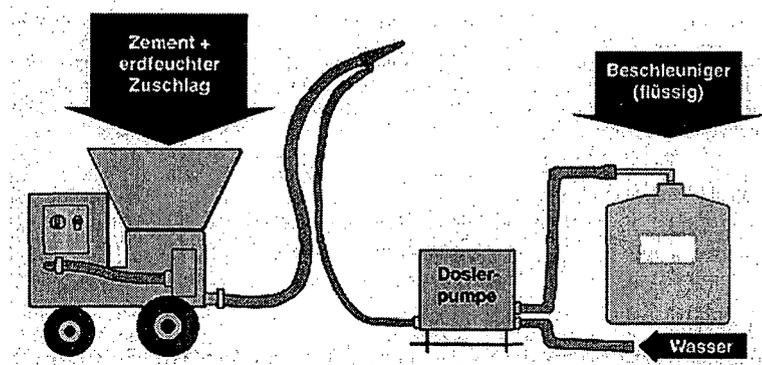


Abbildung 18: Trockenspritzverfahren mit FM-L und flüssigem EB [21]

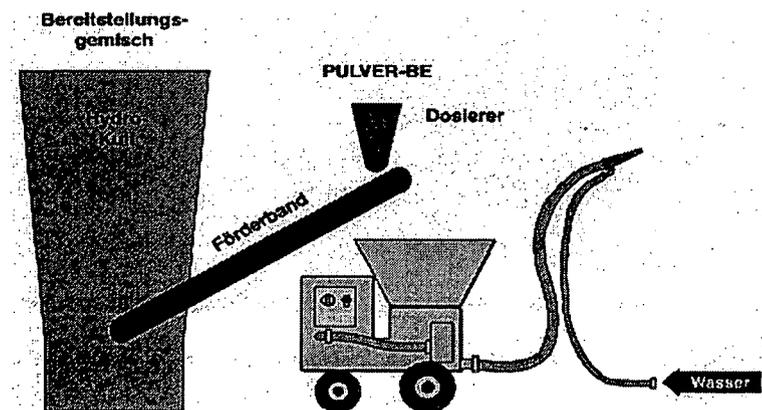


Abbildung 19: Trockenspritzverfahren mit FM-L und pulverförmigem EB [21]

Die baubetrieblichen Abläufe von der Anlieferung des Materials zur Baustelle bis zum Spritzbetonauftrag sind für das Trockenspritzverfahren mit lagerfähigem Feuchtmischgut in der Abbildung 20 dargestellt. Dieses Flussdiagramm bildet gleichzeitig die Grundlage für die Musterkalkulation dieses Spritzbetonverfahrens (s. Kapitel V).

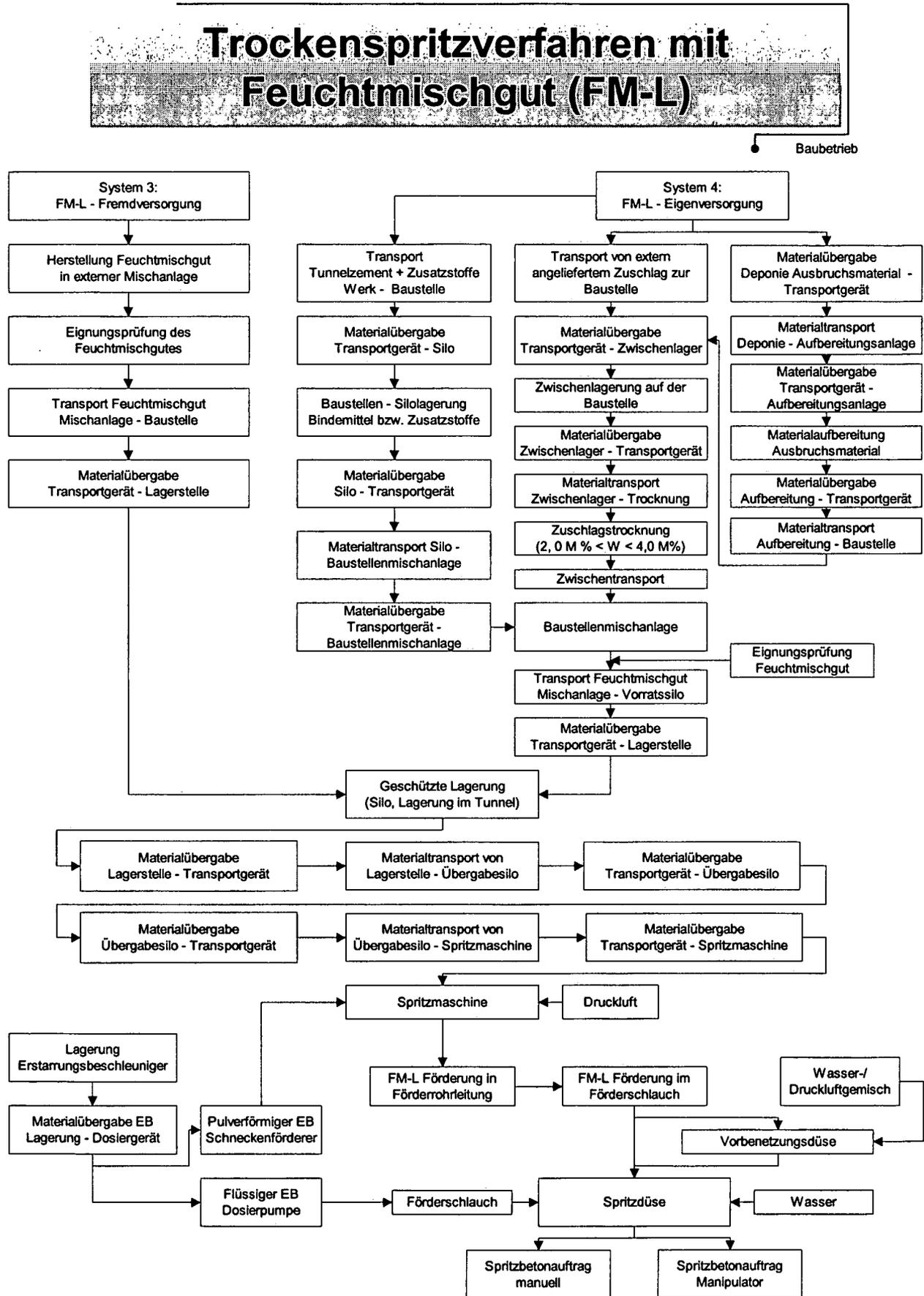


Abbildung 20: Flussdiagramm „Trockenspritzverfahren mit Feuchtmischgut FM-L“

Beim Trockenspritzverfahren mit lagerfähigem Feuchtmischgut stellt die Gesteinskörnungstrocknung (s. Abbildung 20) oftmals keinen eigenen Verfahrensschritt dar, sondern wird lediglich dem Zufall überlassen – d.h. die Trocknung erfolgt allein durch die geschützte Zwischenlagerung auf der Baustelle.

III.3.4 Trockenspritzverfahren mit sofort anwendbarem Feuchtmischgut (FM-S)

Beim Trockenspritzverfahren mit Feuchtmischgut mit sofortiger Anwendung wird naturfeuchte Gesteinskörnung (Eigenfeuchte i.d.R. zwischen 2,0 Massen-% und 4,0 Massen-%) und ein spezielles, neuentwickeltes Spritz-Bindemittel (SBM-FT) verwendet.

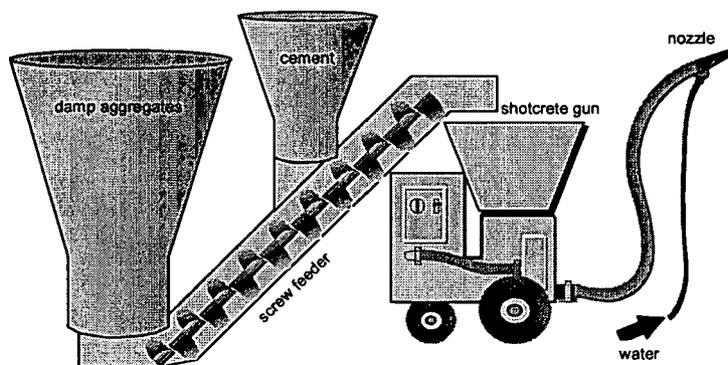


Abbildung 21: Prinzipskizze Verfahrenstechnik [32]

Aufgrund der schnellen, „blitzartigen“ Reaktionszeit des Spritzbindemittels innerhalb weniger Minuten erfolgt die Herstellung des Feuchtmischguts mittels Durchlaufmischung direkt bei der Verarbeitung in einer tunneltauglichen Mischanlage („Mobile Mischanlage“ - s. Abbildung 22).

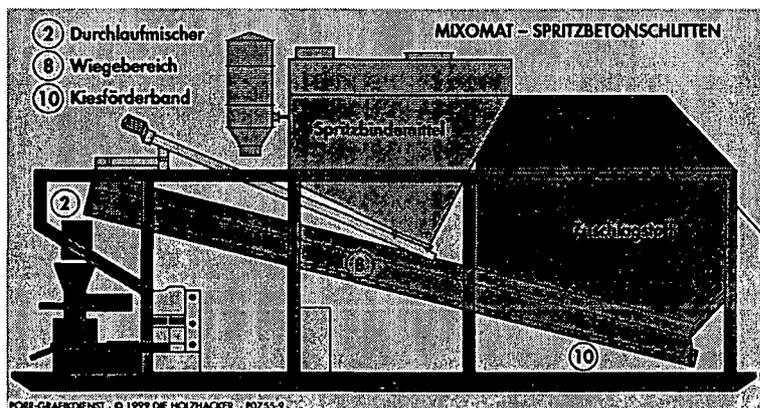


Abbildung 22: Mobile Mischanlage - Spritzbetonschlitten „Mixomat“ [31]

Die mobile Mischanlage ist eine vollautomatische Dosier- und Mischanlage in ein- bis dreibahniger Ausführung, d.h. zur Förderung des Mischguts im Dünnstromverfahren stehen ein bis drei Rotorspritzmaschinen zur Verfügung. Die Anlage ist auf einem Schlitten (oder einer Raupe) aufgebaut und kann, entsprechend den baubetrieblichen Abläufen im Tunnel, mit dem Vortrieb mitgezogen werden.

Die mobile Mischanlage besteht im Wesentlichen aus je einem Vorratsbehälter für Gesteinskörnung und Spritzbindemittel. Die Beschickung des Vorratsilos mit Gesteinskörnungen kann von einer geschützten Zwischendeponie im Tunnel mittels Radlader oder Förderband erfolgen. Das Spritzbindemittel kann dabei entweder von einem geschlossenen Silowagen in den Vorratssilo umgeblasen werden oder mit einer automatischen Einblaseeinrichtung direkt von einem Zementsilo (ist allerdings nur bei kurzen Tunnelvortrieben möglich) gefördert werden.

Die Grobdosierung der Gesteinskörnung erfolgt über einen Schieber am Abzugsförderband, die genaue Mengenermittlung erfolgt anschließend durch eine Bandverwiegung der Gesteinskörnung. Entsprechend den geologischen bzw. baubetrieblichen Anforderungen kann die Mischgutzrezeptur über eine elektronische Steuerung laufend angepasst werden. Nach Eingabe der erforderlichen Mischgutzrezeptur wird das Spritzbindemittel mit einer Zementschnecke zu einem Wiegeband gefördert und genau zudosiert. Gesteinskörnung und Spritzbindemittel fallen anschließend in einen Durchlaufmischer und werden im Gegenstromprinzip gemischt. Nach einer extrem kurzen Verweilzeit im Mischer (ca. 2 Sekunden) wird das Mischgut an eine Rotorspritzmaschine übergeben und im Dünnstromverfahren zur Düse gefördert. Fallweise kann direkt bei der Verarbeitung ein Erstarrungsbeschleuniger zugegeben werden.

Die Unterschiede dieser modifizierten Spritzbetonverfahrenstechnik (fallweise auch **New Austrian Torkret System**, kurz **NATS**, genannt) gegenüber den Trockenspritzverfahren mit Trockenmischgut bzw. lagerfähigem Feuchtmischgut stellen sich wie folgt dar (s. [20] & [31]):

- Es ist keine kostenintensive Trocknung der Zuschläge erforderlich.
- Durch die Verwendung von Feuchtmischgut zeigt sich eine geringere Staubentwicklung am Beschickungssystem.
- Der effektive Bedarf an Spritzbeton kann mit dieser Verfahrenstechnik unmittelbar vor Ort produziert werden.
- Die Festigkeit kann an die Anforderungen der Geologie bzw. des Bauablaufes abgestimmt werden.

Die baubetrieblichen Abläufe von der Anlieferung des Materials zur Baustelle bis zum Spritzbetonauftrag sind für das Trockenspritzverfahren mit lagerfähigem Feuchtmischgut in der Abbildung 23 dargestellt. Dieses Flussdiagramm bildet gleichzeitig die Grundlage für die Musterkalkulation dieses Spritzbetonverfahrens (s. Kapitel V).

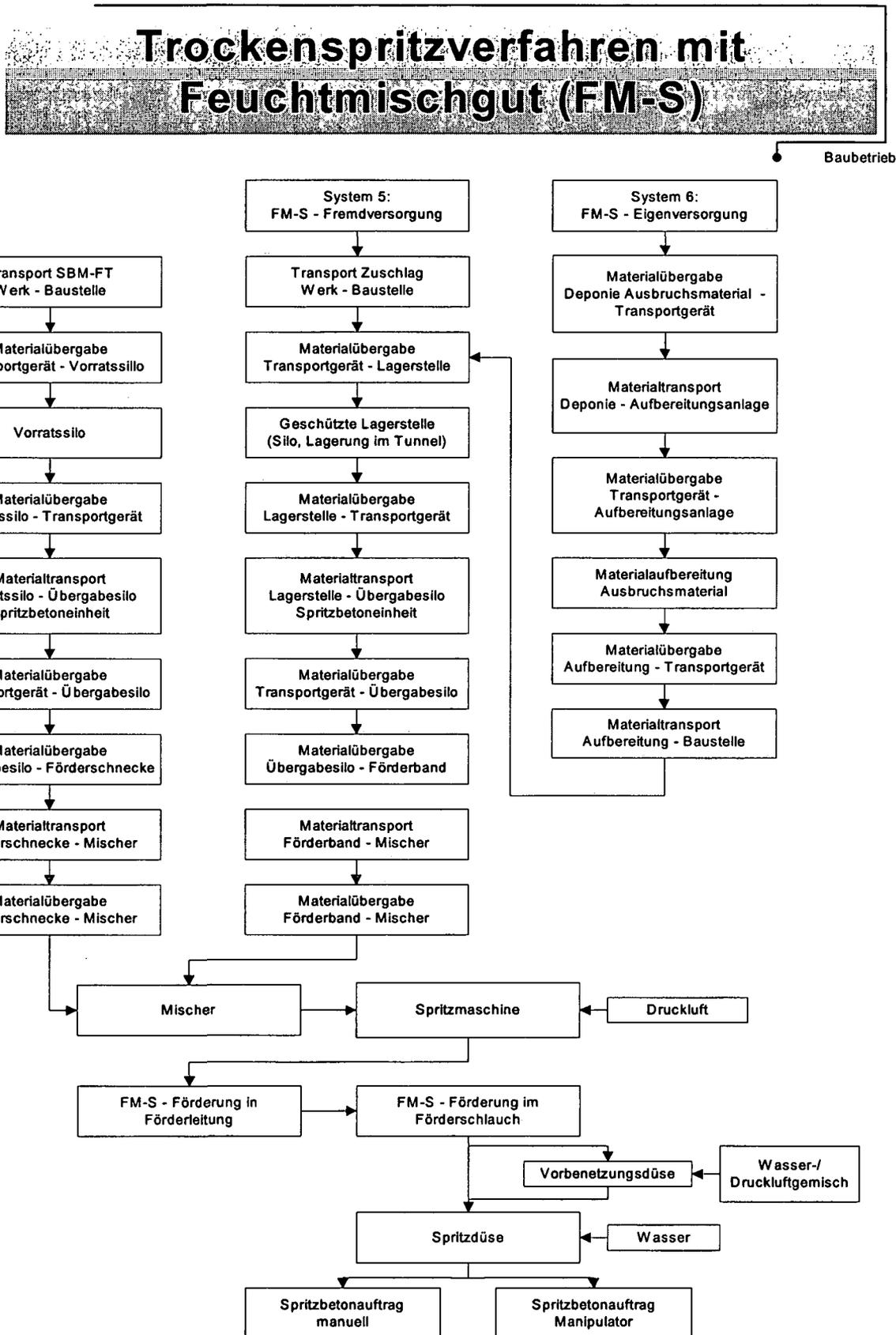


Abbildung 23: Flussdiagramm „Trockenspritzverfahren mit Feuchtmischgut FM-S“

III.3.5 Nassspritzverfahren (Dichtstrom)

Beim Nassspritzverfahren werden Gesteinskörnung, Tunnelzement, Zusatzstoffe und Wasser entweder in einem Transportbetonwerk oder einer baustelleneigenen Mischanlage gemischt und mit Fahrmischern zum Einbauort transportiert. Die Verarbeitungszeit des Transportbetons darf in der Regel 1,5 Stunden nicht überschreiten, kann aber durch die gezielte Verwendung von Verzögerern verlängert werden.

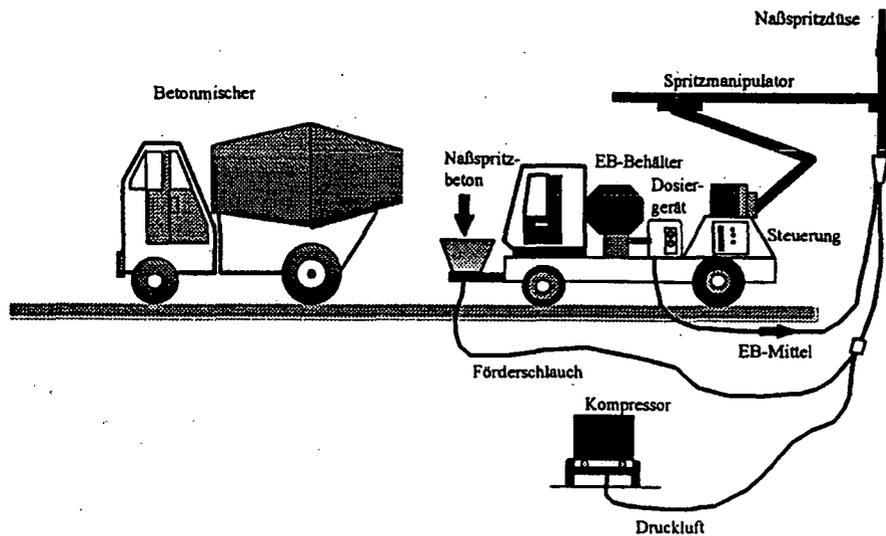


Abbildung 24: Prinzipskizze Nassspritzverfahren im Dichtstrom [18]

In der nachfolgenden Abbildung 25 wird vorerst ein Überblick über die Fördertechniken beim Nassspritzverfahren gegeben. Die Materialförderung beim Nassspritzverfahren kann sowohl pneumatisch (auch Dünnstromverfahren oder Pfropfenverfahren genannt), als auch hydraulisch (Dichtstromverfahren) erfolgen.

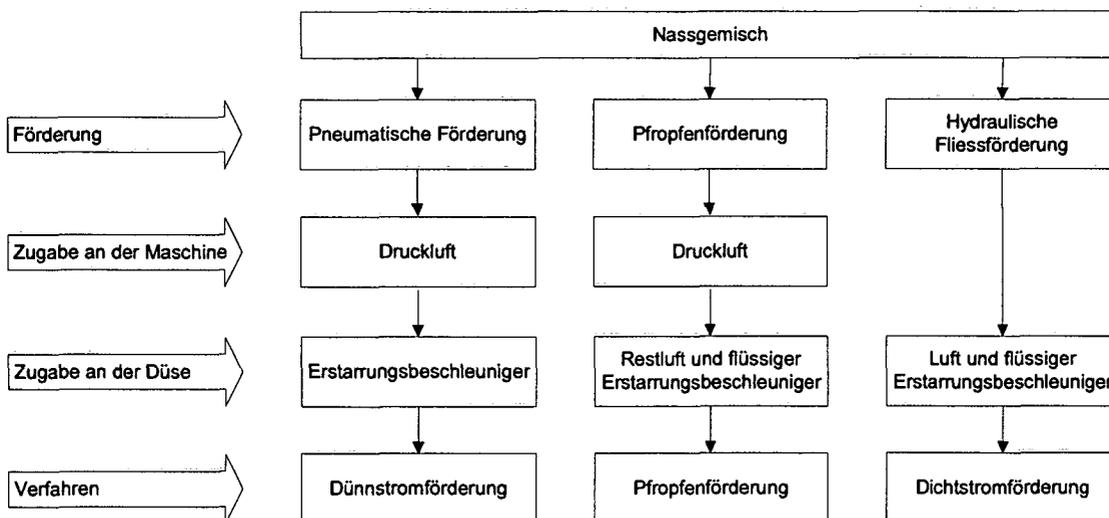


Abbildung 25: Übersicht über die Fördertechniken beim Nassspritzverfahren

Aufgrund der hohen Diskontinuität bei der Förderung kommt die Propfenförderung für Spritzbeton nicht zum Einsatz, sondern wird lediglich bei kleinflächigen Estricharbeiten eingesetzt.

Das Nassmischgut wird beim Dichtstromverfahren vom Fahrmischer direkt an den Aufgabetrichter einer Nassspritzmaschine übergeben und zumeist mit Kolbenpumpen (s. Abbildung 26) zur Spritzdüse gefördert. Die Richtlinie für Spritzbeton [34] empfiehlt zur Reduktion der Förderunterbrechung beim Umschaltvorgang von Kolbenpumpen einen kurzen Hub, eine schnelle Weichensteuerung und eine beschleunigte Kolbengeschwindigkeit im Bereich des ungefüllten Kolbenbereiches.

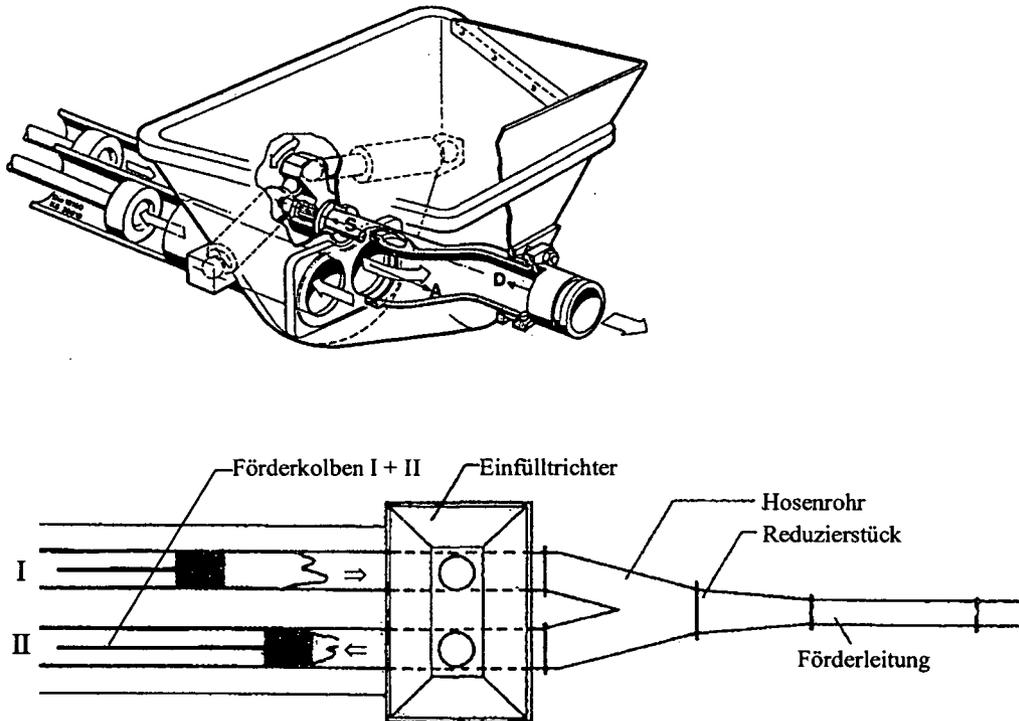


Abbildung 26: Kolbenpumpe zur Dichtstromförderung [20]

An der Spritzdüse wird der Dichtstrom mit Druckluft „aufgerissen“ und gleichzeitig beschleunigt, um die erforderlichen Geschwindigkeiten für das Auftragen und Verdichten des Spritzbetons auf den Untergrund zu erreichen. Entsprechend den Anforderungen an den Spritzbeton kann an der Spritzdüse pulverförmiger oder flüssiger Erstarrungsbeschleuniger zugegeben werden.

Aufgrund der hohen erzielbaren Spritzleistungen und den daraus resultierenden Kräften an der Düse erfolgt die Düsenführung beim Nassspritzverfahren mit Dichtstromförderung grundsätzlich mit ferngesteuerten, maschinell geführten Spritzbetonmanipulatoren.

Die baubetrieblichen Abläufe von der Anlieferung des Materials zur Baustelle bis zum Spritzbetonauftrag sind für das Nassspritzverfahren im Dichtstrom in der Abbildung 27 dargestellt. Dieses Flussdiagramm bildet gleichzeitig die Grundlage für die Musterkalkulation dieses Spritzbetonverfahrens (s. Kapitel V).

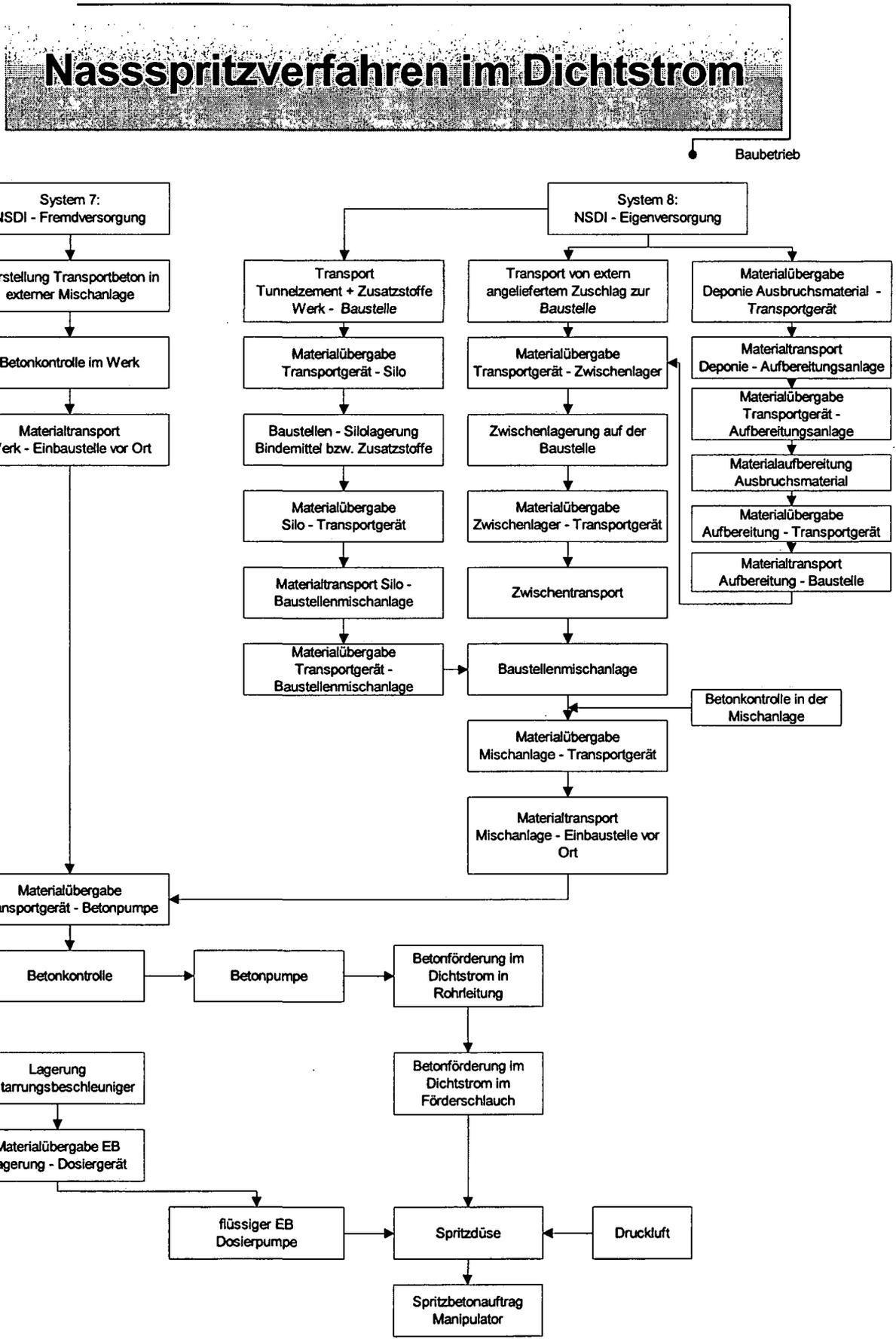


Abbildung 27: Flussdiagramm „Nassspritzverfahren im Dichtstrom“

III.3.6 Nassspritzverfahren (Dünnstrom)

Analog zum Dichtstromverfahren werden beim Nassspritzverfahren im Dünnstrom Gesteinskörnung, Tunnelzement, Zusatzstoffe und Wasser entweder in einem Transportbetonwerk oder einer baustelleneigenen Mischanlage gemischt und mit Fahrmischern zum Einbauort transportiert. Für die pneumatische Dünnstromförderung werden adaptierte Rotorspritzmaschinen verwendet. Erläuterung zum Aufbau und Funktionsprinzip von Rotorspritzmaschinen werden im Kapitel III.3.3 (s. auch Abbildung 17) gegeben.

Das Nassmischgut wird in den Aufgabetrichter der Rotorspritzmaschine gefüllt und mit bereits mit Druckluft zur Spritzdüse gefördert. An der Düse wird eventuell noch ein flüssiger Erstarrungsbeschleuniger zugegeben.

Die baubetrieblichen Abläufe von der Anlieferung des Materials zur Baustelle bis zum Spritzbetonauftrag sind für das Nassspritzverfahren im Dünnstromverfahren in der Abbildung 28 dargestellt. Dieses Flussdiagramm bildet gleichzeitig die Grundlage für die Musterkalkulation (s. Kapitel V).

Naßspritzverfahren im Dünnstrom

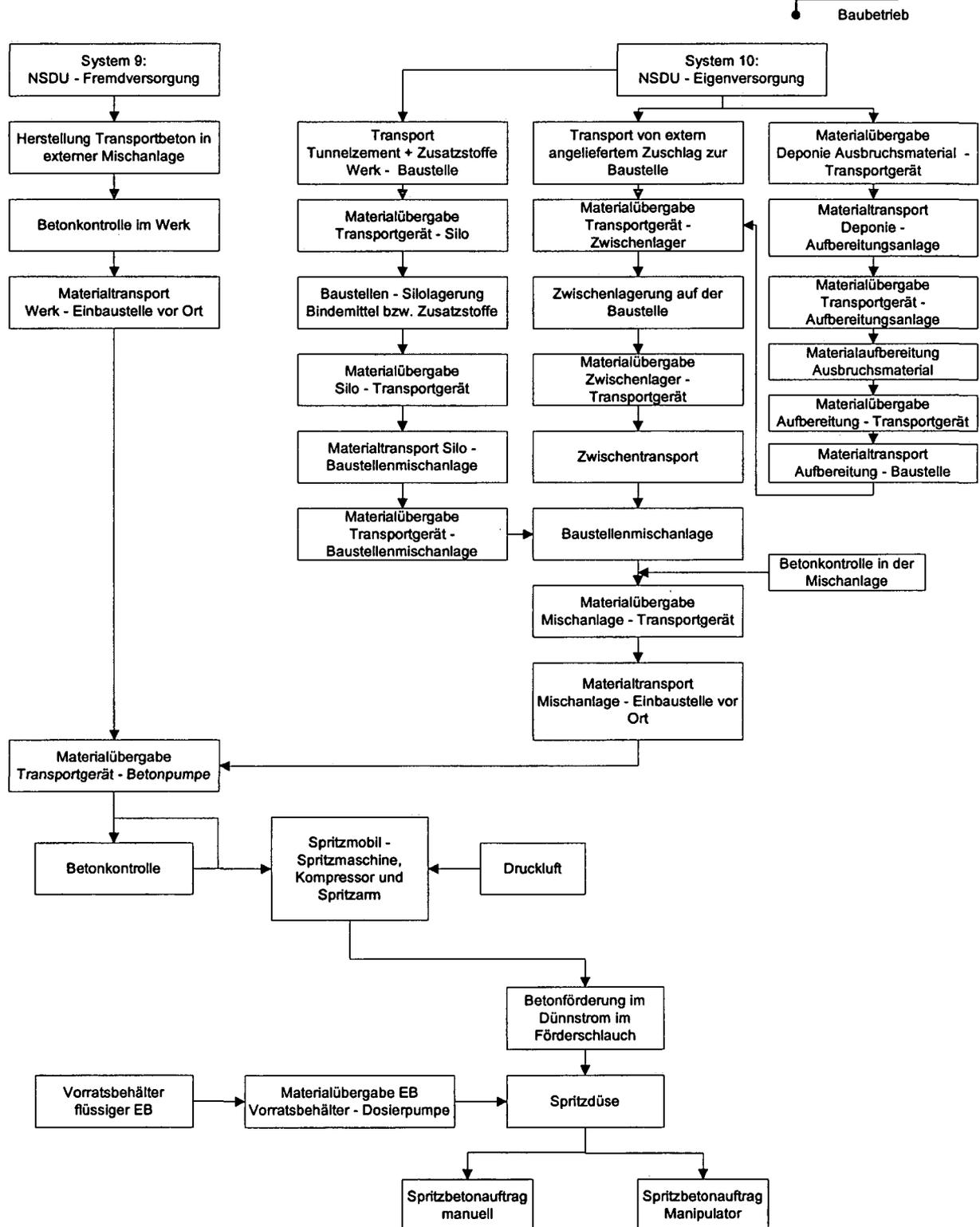


Abbildung 28: Flussdiagramm „Naßspritzverfahren im Dünnstrom“

IV Erfassung von Beurteilungskriterien

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

- Verfahrens unabhängige Beurteilungskriterien
- Verfahrens abhängige Beurteilungskriterien:
 - Baubetrieb,
 - Baustelleneinrichtung,
 - Betontechnologie,
 - Sicherheit und Gesundheitsschutz,
 - Wirtschaftlichkeit.

Die verfahrens abhängige Analyse der einzelnen Verfahren erfolgt in der gegenständlichen Arbeit für insgesamt 8 unterschiedliche Spritzbetonsysteme gemäß Abbildung 29. Die gewählten Kurzbezeichnungen werden auch in den nachfolgenden Kapiteln verwendet.

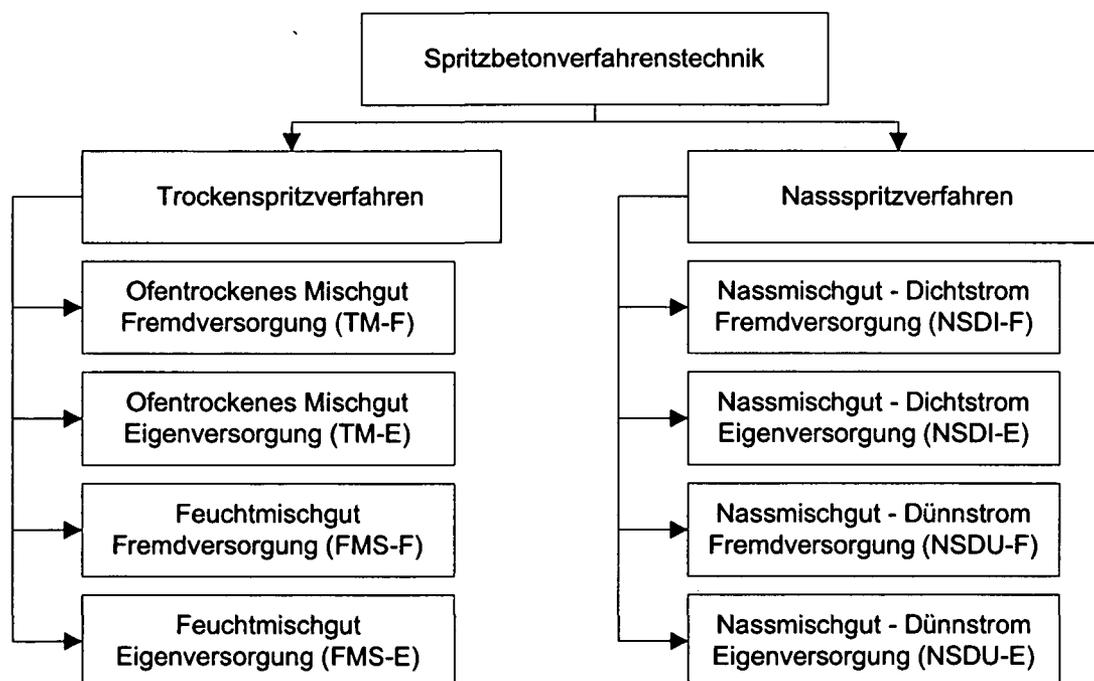


Abbildung 29: Übersicht über analysierte Spritzbetonsysteme

Mit Eigenversorgung wird dabei die Aufbereitung von Mischgut bzw. Gesteinskörnung 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.

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 der Abbildung 30 sind die verfahrensunabhängigen und die baubetrieblichen Beurteilungskriterien aufgelistet.

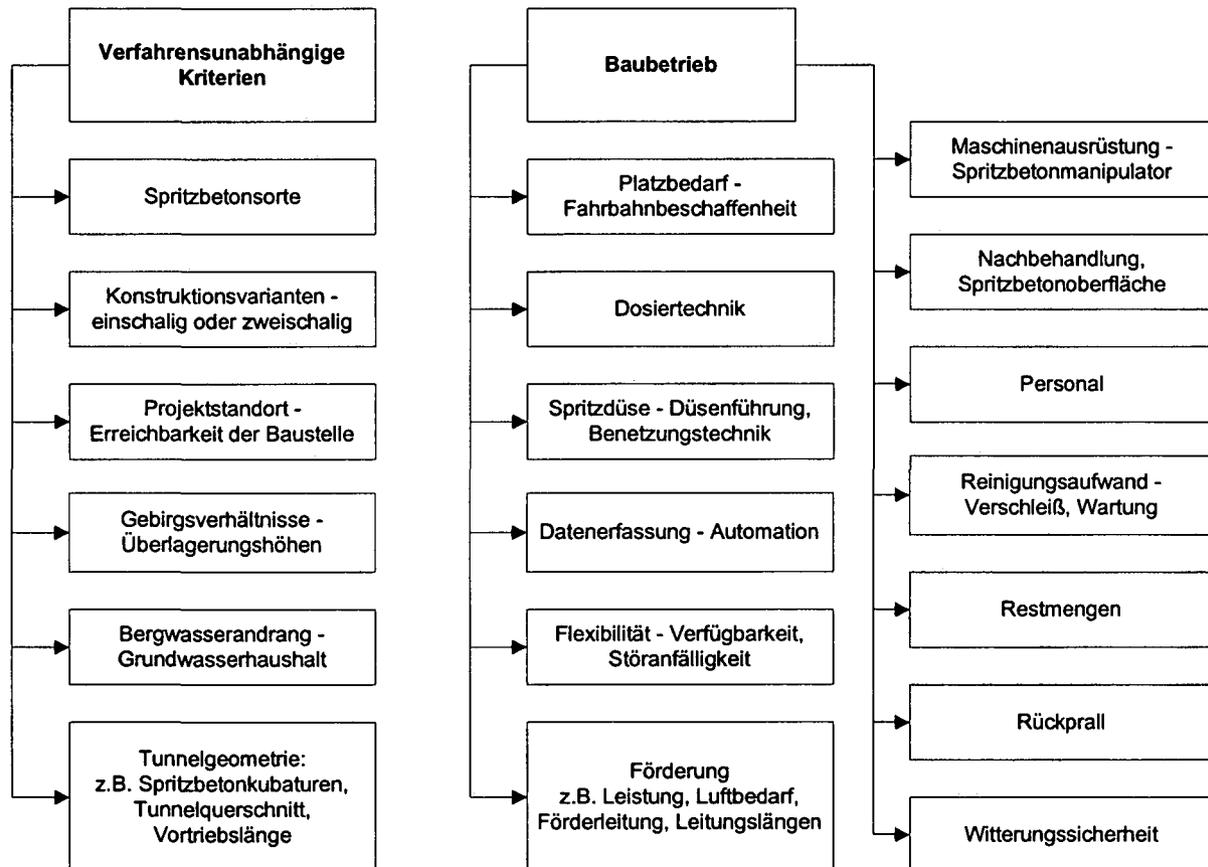


Abbildung 30: Verfahrensunabhängige und baubetriebliche Beurteilungskriterien

Dabei werden unter den verfahrensunabhängigen Parametern jene Kriterien verstanden, die bei dem zu bearbeitenden Tunnel- bzw. Stollenbauprojekt 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 Sicherheits- und Gesundheitsschutzes sind in der Abbildung 31 dargestellt. Beispielhaft können die Anforderungen an die Lagerfähigkeit des Mischgutes, der Platzbedarf der Baustelleneinrichtung, die Anforderungen an die Mischgutrezeptur oder die Staubeentwicklung vor Ort als wesentlich angeführt werden.

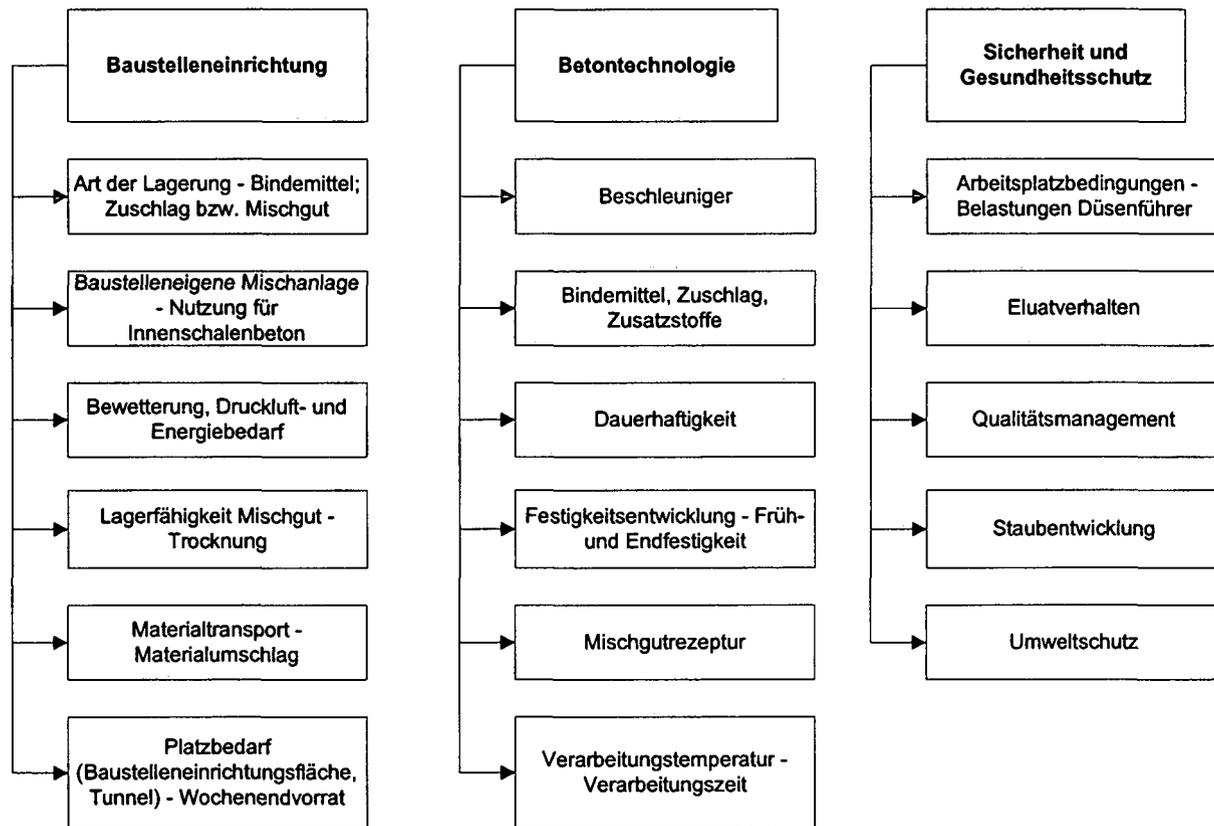


Abbildung 31: Übersicht über Beurteilungskriterien der Baustelleneinrichtung, der Betontechnologie und des Sicherheits- bzw. Gesundheitsschutzes

Der wirtschaftliche Aspekt wird in diesem Abschnitt nicht explizit angeführt, sondern im Kapitel V „Musterkalkulation“ ausführlich erläutert.

IV.2 Verfahrensunabhängige Beurteilungskriterien

Die verfahrensunabhängigen Beurteilungskriterien sind einerseits durch die ausgeschriebenen Anforderungen an den Spritzbeton (z.B. Spritzbetonklassen, Frühfestigkeitsklassen, Festigkeitsklassen und besondere Eigenschaften) vorgegeben und umfassen andererseits noch die nachfolgenden Punkte, die aus den Randbedingungen eines konkreten Projektes resultieren:

- Tunnelgeometrie (Spritzbetonkubaturen, Tunnelquerschnitt, Vortriebslänge)
- Geologie (Überprofil, Übermaß, geologisch bedingter Mehrausbruch)
- Bergwasserandrang (Rückprallverhalten und Wassermengen)
- Projektstandort (Erreichbarkeit der Baustelle, Entfernung zur Betonmischanlage)
- Konstruktionsvarianten für den Schalenaufbau (ein- oder zweischalige Bauweise)

Die verfahrensunabhängigen Beurteilungskriterien sind somit bei einem konkreten Tunnelbauprojekt durch die jeweiligen Randbedingungen vorgegeben und von sämtlichen in der engeren Verfahrensauswahl stehenden Spritzbetonverfahren bestmöglich zu erfüllen. In diesem Abschnitt IV.2 werden die verfahrensunabhängigen Beurteilungskriterien detailliert herausgearbeitet und bilden damit gleichzeitig die Eingangsparameter für die Musterkalkulation der einzelnen Spritzbetonverfahren.

IV.2.1 Spritzbetonsorte

Die jeweiligen Anforderungen an den Spritzbeton sind für ein konkretes Projekt im Rahmen der Bauvorlagen bzw. bei Planung und Ausschreibung (bei konstruktiven Leistungsbeschreibungen erfolgt die detaillierte Beschreibung in den Positionen des Leistungsverzeichnisses) festzulegen, wobei die Qualität des Spritzbetons über die Güteeigenschaften definiert wird.

In [52] werden für Spritzbeton, der für die Erstsicherung des Gebirges verwendet wird, folgende Anforderungen aufgelistet:

- Eine hohe Frühfestigkeit muss durch das rasche Erstarren des Spritzbetons gewährleistet sein.
- Hohe Auftragsleistungen müssen auch Überkopf erzielt werden.
- Der Spritzbeton muss eine gute Haftung am Untergrund aufweisen.
- Mit der Spritzbetonerstsicherung soll flächiger Wasserzutritt zurückgedrängt werden.
- Eine definierte Festigkeitsklasse (in der Regel SpB 22,5 nach 28 Tagen) muss – unter Berücksichtigung der Frühfestigkeit des Spritzbetons - erreicht werden.
- Spritzbeton soll wasserundurchlässig, dauerhaft und eventuell sulfatbeständig sein.

Die Richtlinie Spritzbeton berücksichtigt die Güteeigenschaften des Spritzbetons (Spritzbetonklassen, Frühfestigkeitsklassen, Festigkeitsklassen und besondere Eigenschaften) durch die Definition von Spritzbetonsorten (vgl. [106] / Punkt 7.5). Mit einer ausgeschriebenen Spritzbetonsorte sind somit erforderliche Güteeigenschaften – in Abhängigkeit von vorliegenden Expositionsklassen - klar festgelegt und nachweisbar.

In der Tabelle 5 sind entsprechende Beispiele für mögliche Spritzbetonsorten unter Berücksichtigung der Bezeichnungen lt. ÖNORM B 4710-1 [33] in tabellarischer Form dargestellt.

Verwendungszweck und Anforderungen	Betonsorte
Spritzbeton für Außenschale eines Verkehrstunnels	SpB C25/30(56)/III/J ₂
Spritzbeton für ständige Auskleidung eines Triebwasserstollens	SpB C25/30(90)/III/XC4
Spritzbeton für Außenschale mit Sulfatangriff	SpB C25/30(56)/III/J ₂ /XC4/XA4T/GK11
Spritzbeton als Unterlagsschicht für Abdichtungsbahnen	SpB C10/15/III/GK8
Spritzbeton für Brückeninstandsetzungsarbeiten	SpB C25/30/III/XF4/GK 4

Tabelle 5: Beispiele für Spritzbetonsorten [106]

Die Bezeichnung der Spritzbetonsorte ergibt sich beispielsweise für Spritzbeton für eine Außenschale unter Sulfatangriff mit **SpB C25/30(56)/III/J₂/XC4/XA4T/GK11**.

Dabei bedeuten die nachfolgenden Kurzbezeichnungen:

SpB C25/30 (56) Festigkeitsklasse C25/30 nach 56 Tagen (die Druckfestigkeit kann sich auf ein Alter von 28, 56 oder 90 Tagen beziehen), wobei eine charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Zylindern $\geq 25 \text{ N/mm}^2$ und von Würfeln $\geq 30 \text{ N/mm}^2$ zu erreichen ist. (vgl. [33])

III Geforderte Spritzbetonklasse SpB I, SpB II oder SpB III (vgl. IV.2.1.1)

J₂ Geforderte Frühfestigkeitsklasse J₁, J₂ oder J₃ (vgl. IV.2.1.2)

Die erforderlichen *besonderen Eigenschaften* (vgl. IV.2.1.4) ergeben sich aus den Expositionsklassen und werden mittels Kennbuchstaben dargestellt [33]:

XC3 bzw. XC4 Wasserundurchlässiger Spritzbeton
 XF1 bis XF4 Frost-Tausalzbeständiger Spritzbeton
 XA1T bis XA4T Treibender chemischer Angriff des Spritzbetons
 XA1L bis XA1L Lösender chemischer Angriff des Spritzbetons
 XM1 bis XM3 Mechanischer Angriff des Spritzbetons
 GK11 Größtkorn Gesteinskörnung 11 mm

Durch die Angabe einer geforderten Spritzbetonsorte in der Ausschreibung eines konkreten Projektes werden die wesentlichen Güteeigenschaften des Spritzbetons festgelegt und ein entsprechendes Anforderungsprofil an das auszuwählende Spritzbetonsystem definiert.

IV.2.1.1 Spritzbetonklasse

Der Verwendungszweck des Spritzbetons und seine jeweiligen konstruktiven Aufgaben werden durch die Einteilung in Spritzbetonklassen definiert. Es werden in der Richtlinie Spritzbeton [106] insgesamt drei Spritzbetonklassen unterschieden, wobei die jeweiligen Klassen unterschiedliche Anforderungen an den Spritzbeton (und damit auch indirekt an das Spritzbetonverfahren) hinsichtlich Verwendungszweck und konstruktiven bzw. sonstigen Anforderungen stellen:

- Spritzbeton ohne konstruktive Aufgaben (SpB I)
- Spritzbeton mit konstruktiven Aufgaben (SpB II)
- Spritzbeton mit besonderen konstruktiven Aufgaben (SpB III)

In der Tabelle 6 werden die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der einzelnen Klassen übersichtlich dargestellt.

Spritzbetonklasse	Beschreibung
SpB I	<ul style="list-style-type: none"> • Es werden geringe Anforderungen an die Güteeigenschaften gestellt. • Daher nur für untergeordnete Zwecke geeignet.
SpB II	<ul style="list-style-type: none"> • Spritzbeton übernimmt Sicherungs- und Stützfunktion. (z.B. Außenschale, Ortsbrust, Sicherung von Böschungen, Baugruben, Hangsicherungen). • Besondere Anforderungen werden an die Frühfestigkeit (Frühfestigkeitsklassen J_1, J_2, J_3) gestellt. • Es sind ausschließlich alkalifreie Beschleuniger bzw. Spritzzemente zu verwenden.
SpB III	<ul style="list-style-type: none"> • Spritzbeton übernimmt sämtliche konstruktive Aufgaben (z.B. Außenschale eines Hohlraumbaus unter Bebauung und geringer Überlagerung, einschalige Tunnelauskleidung). • Besondere Anforderungen können an die Frühfestigkeit (Frühfestigkeitsklassen J_1, J_2, J_3) gestellt werden. • Es sind ausschließlich alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger zu verwenden. • Es sollen Zuschläge mit einem Größtkorn von 11 mm zu verwenden.

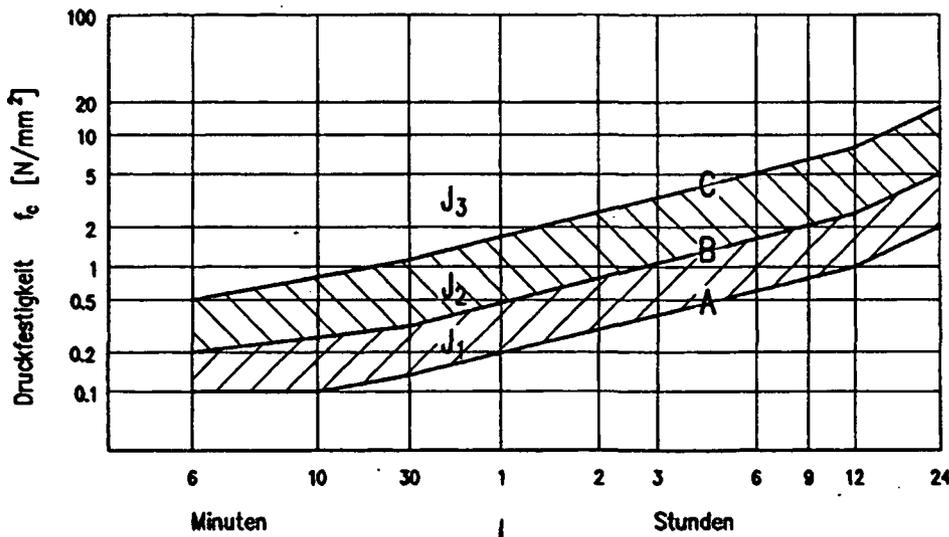
Tabelle 6: Beschreibung der Spritzbetonklassen SpB I bis SpB III

IV.2.1.2 Frühfestigkeitsentwicklung

Die Entwicklung der Frühfestigkeit beeinflusst maßgeblich die nachfolgenden Aspekte:

- Auftragsleistung über Kopf (nach 2 bis 6 Minuten sollte sich im Bereich J_2 eine Frühfestigkeit von ca. 0,2 bis 0,3 N/mm² einstellen)
- Zu hohe Frühfestigkeitswerte können die Ursache für eine starke Rückprall- und Staubentwicklung sein.
- Zu niedrige Frühfestigkeitswerte machen einen wirtschaftlichen Spritzbetonauftrag über Kopf unmöglich.

Die Anforderungen an den Spritzbeton hinsichtlich seiner Frühfestigkeitsentwicklung werden für ein Spritzbetonalter von 6 Minuten bis 24 Stunden in der Richtlinie Spritzbeton [106] durch drei Bereiche (J₁, J₂, J₃) in einem Zeit-Festigkeits-Diagramm (s. Abbildung 32) beschrieben.



zwischen A und B Klasse J₁
 zwischen B und C Klasse J₂
 über C Klasse J₃

Abbildung 32: Frühfestigkeitsklassen des Jungen Spritzbetons [106]

Die entsprechende Wahl einer Frühfestigkeitsklasse hängt vom Einsatzzweck des Spritzbetons ab (s. Tabelle 7):

Frühfestigkeits- klasse	Einsatzgebiet - Beanspruchungsmöglichkeiten
J1	<ul style="list-style-type: none"> Für Auftrag von dünnen Lagen auf trockenem Untergrund ohne besondere statischen Eigenschaften geeignet. Vorteil der geringeren Staubeentwicklung gegenüber den Frühfestigkeitsklassen J2 und J3.
J2	<ul style="list-style-type: none"> Der Auftrag von dicken Lagen (auch Überkopf) ist mit hoher Leistung möglich. Leichter Wasserandrang ist beherrschbar. Eine Beanspruchung durch unmittelbar nachfolgende Arbeitsvorgänge ist möglich (z.B. Bohren von Ankern). Gebirgsdruck, Erddruck oder nachdrängende Lasten sind beherrschbar.
J3	<ul style="list-style-type: none"> Wegen der erhöhten Staubeentwicklung und dem erhöhtem Rückprall wird diese Frühfestigkeitsklasse nur bei großem Wasserandrang und sehr schwierigen geologischen Verhältnissen eingesetzt. Die hohe Frühfestigkeit bewirkt unter Umständen einen hohen Festigkeitsabfall gegenüber dem Nullbeton.

Tabelle 7: Frühfestigkeitsklasse - Einsatzgebiet

Im Tunnelbau sollte die Frühfestigkeitsentwicklung in der Regel im Bereich J2 liegen. Nur in Ausnahmefällen, wie z.B. starkem Wasserandrang oder bei der Notwendigkeit einer sehr hohen Frühfestigkeit, sollte die Frühfestigkeitsklasse J3 ausgeschrieben werden. Allerdings ist in der Frühfestigkeitsklasse J3 mit einer erhöhten Staub- und Rückprallentwicklung zu rechnen [69].

IV.2.1.3 Festigkeitsklassen

Neben der Notwendigkeit einer hohen Frühfestigkeit des Spritzbetons bei der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode, hat die Endfestigkeit eine große Bedeutung für die Sicherheit des gesamten Ausbaus. Die **Druckfestigkeit nach 28 Tagen** wird dabei als **Endfestigkeit** des Spritzbetons bezeichnet. Das Prüfalter kann bei Verwendung von Zusatzstoffen (z.B. Flugasche) aufgrund der Nachhärtung auf 56 oder 90 Tage festgesetzt werden, wobei der Mittelwert der Druckfestigkeit anhand von fünf Bohrkernen zu einem festgelegten Zeitpunkt (28, 56 oder 90 Tage) bestimmt wird und damit den Nachweis der Spritzbetonfestigkeitsklasse darstellt. Entsprechend der Richtlinie Spritzbeton und unter Berücksichtigung von [33] ergeben sich folgende Festigkeitsklassen (s. Tabelle 8):

Spritzbeton-Festigkeitsklasse	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Zylindern in N/mm ²	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Würfeln in N/mm
SpB C8/10	≥ 8	≥ 10
SpB C12/15	≥ 12	≥ 15
SpB C16/20	≥ 16	≥ 20
SpB C20/25	≥ 20	≥ 25
SpB C25/30	≥ 25	≥ 30
SpB C30/37	≥ 30	≥ 37

Tabelle 8: Spritzbeton-Festigkeitsklasse

Außer den genannten Festigkeitsanforderungen, die bereits über die Festigkeitsklassen der Richtlinie Spritzbeton vorgegeben sind (s. [106] – Pkt. 7.3), können auch noch zusätzliche Anforderungen wie z.B. Festigkeiten nach 6 Stunden, 24 Stunden oder 3 Tagen vertraglich festgelegt werden.

IV.2.1.4 Besondere Eigenschaften

Die EN 206-1 teilt die durch die Umgebung entstehenden Einwirkungen auf den Beton in Expositionsklassen ein. Unter Umgebung werden dabei jene chemischen und physikalischen Einwirkungen verstanden, denen der Beton ausgesetzt ist und die zu Wirkungen auf den Beton oder die Bewehrung bzw. eingebettetes Metall führen und die nicht als Lasten in der Tragwerkplanung berücksichtigt werden.

Als Beispiele für Expositionsklassen werden in der ÖNORM B 4710-1 folgende Bezeichnungen verwendet (s. [33]):

- Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko: X0
- Korrosion ausgelöst durch Karbonatisierung: XC
- Korrosion ausgelöst durch Chloride: XD
- Frostangriff mit und ohne Taumittel: XF
- Chemischer Angriff: XA
- Verschleißbeanspruchung: XM

IV.2.2 Tunnelgeometrie

Wesentliche verfahrensunabhängige Eingangsparameter bei der Entscheidungsfindung für ein Spritzbetonsystem im konventionellen Tunnelbau ergeben sich aus der Geometrie eines Tunnelprojektes. Aus diesem Grund werden wesentliche tunnelbautechnische Begriffe für den Tunnelquer- bzw. Tunnellängenschnitt in den Abbildung 33 und Abbildung 34 dargestellt, um in den nachfolgenden Kapiteln der gegenständlichen Arbeit für die entsprechenden Vortriebsorte einheitliche Begriffe bzw. Bezeichnungen zu verwenden.

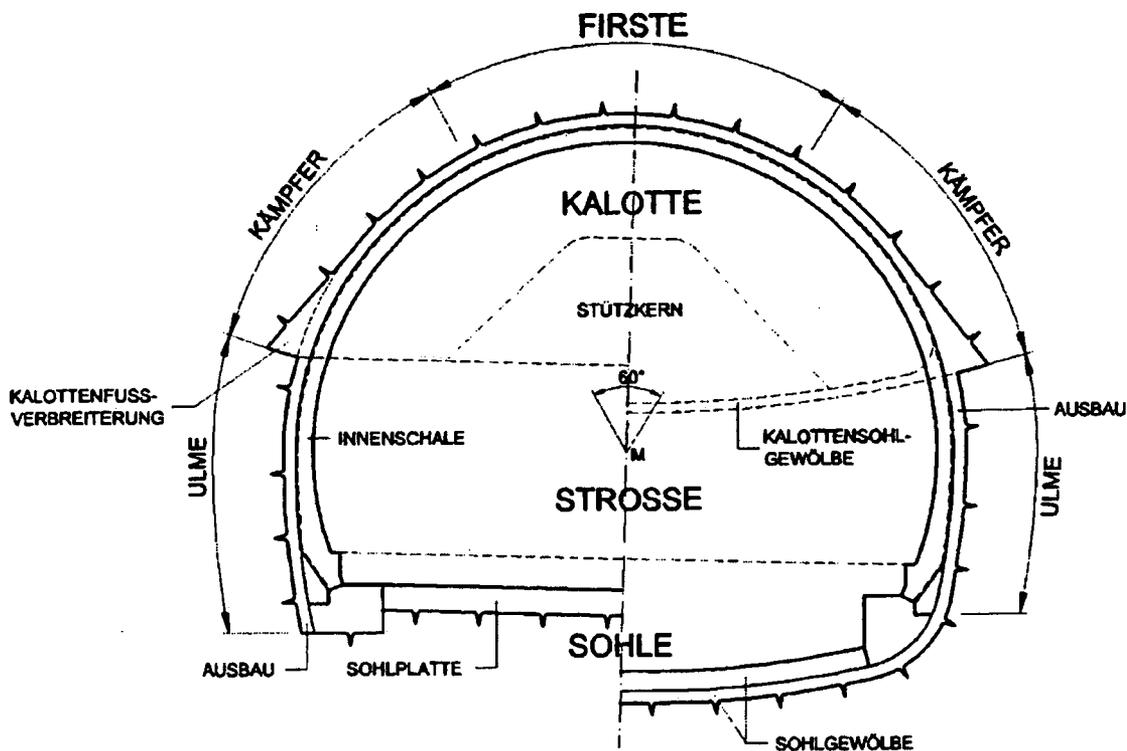


Abbildung 33: Tunnelbautechnische Begriffe – Querschnitt [139]

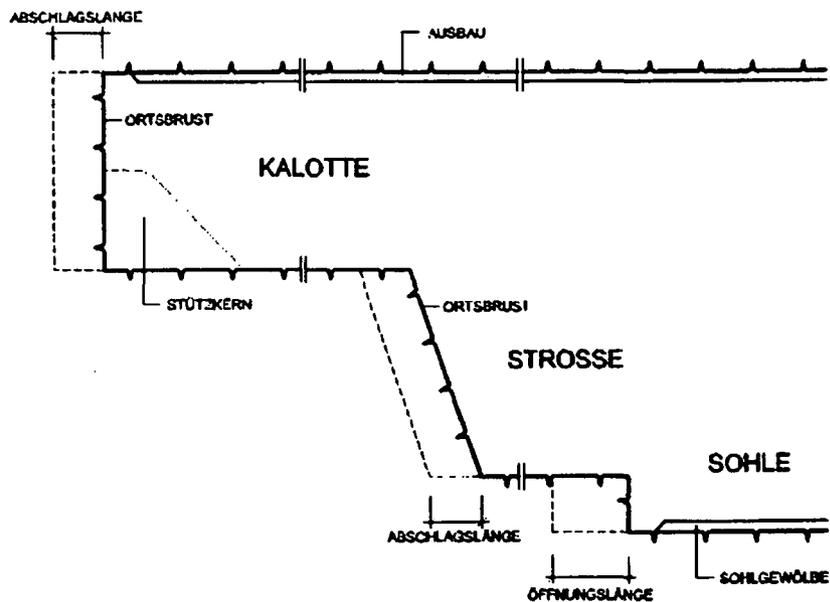


Abbildung 34: Tunnelbautechnische Begriffe – Längenschnitt [139]

Für die Ermittlung der erforderlichen Spritzbetonkubaturen und eine anschließende wirtschaftliche Untersuchung der einzelnen Verfahren sind folgende – in der Ausschreibung für jeden Vortriebsort (darunter werden entweder ein Ausbruch im Vollquerschnitt oder getrennte Vortriebe in Kalotte, Strosse und Sohle verstanden) und jede Vortriebsklasse festgelegte - „geometrische“ Parameter von Bedeutung:

- Die prognostizierten **Vortriebslängen** (l_i) der einzelnen Vortriebsklassen (abgekürzt: VTKL).
- Die pro VTKL plangemäß als Stützmaßnahme festgelegte **Dicke des Spritzbetons entlang der Hohlraumleibung** ($d_{s,i}$).
- Der in den Ausschreibungsunterlagen für jede VTKL durch das **Überprofil** ($\ddot{u}_{p,i}$) festgelegte Mehrausbruch hohlraumseitig der Grenzfläche A (bzw. der Abrechnungslinie $A_{AL,i}$ - vgl. Abbildung 36 und Abbildung 37).
- Die **Länge der Abrechnungslinie** ($A_{AL,i}$) je VTKL als maßgebenden Parameter für die Ermittlung der erforderlichen Spritzbetonkubaturen entlang der Hohlraumleibung des jeweiligen Vortriebsortes. Für die Berechnung der theoretisch erforderlichen Spritzbetonkubatur ist die Abrechnungslinie vor der Verformung heranzuziehen. Nach [139] entspricht für eine VTKL die Abrechnungslinie $A_{AL,i}$ der „Grenzfläche A“ (vgl. Abbildung 36) und berücksichtigt somit die in der Ausschreibung festgelegten Werte für das Übermaß (s. IV.2.4.3) und das Überprofil (s. IV.2.4.1).
- Der **Ausbruchsregelquerschnitt** ($A_{RQ,i}$) je VTKL als maßgebende Größe für die Ermittlung der erforderlichen Spritzbetonkubaturen für die Ortsbrustsicherungen. Der

Ausbruchsregelquerschnitt $A_{RQ,i}$ wird dabei durch die Grenzfläche A bzw. die Abrechnungslinie $A_{AL,i}$ begrenzt.

- Die pro VTKL plangemäß festgelegte **Dicke des Spritzbetons für erforderliche Ortsbrustsicherungen** ($d_{SO,i}$).
- Die **Anzahl der erforderlichen Ortsbrustsicherungen** ($n_{o,i}$) in den einzelnen VTKL.

Mit den o.a. geometrischen Eingangsparametern lässt sich zunächst für einen Vortriebsort der **theoretische Spritzbetonbedarf in Festkubikmeter** (SpB_{Th1}) ermitteln (s. Formel 1). Die Summe über sämtliche Vortriebsorte (z.B. Kalotte, Strosse und Sohle) ergibt dann in weiterer Folge den theoretischen Spritzbetonbedarf für ein gesamtes Tunnelbauprojekt. Allerdings handelt es sich bei dem errechneten Spritzbetonbedarf SpB_{Th1} um einen theoretischen Zahlenwert, nachdem weder der geologisch bedingte Mehrausbruch noch der vom gewählten Spritzbetonverfahren abhängige Rückprallfaktor mathematisch (s. Formel 1) erfasst werden.

$$SpB_{Th1} [m^3\text{-fest}] = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n l_i [m] * A_{AL,i} [m] * (d_{S,i} [m] + \ddot{u}_{p,i} [m]) + \sum_{i=1}^n A_{RQ,i} [m^2] * d_{SO,i} [m] * n_{o,i} \right)$$

mit: $j = 1, 2, \dots, m$ [Anzahl der Vortriebsorte] und $i = 1, 2, \dots, n$ [Anzahl der Vortriebsklassen]

Formel 1: Theoretisch erforderlicher Spritzbetonbedarf SpB_{Th1} in Festkubikmeter (ohne Berücksichtigung des geologisch bedingten Mehrausbruchs und Rückprallfaktor)

Für die Ermittlung des tatsächlichen Spritzbetonbedarfs – der unter anderem ein wesentliches Kriterium für die Entscheidung für eine baustelleneigene Betonmischanlage oder eine Fremdversorgung der Baustelle mit Beton darstellt - sind zusätzlich zu den o.a. plangemäß festgelegten geometrischen Randbedingungen der Spritzbetonsicherung folgende Parameter zu berücksichtigen:

- Der geologisch bedingte Mehrausbruch, der aus den angetroffenen Gebirgs- bzw. Bodenverhältnissen resultiert (vgl. 0 und s. Formel 2) und
- als wesentlicher, baubetrieblicher und *verfahrensabhängiger* Einflussparameter muss zusätzlich der Rückprall berücksichtigt werden (vgl. IV.3.11).

Bei der Entscheidungsfindung für eine baustelleneigene Betonmischanlage oder eine Fremdversorgung der Baustelle mit Beton ist bei einer zweischaligen Konstruktion (s. IV.2.3) neben dem Spritzbetonbedarf zur Sicherung des Hohlraumrandes auch der Betonbedarf für eine Ortbetoninnenschale zu berücksichtigen. Die erforderliche Gesamtbetonkubatur ergibt sich für ein konkretes Tunnelbauprojekt dann als Summe des tatsächlichen Spritzbetonbedarfs und dem Betonbedarf für die Ortbetoninnenschale und fließt bei der Untersuchung der Wirtschaftlichkeit einer eigenen Baustellenmischanlage als wesentlicher Einflussparameter in die Berechnung ein.

IV.2.3 Konstruktionsvarianten für den Schalenaufbau

Für Tunnelbauvorhaben können sowohl zweischalige, als auch einschalige Konstruktionen zur Anwendung kommen.

IV.2.3.1 Zweischalige Konstruktionen

Der Schalenaufbau eines Tunnels beruht bei zweischaligen Konstruktionen auf einer konstruktiven Aufgabentrennung zwischen der Außenschale (dient der vorübergehenden Sicherung des Hohlraumes - z.B. Spritzbetonschale) und der Innenschale (dient der endgültigen Sicherung - z.B. Ortbetoninnenschale). Bei dieser zweischaligen Konstruktion kommt das Stützmittel „Spritzbeton“ in der Außenschale vortriebsbegleitend zum Einsatz und sichert somit im Verbund mit der Eigentragsfähigkeit des Gebirges den Hohlraum und die Vortriebsmannschaft im unmittelbaren Vortriebsbereich.

Die Außenschale wird nach diesem statischen Konzept einer zweischaligen Konstruktion als verrottende Sicherung von nur kurzer Nutzungsdauer angesehen. Nach dem Aufbringen einer Abdichtungsfolie entlang der Hohlraumlaibung (Trennschicht von Außen- und Innenschale aus Kunststoffbahnen mit entsprechenden Schutzlagen – es werden dabei auch erhöhte Anforderungen an die Ebenföächigkeit der Spritzbetonschale gestellt) erfolgt zur endgültigen Hohlraumsicherung der Einbau der Innenschale (z.B. Ortbetoninnenschale).

Nach diesem Konstruktionsprinzip soll die Innenschale die entsprechenden Anforderungen an die Dauerhaftigkeit, die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit über den gesamten Nutzungszeitraum eines Tunnels sichergestellt werden. In der Abbildung 35 werden beispielhaft ein- bzw. zweischalige Konstruktionen einander gegenübergestellt.

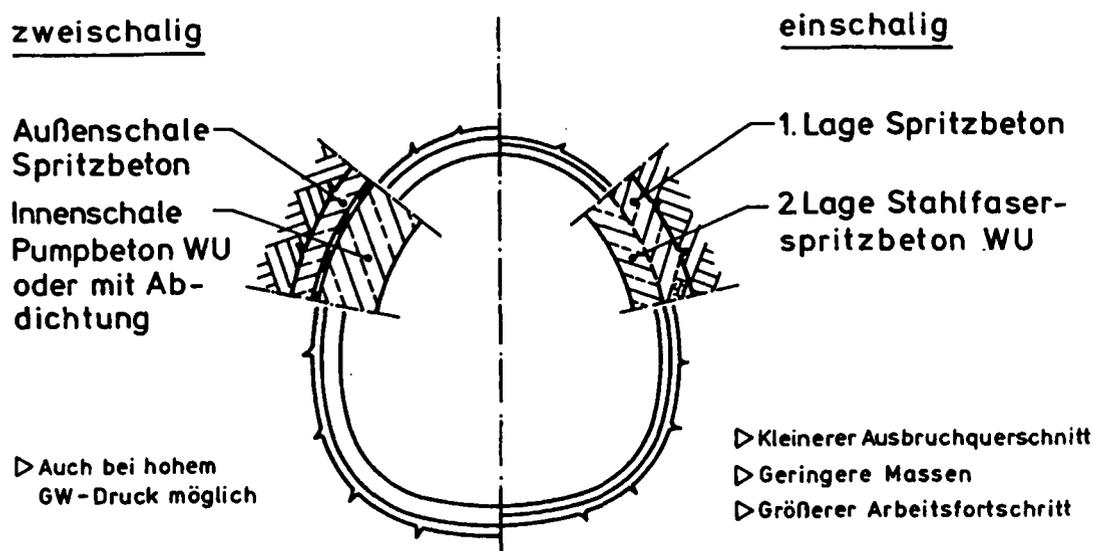


Abbildung 35: Vergleich der ein- und zweischaligen Konstruktion [128]

Die zweischalige Bauweise weist aus wirtschaftlichen sowie technischen Überlegungen gegenüber der einschaligen Bauweise folgende Vorteile auf:

- Die Anforderungen an den Spritzbeton der Außenschale sind niedriger als jene bei der einschaligen Bauweise (s. Pkt. IV.2.1 bzw. IV.2.3.2), nachdem die statischen und konstruktiven Aufgaben über die Nutzungsdauer des Tunnels von der Innenschale übernommen werden.
- Bei hohen Biegebeanspruchungen der Tunnelschale, bei statisch ungünstigen Einwirkungen (asymmetrische Belastungen) und bei entsprechend schlechten geologischen Verhältnissen ist die zweischalige Konstruktion anzuwenden.

IV.2.3.2 Einschalige Konstruktion

Die Möglichkeit Spritzbeton von hoher Qualität herzustellen hat wesentlich dazu beigetragen, die Innenschale aus Ortbeton (s. Pkt. IV.2.3.1) durch Spritzbeton zu ersetzen. Durch die Verwendung des Spritzbetons nicht nur als temporäres Sicherungsmittel sondern auch als Endausbau bei der einschaligen Bauweise werden allerdings erhöhte Anforderungen an die Dauerhaftigkeit gestellt.

Unter Dauerhaftigkeit [57] wird dabei der Widerstand eines Baustoffes in eingebauten Zustand gegen die vielfältigen chemischen und physikalischen Angriffe aus Umwelt und Nutzung verstanden. Im Wesentlichen können für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Spritzbetons folgende Kennwerte angeführt werden:

- Porosität,
- Dichtigkeit (Wasser- und Gasdichtigkeit),
- Druckfestigkeit,
- E-Modul (bzw. die Erhaltung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften),
- Widerstand gegen aggressive Flüssigkeiten und Gase,
- Auslaugverhalten und
- Karbonatisierung.

Bei der **einschaligen Konstruktion** werden somit alle statischen und konstruktiven Anforderungen von einem Schalenteil erfüllt. Dabei kann die Schale in einem oder in mehreren Arbeitsgängen hergestellt werden. Die Konstruktion muss dabei sowohl auf die Erfordernisse der Hohlraumsicherung im Zuge des Tunnelvortriebes, als auch auf die Erfordernisse der vorgesehenen Nutzung bzw. des Endzustandes abgestimmt werden. [106]

Durch die alleinige Verwendung von Spritzbeton können Einsparungen gegenüber der zweischaligen Konstruktion erzielt werden, weil die Gesamtdicke der Schale flexibel an die

statischen Erfordernisse angepasst und damit – unter günstigen geologischen Voraussetzungen – gegenüber der mehrschaligen Konstruktion reduziert werden kann. Dadurch sind in weiterer Folge auch kleinere Ausbruchsquerschnitte und geringere Ausbruchskubaturen zu erwarten. Vorteile sind auch bei der Ausgestaltung von Nischen bzw. Querschlängen und bei Aufweitungsbereichen zu erwarten, weil für diese „Sondervortriebsbereiche“ umfangreiche Adaptionen des Schalwagens für die Herstellung der Ortbetoninnenschale bei zweischaligen Konstruktionen entfallen.

Bei einer einschaligen Konstruktion sind folgende Punkte zu beachten:

- Die Ausführung der Tunnelschale kann bereits im Zuge des Vortriebes mit der für die Erfordernisse des Vortriebes und des Endzustandes erforderlichen Dicke und Bewehrung in einem Arbeitsgang erfolgen.
- Im Zuge des Vortriebes kann aber zunächst auch nur die äußere Spritzbetonschicht als Vortriebssicherung aufgetragen werden. Eine oder mehrere Spritzbetonschichten werden dann in weiteren Arbeitsvorgängen nachträglich aufgebracht, um die für den Endzustand statisch und konstruktiv erforderliche Dicke zu erreichen. Dabei ist der Schubverbund zwischen den Spritzbetonschichten durch entsprechende Maßnahmen sicherzustellen (z.B. vor dem Aufbringen einer weiteren Spritzbetonschicht ist die bereits bestehende Spritzbetonoberfläche mit einem Hochdruckwasserstrahl zu reinigen).
- Eine möglichst geringe Biegebeanspruchung der Tunnelschale ist Voraussetzung für die Anwendung dieser Bauweise, um Risse zu minimieren und eine geringe, gleichmäßige Bewehrung zu ermöglichen.
- Als Mindestfestigkeit ist die Festigkeitsklasse SpB C25/30 erforderlich (s. IV.2.1.3).
- Bei einer (eventuellen) nachträglichen Verstärkung der Spritzbetonschale durch eine weitere Spritzbetonschicht oder durch geschalteten Ortbeton muss ein kraftschlüssiger Verbund der Schichten gewährleistet sein.
- Wasserdurchtrittsstellen aufgrund von Rissen, Arbeitsfugen und Fehlstellen können nicht ausgeschlossen werden (d.h. Anwendung bei keinem oder geringem Wasserandrang).
- Möglichkeiten für Maßnahmen der Wasserableitung und zur allfälligen nachträglichen Abdichtung sind zu überlegen.
- Die Anwendung der einschaligen Bauweise erfordert gute ausgebildete Vortriebsmannschaften und eine entsprechende Bau- und Qualitätsüberwachung.

IV.2.4 Geologie

Die Tunnelgeometrie richtet sich vor allem nach dem Verwendungszweck eines Tunnels (Straßen-, Eisenbahntunnel, Druckstollen, Kanal) und dem daraus resultierenden, erforderlichen Lichtraumprofil. Neben dem Verwendungszweck werden die Abmessungen und die Trassenwahl aber wesentlich von den geologischen und geotechnischen Randbedingungen beeinflusst.

Nach Müller [60] bestehen folgende geologische Einflüsse auf die Hohlraumgeometrie:

- Durch das Gebirgsgefüge entstehen unvermeidlich Formabweichungen vom plangemäßen Ausbruch. So können z.B. Klufkörper, die von der Ausbruchbegrenzung angeschnitten werden, aus dem Gebirgsverband herausfallen und gezackte Umriss- bzw. Ausbruchslinien ergeben (s. Abbildung 36 – geologisch bedingter Mehrausbruch).
- Geplante Querschnittsformen können durch das Gefüge begünstigt werden, so eignen sich z.B. bankige Gebirgsfazies zur Herstellung eckiger Querschnittsformen, während der Ausbruch runder Querschnitte in dieser geologischen Formation praktisch nicht möglich ist.
- Die Gebirgsart wirkt sich daher mittelbar auf die Hohlraumform aus, da sie die Statik und die Konstruktion des Tunnelbauwerkes bestimmt.

Dabei wird unter **Gebirgsart** [105] ein geotechnisch relevantes Gesteinsvolumen inklusive seiner Trennflächen und tektonischen Struktur (Gebirge) verstanden, welches in Bezug auf die nachfolgende Eigenschaften gleichartig ist:

- ✚ *im Festgestein*: Festigkeitskennwerte (Gestein und Gebirge), Trennflächeneigenschaften, Gestein, Korngefüge, Gesteins- und Gebirgszustand, Trennflächentypen
- ✚ *im Lockergestein*: Parameter des Korngemisches, der Bodenkomponenten, der Matrix und des Bodenwasser

Durch die Kombination der einzelnen Gebirgsarten mit den örtlichen Bergwasserverhältnissen, der räumlichen Orientierung der Trennflächen sowie der örtlichen Spannungssituation und eventuellen anderen Faktoren, welche das Gebirgsverhalten beeinflussen, werden projektspezifische Gebirgsverhaltenstypen bestimmt.

Ein **Gebirgsverhaltenstyp** [105] bezeichnet dabei ein Gebirge mit gleichartigem Verhalten in Bezug auf Ausbruch, auf zeitliche und räumliche Verformung und auf Versagensform,

ohne Berücksichtigung von Stütz- und Zusatzmaßnahmen und Querschnittunterteilungen. Im Wesentlichen werden folgende Parameter berücksichtigt:

- Gebirgsart
- Primärspannungszustand
- Form, Größe und Lage des Hohlraumes, Lösemethode
- Orientierung des Bauwerkes zum Trennflächengefüge
- Bergwasser, Strömungsdruck, hydrostatischer Druck

Entsprechend den Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau ([107] / Kap. 9.32; Punkt 3.6.1.2) ist in einem Tunnel bzw. Stollen die Dicke der Spritzbetonschale von mehreren Parametern (Geologie, Überlagerung, Grundwasserverhältnisse, Ausbruchfläche usw.) abhängig und nach statischen Erfordernissen festzulegen. Neben der plangemäß festgelegten und statisch erforderlichen Dicke der Spritzbetonschale entlang der Hohlraumleibung (d_s) sind für die Ermittlung der tatsächlichen Dicke der Spritzbetonschale (d) jene verfahrensunabhängigen Einflussparameter zu berücksichtigen, die aus der Geologie resultieren und zu den nachfolgenden Mehrausbrüchen (s. Pkt. IV.2.4.1 bis IV.2.4.3) führen.

IV.2.4.1 Überprofil

Das **Überprofil** (\ddot{u}_p) ist der Mehrausbruch hohlraumseitig der Grenzfläche A (s. Abbildung 36). Der Ausschreibende legt das Überprofil $\ddot{u}_{p,i}$ für jeden Vortriebsort und jede Vortriebsklasse fest und definiert damit eine Grenzfläche A für Kalotte und Strosse, innerhalb der keine gesonderte Vergütung für den Mehrausbruch erfolgt.

Das Überprofil $\ddot{u}_{p,i}$ ist vom Unternehmer im Ausbruchspreis zu berücksichtigen und hat damit einen direkten Einfluss auf die theoretische Spritzbetondicke. Als Zahlenwert geht das Überprofil direkt in Ermittlung der theoretisch erforderlichen Spritzbetonkubatur ein (s. Formel 1 und Abbildung 36).

Die theoretische Dicke der Spritzbetonschicht je Vortriebsklasse ergibt sich – analog zur Abbildung 36 und ohne Berücksichtigung des geologisch bedingten Mehrausbruches – als Normalabstand der Linien 1a und der Grenzfläche A (entspricht dem Ausbruchsrund und wird in weiterer Folge als Abrechnungslinie $A_{AL,i}$ bezeichnet) mit:

$$d_i = d_{s,i} + \ddot{u}_{p,i}$$

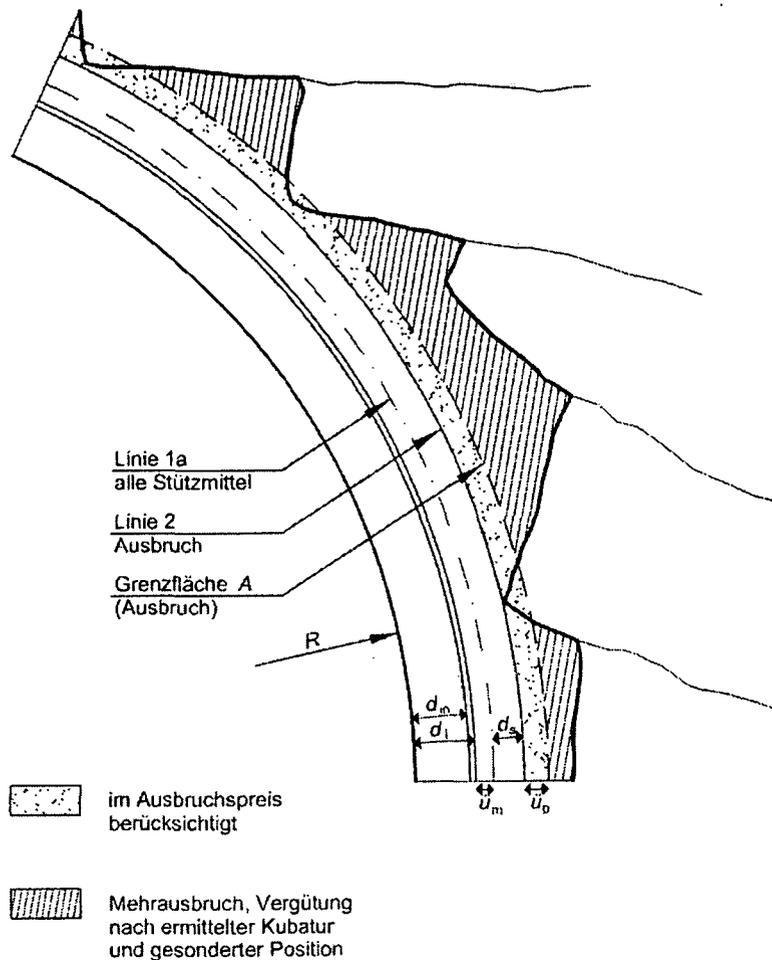


Abbildung 36: Abrechnungslinien, Ausbruch und Stützmittel – Darstellung vor der Verformung [139]

R ...	Radien des lichten Querschnitts	\ddot{u}_p ...	im Zuge der Ausschreibung vom AG angegeben
d_i ...	plangemäße Dicke der Innenschale einschließlich Abdichtungsuntergrund und Abdichtung	\ddot{u}_m ...	im Zuge der Ausbruchsarbeiten vom AG festgelegtes Übermaß
d_{in} ...	plangemäße Dicke der Innenschale		
d_s ...	festgelegte Dicke des Spritzbetons als Stützmaßnahme		

IV.2.4.2 Geologisch bedingter Mehrausbruch

Der **geologisch bedingte Mehrausbruch** (\ddot{u}_g) bergseitig der Grenzfläche A wird – im Gegensatz zum Überprofil $\ddot{u}_{p,i}$ – nicht im Ausbruchpreis berücksichtigt, sondern muss entsprechend der ÖNORM B 2203-1 ([139] / s. Pkt. 4.3.5.3) nach ermittelter Kubatur mit einer gesonderten Position vergütet werden.

Für die Ermittlung der tatsächlich erforderlichen Spritzbetonkubatur ist eine Abschätzung der Größenordnung des geologisch bedingten Mehrausbruchs unbedingt erforderlich. Durch einen erfahrenen Geologen sollte dabei für jede Vortriebsklasse ein Faktor $\ddot{u}_{g,i}$ ($\geq 1,0$) festgelegt werden, der den geologisch bedingten Mehrausbruch bei der Ermittlung der erforderlichen Spritzbetonkubatur berücksichtigt.

Mit diesen Faktoren $\ddot{u}_{g,i}$ je Vortriebsklasse errechnet sich (in Analogie zur Formel 1) der theoretisch erforderliche Spritzbetonbedarf SpB_{Th2} je Vortriebsort wie folgt:

$$SpB_{Th2} [m^3\text{-fest}] = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n l_i [m] * A_{AL,i} [m] * (d_{S,i} [m] + \ddot{u}_{p,i} [m]) * \ddot{u}_{g,i} + \sum_{i=1}^n A_{RQ,i} [m^2] * d_{SO,i} [m] * n_{O,i} * \ddot{u}_{g,i} \right)$$

mit: $j = 1, 2, \dots, m$ [Anzahl der Vortriebsorte] und $i = 1, 2, \dots, n$ [Anzahl der Vortriebsklassen]

Formel 2: Theoretisch erforderlicher Spritzbetonbedarf SpB_{Th2} in Festkubikmeter (ohne Berücksichtigung des Rückprallfaktors)

Der theoretisch erforderliche Spritzbetonbedarf SpB_{Th2} in Festkubikmeter (s. Formel 2) ist ein verfahrensunabhängiger Wert und berücksichtigt daher nicht den verfahrensabhängigen Rückprallfaktor, der ein wesentliches baubetriebliches Beurteilungskriterium darstellt und für die einzelnen Spritzbetonsysteme im Kapitel IV.3.11 detailliert behandelt wird.

IV.2.4.3 Übermaß

Unter dem **Übermaß** (\ddot{u}_m) wird jener Teil des plangemäßen Ausbruchsprofils verstanden, der den Zweck hat, die zu erwartenden Gebirgsverformungen aufzunehmen. Gemäß ÖNORM B 2203-1 [139] sind vom Ausschreibenden folgende Angaben zu machen:

- das Übermaß für die einzelnen Vortriebsklassen ist festzulegen und
- die Ausmaße für Ausbruch und Stützmittel sind zu definieren (Linie 1a, 1b und 2 - vgl. Abbildung 36 und Abbildung 37).

Die für jede Vortriebsklasse festgelegte Abrechnungslinie $A_{AL,i}$ bezieht sich auf den Gebirgszustand vor der Verformung. Sie stellt somit einerseits einen wesentlichen Eingangsparameter für die Ermittlung der Spritzbetonkubatur entlang der Hohraumleitung dar und definiert andererseits auch den Ausbruchsregelquerschnitt $A_{RQ,i}$ und damit die Auftragsfläche für eine eventuell erforderliche Ortsbrustsicherung.

Das Übermaß wird bereits durch die Festlegung der Länge der Abrechnungslinie $A_{AL,i}$ berücksichtigt und hat keinen direkten Einfluss auf die theoretische Spritzbetondicke. Als Zahlenwert geht das Übermaß daher nicht in die Ermittlung der erforderlichen Spritzbetonkubaturen ein (s. Formel 2 und Abbildung 36).

Für die Analyse der Wirtschaftlichkeit einer eigenen Baustellenbetonmischanlage sind das Übermaß bzw. die Abrechnungslinien im Zustand nach der Verformung (s. Abbildung 37) für die Ermittlung der Betonkubatur für eine Ortbetoninnenschale bei zweischaligen Konstruktionen (s. Pkt. IV.2.3) zu berücksichtigen.

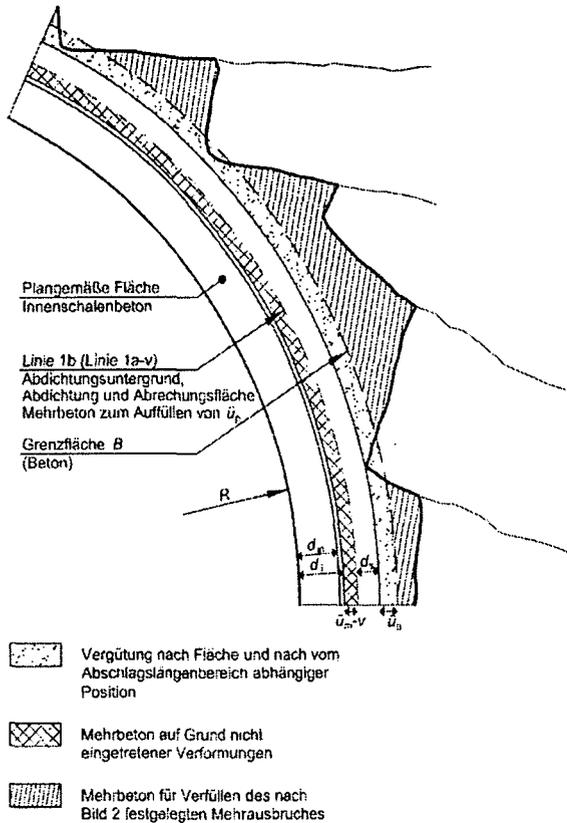


Abbildung 37: Abrechnungslinien; Beton und Mehrbeton – Darstellung nach der Verformung [139]

R ...	Radien des lichten Querschnittes	ü _p ...	im Zuge der Ausschreibung vom AG angegeben
d _i ...	plangemäße Dicke der Innenschale einschließlich Abdichtungsuntergrund und Abdichtung	ü _m ...	im Zuge der Ausbruchsarbeiten vom AG festgelegtes Übermaß
d _m ...	plangemäße Dicke der Innenschale	v ...	eingetretene Gebirgsverformung
d _s ...	festgelegte Dicke des Spritzbetons als Stützmaßnahme		

Die erforderliche Betonkubatur für ein Tunnelbauvorhaben mit einer zweischaligen Konstruktion (Spritzbetonsicherung der Hohlräumlaibung + Ortbetoninnenschale) errechnet sich – auf der Grundlage des theoretisch erforderlichen Spritzbetonbedarfs Sp_{B_{Th2}} gemäß Formel 2 und den o.a. begrifflichen Festlegungen der Abbildung 37 – mit:

$$Sp_{B_{Th2}} [m^3\text{-fest}] + OBI [m^3\text{-fest}] = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n l_i [m] \cdot A_{AL,i} [m] \cdot (d_{S,i} [m] + \dot{u}_{p,i} [m]) \cdot \dot{u}_{g,i} + \sum_{i=1}^n A_{RQ,i} [m^2] \cdot d_{SO,i} [m] \cdot n_{O,i} \cdot \dot{u}_{g,i} \right) + \sum_{i=1}^n A_{BL,i} [m] \cdot (d_{in,i} [m] + \dot{u}_{m,i} [m] - v_i [m])$$

mit: j = 1, 2, ..., m [Anzahl der Vortriebsorte] und i = 1, 2, ..., n [Anzahl der Vortriebsklassen]
 OBI ... Ortbetoninnenschale
 A_{BL,i} ... Abrechnungslinie Beton je VTKL (Linie 1b gemäß Abbildung 37)
 d_{in,i} ... Plangemäße Dicke der Innenschale je VTKL

Formel 3: Theoretisch erforderliche Gesamtbetonkubatur in Festkubikmeter (Spritzbetonbedarf Sp_{B_{Th2}} und Ortbetoninnenschale)

Bei einschaligen Konstruktionen – d.h. bei Tunnelbauvorhaben wird keine Ortbetoninnenschale, sondern lediglich eine Spritzbetonsicherung eingebaut - wird der letzte Term in der Formel 3 gleich Null gesetzt. Die theoretisch erforderliche Gesamtbetonkubatur bei einer einschaligen Konstruktion entspricht damit dem theoretisch erforderlichen Spritzbetonbedarf SpB_{Th2} gemäß Formel 2.

Schlussfolgerung:

Für eine grundsätzliche Beurteilung der wirtschaftlichen Versorgung der Baustelle mit Spritzbeton bzw. Ortbeton aus einer baustelleneigenen oder externen Mischanlage kann die errechnete Gesamtbetonkubatur bereits eine grobe Entscheidungsgrundlage darstellen. So wird beispielsweise bei geringen Vortriebslängen der Einsatz einer baustelleneigenen Mischanlage in der Regel nicht wirtschaftlich sein, mit Hilfe des Entscheidungshilfesystems zur Auswahl eines Spritzbetonverfahrens sollte aber jedenfalls eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt werden.

IV.2.5 Bergwasser

Bergwässer sind alle aus dem Gebirge einschließlich dem Sohlbereich örtlich oder flächenhaft auftretende Wässer. Das Wasser steht dabei entweder als Grundwasser, Schichtenwasser, Hangwasser oder Kluftwasser an [66]. Unabhängig vom gewählten Spritzbetonsystem führen Bergwasserzutritte zu Erschwernissen beim Spritzbetonauftrag und müssen gemäß ÖNORM B 2203-1 [139] auch über zusätzliche Vortriebszeiten (Verrechnungseinheiten) abgegolten werden. Dazu müssen neben den Positionen für zeitgebundene Kosten der Baustelle auch Positionen für die Lohnkosten der Vortriebsmannschaften je Zeiteinheit (einschließlich sonstiger zeitabhängiger Kosten, die nicht in den zeitgebundenen Kosten der Baustelle enthalten sind) vorhanden sein.

Zunächst eine allgemeine Definition des Begriffs „Erschwernis“ [86]: Ein Erschwernis liegt dann vor, wenn der vorgesehene Aufwandswert oder Leistungswert infolge von Leistungsänderungen nicht eingehalten werden kann. Dabei sind folgende Ursachen denkbar:

- *Die Leistung ist anders als vertraglich bedungen zu erbringen (z.B. zusätzliche Aussparungen bei Schalungsarbeiten).* Diese Ursache trifft für die Spritzbetonsicherung bei Bergwasserzutritten allerdings nicht zu, nachdem Spritzbeton ein – bereits in der Ausschreibung hinsichtlich Einbauort (Ortsbrust oder Hohlraumleibung) und Einbaudicke festgelegtes - Stützmittel darstellt und auch bei Bergwasserzutritten nicht anders als vertraglich bedungen einzubauen ist.

- Die Umstände der Leistungserbringung ändern sich (z.B. infolge räumlicher Beengtheit müssen Ziegel über eine weitere Strecke händisch transportiert werden). Diese Ursache trifft zu, wenn sich durch den Bergwasserzutritt die Umstände der Leistungserbringung beim Spritzbetonauftrag insofern ändern, als:
 - ✚ erhöhte Anforderungen an die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons gestellt werden müssen (s. IV.5),
 - ✚ sich der Rückprall in Abhängigkeit von der zutretenden Bergwassermenge erhöht (vgl. IV.3.11 und [66]) und
 - ✚ sich der Lohnaufwand durch zusätzliche erforderliche Vortriebsarbeiten (z.B. Einbau von Abschlauchungen) und human bedingte Arbeitspausen bzw. Behinderungszeiten erhöht (vgl. [66]).

In der Diplomarbeit von A. Lang „Einfluss des Bergwassers auf den Baubetrieb im Tunnelbau“ [66] errechnet sich der Rückprall und der Lohnaufwand beim Spritzbetonauftrag in Abhängigkeit von der Größenordnung der Bergwasserzutritte - aber unabhängig vom aufgefahrenen Gebirgstyp und vom gewählten Spritzbetonsystem - gegenüber dem „Idealzustand“ absolut trockener Vortriebsverhältnisse (d.h. Bergwasserzutritten von 0 l/s) wie folgt:

- $\text{Rückprall}_{\text{Bergwasser}} = \text{Rückprall}_{\text{Trocken}} * f_{\text{BW,R}} \quad [\%]$
- $\text{Lohnaufwand}_{\text{Bergwasser}} = \text{Lohnaufwand}_{\text{Trocken}} * f_{\text{BW,L}} \quad [\text{Mann-Minuten pro Tunnelmeter}]$

Die Faktoren $f_{\text{BW,R}}$ und $f_{\text{BW,L}}$ lassen sich damit in tabellarischer Form wie folgt übersichtlich darstellen (s. Tabelle 9):

Faktor Bergwasser f_{BW}	Bergwasserzutritt in [l/s]					
	0	0 bis 5	5 bis 15	15 bis 30	30 bis 60	über 60
Rückprall ($f_{\text{BW,R}}$)	1,00	1,00 - 1,17	1,17 - 1,33	1,33 - 1,67	1,67 - 2,33	2,33 - 3,33
Lohnaufwand ($f_{\text{BW,L}}$)	1,00	1,00	1,03	1,06	1,12	1,20

Tabelle 9: Verfahrensunabhängiger Einfluss des Bergwasserzutrittes auf Rückprall und Lohnaufwand bei der Spritzbetonsicherung

Der verfahrensunabhängige Einfluss des Bergwasserzutrittes auf den Rückprall und den Lohnaufwand bei der Spritzbetonsicherung soll – unter Verwendung der Tabelle 9 - kurz anhand eines theoretischen Beispiels erläutert werden:

Bei einem Kalottenvortrieb (Ausbruchsregelquerschnitt $A_{\text{RQ}} = 45 \text{ m}^2$) wird zur Spritzbetonsicherung von Ortsbrust und Hohlraumleibung das Nassspritzverfahren angewendet. Für das gewählte Spritzbetonverfahren liegt der Rückprallfaktor bei trockenen Vortriebsverhältnissen bei rund 10 % und der durchschnittliche Lohnaufwand über alle

aufgefahrenen Vortriebsklassen bei ca. 75 MaMin /lfm (entspricht 75 Mann-Minuten pro Tunnelmeter).

Nach Tabelle 9 ergeben sich damit - unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wasserzutritte - folgende Werte für Rückprall und Lohnaufwand bei der Spritzbetonsicherung:

	Bergwasserzutritt in [l/s]					
	0	0 bis 5	5 bis 15	15 bis 30	30 bis 60	über 60
Rückprall [%]	10,0 (=10*1,00)	11,7 (=10*1,17)	13,3 (=10*1,33)	16,7 (=10*1,67)	23,3 (=10*2,33)	33,3 (=10*3,33)
Lohnaufwand [MaMin/lfm]	75 (=75*1,00)	75 (=75*1,00)	77,25 (=75*1,03)	79,5 (=75*1,06)	84 (=75*1,12)	90 (=75*1,20)

Tabelle 10: Beispielhafte Durchrechnung des verfahrensunabhängigen Einflusses des Bergwasserzutrittes auf Rückprall und Lohnaufwand bei der Spritzbetonsicherung

Das theoretische Beispiel zeigt, dass in Abhängigkeit der Bergwasserzutritte für das gewählte Spritzbetonsystem die Rückprallwerte zwischen 10,0 % (bei einem Bergwasserzutritt von 0 l/s) und 33,3 % (bei einem Bergwasserzutritt von über 60 l/s) liegen und sich der Lohnaufwand für die Spritzbetonsicherung in einer Bandbreite von 75 bis 90 MaMin / lfm bewegt. (Anmerkung: Die angegebenen Bandbreiten für den Rückprall und den Lohnaufwand basieren auf einer theoretischen Annahme und dienen ausschließlich Demonstrationszwecken und haben keine Allgemeingültigkeit!)

Schlussfolgerung:

Der Bergwasserzutritt beeinflusst damit direkt die Rückprallwerte bzw. den Lohnaufwand bei der Spritzbetonsicherung und muss daher als verfahrens-unabhängiger Einflussparameter sowohl bei der Verfahrenswahl, als auch in der Musterkalkulation berücksichtigt werden.

IV.2.6 Projektstandort

Die Verkehrserschließung des Baustellengeländes hat entscheidenden Einfluss auf die Durchführung eines Tunnelbauvorhabens. Der Projektstandort wirkt sich insbesondere bei den Spritzbetonarbeiten auf folgende Transportaufgaben zur, innerhalb und von der Baustelle aus:

- Antransport der Baustelleneinrichtung (z.B. Silos für Bindemittel und Gesteinskörnung, Aufbereitungs- bzw. Betonmischanlage).
- Antransport von Baumaterial, Hilfsmaterial und Baugerät (z.B. „TM-Mobile“, Rotorspritzmaschine, Spritzbetonmanipulator). Nach [86] versteht man unter Baumaterialien jene Materialien, die, im Gegensatz zu Hilfsmaterialien, bleibende

Bestandteile eines Bauwerkes werden (z.B. Fertigbeton, ofentrockenes Mischgut, erdfeuchter Gesteinskörnung und Bindemittel). Hilfsmaterialien sind nicht bleibende Bestandteile eines Bauwerkes, allerdings für die Durchführung einer Bauleistung erforderlich (z.B. Bohr Stahl und Sprengmittel).

- Abtransport von Ausbruchs- bzw. Rückprallmaterial von der Ortsbrust zur Zwischendeponie bzw. von der Zwischendeponie zur Enddeponie (Endlagerung).
- Transport von Baumaterial und Hilfsmaterial vom Lagerplatz bzw. Silo zum Einbauort an der Ortsbrust.
- Abtransport von Hilfsmaterial, Baugerät und Elementen der Baustelleneinrichtung nach Fertigstellung der Tunnelbaustelle.

Voraussetzung für eine wirtschaftliche Abwicklung der Transportaufgaben ist eine zweckmäßige Erschließung des Baustellengeländes. Für die Verkehrserschließung kommen dabei folgende Verkehrsmittel in Betracht:

- Strasse,
- Schiene und
- Wasserweg.

In der Regel wird die Strasse bei Tunnelbauprojekten den üblichen Verkehrsweg darstellen, die Versorgung der Baustelle über Schiene bzw. Wasserweg stellt einen Ausnahmefall dar. Die Effizienz der Transportaufgaben auf, innerhalb und von der Baustelle wird durch den Anschluss an das öffentliche Straßennetz wesentlich beeinflusst. Dabei sind auch verkehrstechnische Bestimmungen über höchstzulässige Nutzlasten, Nachtfahrverbot (Gewährleistung der Versorgungssicherheit einer Baustelle mit Nassspritzbeton) oder Wochenendfahrverbot (Einfluss auf die erforderliche Lagerhaltung von z.B. ofentrockenem Mischgut) bzw. die Verkehrsdichte im betroffenen öffentlichen Verkehrsnetz (Einfluss auf die Versorgungssicherheit der Baustelle) zu berücksichtigen.

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 großen Fahrdistanzen zu überwinden sind und auch keine sonstigen externen Abhängigkeiten (z.B. Staus, Fehler bei Betonbestellungen) bestehen [145]. Die Hauptgründe für eine problematische Belieferung einer Tunnelbaustelle durch eine externe Betonmischanlage können an den durchlaufenden Arbeitszeiten (Schichtbetrieb), der geforderten Spritzbetonqualität, dem etwaigen

erforderlichen Transport durch bewohntes Gebiet und sonstige rechtliche Transportbestimmungen liegen.

Hinsichtlich der Versorgungssicherheit stellt insbesondere die Entfernung des Tunnelbauprojektes zur nächsten Betonmischanlage – abgesehen von der erforderlichen Gesamt(spritz)betonkubatur bei einem Tunnelbauvorhaben - ein wesentliches Kriterium für die Entscheidung über den Aufbau einer eigenen Aufbereitungs- bzw. Betonmischanlage oder die Zulieferung des Mischgutes von einem externen Transportbetonmischwerk dar.

Entsprechend einer von den Mitgliedern des Güteverbandes für Transportbeton in Auftrag gegebenen Studie [135] über die Produktionsentwicklung österreichischer Betonmischanlagen wird der Versuch gemacht, das durchschnittliche Einzugsgebiet je Betonmischwerk in Österreich und damit die durchschnittliche Entfernung von einer Baustelle zum nächstgelegenen Mischwerk abzuschätzen.

Gemäß dieser o.a. Studie zeigt sich, dass

- 1997 rund 8,3 Mio. m³,
- 1998 knapp über 8,5 Mio. m³ und
- 1999 nahezu 9 Mio. m³ Transportbeton

erzeugt wurden.

Dem Güteverband für Transportbeton gehörten im Jahr 1999 insgesamt 117 Mitglieder bzw. 235 Transportbetonmischwerke an. Damit ergibt sich bei einer österreichischen Gesamtbetonproduktion von 9 Mio. m³ eine durchschnittliche Produktion je österreichischem Werk von ca. 38.300 m³ Transportbeton (= 9 Mio. m³ / 235 Werke).

Bei einer Gesamtfläche Österreichs von ca. 89.000 km² und einer Anzahl von 235 Transportbetonmischwerken errechnet sich damit ein durchschnittliches Einzugsgebiet je Mischwerk von ca. 378 km² (= 89.000 km² / 235 Werke) oder mit anderen Worten, der mittlere Radius des Einzugsgebiets rund um das Transportbetonmischwerk beträgt ca. 11 km (= $(378 / \pi)^{1/2}$).

Schlussfolgerung:

- **Bei einer Entfernung der Tunnelbaustelle von weniger als 11 km vom Betonmischwerk gilt:** Es ist grundsätzlich von einer hohen Versorgungssicherheit der Baustelle mit Transportbeton auszugehen. Im innerstädtischen Gebiet kann es durch den laufend zunehmenden motorisierten Individualverkehr und den daraus resultierenden Stauungen trotz einer scheinbar geringen Entfernung zum

Transportbetonwerk zu Zulieferungsproblemen kommen, dieser Aspekt muss bei der Entscheidungsfindung entsprechend berücksichtigt werden.

Der Antransport von Fertigmischgut mit Fahrmischern aus einer externen Mischanlage kann damit eine baubetrieblich effiziente und wirtschaftliche Alternative zu einer eigenen Betonmischanlage darstellen und sollte in einer Kostenkalkulation entsprechend berücksichtigt werden.

- **Bei einer Entfernung der Tunnelbaustelle von mehr als 11 km vom Betonmischwerk gilt:** Es ist von einer geringeren Versorgungssicherheit der Baustelle mit Transportbeton auszugehen, d.h. durch die größere Entfernung der Betonmischanlage von der Baustelle kann es zu Engpässen bei der Betonzulieferung (z.B. Stau, ungünstige Verkehrserschließung der Baustelle) kommen. Es muss aber berücksichtigt werden, ob es sich um dabei eine innerstädtische Baustelle oder eine Baustelle in ländlichem Gebiet handelt, in ländlichen Regionen mit geringem Verkehrsaufkommen bedeuten auch größere Entfernungen nicht unbedingt Einschränkungen bei der Versorgungssicherheit der Baustelle.

Der Antransport von Fertigmischgut mit Fahrmischern aus einer externen Mischanlage kann damit zwar eine wirtschaftliche Alternative zu einer eigenen Betonmischanlage darstellen, die jeweiligen Kosten der beiden Varianten sollten aber einander in einer Kalkulation jedenfalls detailliert gegenübergestellt werden.

IV.3 Baubetrieb

Eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für die Auswahl eines geeigneten Spritzbetonsystems im Tunnelbau stellt der Beurteilungsaspekt „Baubetrieb“ dar. In diesem Kapitel werden daher mögliche Ausbruchs- (z.B. Voll- oder Teilausbrüche) und Vortriebsarten (zyklisch oder kontinuierlich) bei Tunnelbauprojekten und ihre Auswirkungen auf das jeweilige Spritzbetonverfahren, die spezifischen Verfahrenstechniken und charakteristische baubetriebliche Eigenschaften der einzelnen Spritzbetonsysteme (z.B. Witterungssicherheit, Rückprall) beschrieben.

Übersichtlich dargestellt werden die Beurteilungskriterien für die insgesamt acht analysierten Spritzbetonsysteme schlussendlich in einer baubetrieblichen Zielertragsmatrix (s. Tabelle 16 bis Tabelle 18). Unter einem Zielertrag wird ein „Matrixkästchen“ mit numerischem oder verbalem Inhalt verstanden, d.h. mit Hilfe von Zielerträgen werden die Spritzbetonsysteme hinsichtlich bestimmter Beurteilungskriterien beschrieben und anschließend einer ganzheitlichen Bewertung mittels einer Nutzwertanalyse unterzogen (vgl. Kap. VI).

IV.3.1 Ausbruchs- und Vortriebsart

IV.3.1.1 Allgemeines

Unter dem Begriff „Vortrieb“ versteht die ÖNORM B 2203-1 [139] Leistungen, die zur Herstellung eines unterirdischen Hohlraumes dienen, und im Besonderen die Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und Verführens sowie den Stützmitteleinbau beinhalten. In der Abbildung 38 wird zunächst ein Überblick über mögliche Ausbruchs- (Voll- oder Teilquerschnitt) und Vortriebsarten (zyklisch oder kontinuierlich) bei Tunnelbauvorhaben gegeben.

Die vom Auftraggeber ausgeschriebene bzw. in der Phase der Angebotserstellung vom Unternehmer gewählte Ausbruchsart (Voll- oder Teilausbruch) hängt im Wesentlichen von folgenden Parametern ab:

- Gebirgsverhalten (standfest, nachbrüchig, gebräch oder druckhaft)
- Überdeckung
- Hohlraumgröße
- Hohlraumform
- Vortriebsart (zyklischer oder kontinuierlicher Vortrieb)
- Effizienz der baubetrieblichen Abläufe
- Gerätegröße und -leistung
- Sicherungsmaßnahmen
- Stützmitteleinbau



Abbildung 38: Überblick über Ausbruchs- und Vortriebsarten im Tunnelbau

Bei den Vortriebsarten wird in der Abbildung 38 zwischen zyklischen und kontinuierlichen Vortrieben unterschieden, die angeführten Begriffsbestimmungen sind der ÖNORM B 2203-1 [139] entnommen. Unter dem zyklischen Vortrieb wird jene Vortriebsart verstanden, bei der die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und Stützmitteleinbaues (z.B. Sicherung der Hohlraumleibung mit Spritzbeton) im Wesentlichen zeitlich nacheinander erfolgen und mit Hilfe von Einzelgeräten ausgeführt werden. Das Lösen erfolgt dabei in der Regel durch Sprengen, kann aber auch durch Teilschnittmaschinen oder Tunnelbagger erfolgen.

Die gegenständliche Arbeit behandelt ausschließlich den Spritzbetonauftrag bei zyklischen Vortrieben, der kontinuierliche Vortrieb wird beim Aufbau eines Entscheidungshilfesystems zur Auswahl eines geeigneten Spritzbetonsystems nicht berücksichtigt.

Für die Auswahl einer geeigneten Ausbruchsart für ein Tunnelbauvorhaben sind die Kriterien „Standfestigkeit des Gebirges“, „Zeitbedarf für den Stützmitteleinbau“ und „Vortriebsgerät“ zu berücksichtigen und im Überblick in der Tabelle 11 dargestellt. Dabei werden unter dem Begriff „Teilausbruch“ in diesem Zusammenhang Kalotten-, Strossen- und Sohlenvortriebe sowie Ulmenstollenvortriebe subsummiert.

Kriterium	Vollausbruch	Teilausbruch
Standfestigkeit des Gebirges	Ein Ausbruch des Gesamtquerschnittes ist möglich.	Kein Ausbruch des Gesamtquerschnitts möglich, folgende Maßnahmen müssten zur Erhöhung der Standzeit getroffen werden: <ul style="list-style-type: none"> • Reduktion der Abschlagslänge • Ausbruch von Teilquerschnitten bzw. Teilflächen • Sonderbaumaßnahmen (z.B. Rohrschim)
Zeitbedarf für den Stützmitteleinbau	Der Zeitbedarf vom Stützmitteleinbau bis zum Erreichen der Gebirgstragfähigkeit ist kleiner als die Standzeit des Gebirges.	Der Zeitbedarf vom Stützmitteleinbau bis zum Erreichen der Gebirgstragfähigkeit ist größer als die Standzeit des Gebirges.
Vortriebsgerät	Die Größe, der Raumbedarf und die Leistungsfähigkeit der Vortriebsgeräte reichen aus, um den Vollquerschnitt wirtschaftlich bearbeiten zu können.	Die Größe, der Raumbedarf und die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Vortriebsgeräte reichen nicht aus, um den Vollquerschnitt wirtschaftlich bearbeiten zu können.

Tabelle 11: Kriterien für die Auswahl einer geeigneten Ausbruchsart

In der Tabelle 12 und der Tabelle 13 werden die grundsätzlichen Vor- und Nachteile von Voll- bzw. Teilausbrüchen einander gegenübergestellt.

Ausbruchsart	Vorteile	Nachteile
Vollausbruch	<ul style="list-style-type: none"> • Gebirgsschonend – die Anzahl an Spannungsumlagerungen beim Ausbruch ist gering. • Vollflächiger Arbeitsraum steht den eingesetzten Vortriebsgeräten zur Verfügung. • Kürzere Bauzeiten als beim Teilausbruch. 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlecht anpassungsfähig an unerwartet schlechte Gebirgsverhältnisse. • Gefahr von Störfallsituationen bei sich ändernden Gebirgsverhältnissen. • Geringere Abschlagslängen, da der Ringschluss der Sicherung nachgezogen werden muss

Tabelle 12: Überblick über Vor- und Nachteile von Vollausbrüchen (vgl. [47])

Ausbruchsart	Vorteile	Nachteile
Kalottenvortrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Gute baubetriebliche Anpassungsmöglichkeiten an wechselnde Gebirgsverhältnisse. • Günstige Vortriebsvariante bei sehr großen Tunnelquerschnitten. • Ein frühzeitiges Sichern der Firste ist möglich, um Auflockerung zu verhindern. • Ein Kalottenvortrieb bzw. Firststollen dient als potentielle Vorerkundungsmaßnahme. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Stützmittelbedarf. • Sehr später Sohlschluss, der Querschnitt ist daher empfindlich gegen Seitendruck. • Die Kalotte kann beim Sprengvortrieb der Strosse beschädigt werden.
Ulmenstollenvortrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Durch den vorlaufenden Ausbruch und die Sicherung der Ulmenstollen ist die Kalotte bzw. Strosse baubetrieblich gut beherrschbar. • Geringe Setzungen während der Vortriebsarbeiten. • Ulmenstollen dienen als potentielle Vorerkundungsmaßnahme. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es ergibt sich eine größere Anzahl an Spannungumlagerungen im Gebirge während der hintereinander laufenden Vortriebsabschnitte. • Später Sohlschluss, wenn die Sohle dem Kernabbau nicht sofort folgt. • Ein Einsatz ist nur bei großen Tunnelquerschnitten möglich. • Größerer Zeit- und Geräteaufwand.

Tabelle 13: Überblick über Vor- und Nachteile von Teilausbrüchen (vgl. [47])

Beim Teilausbruch mittels Kalotte, Strosse und Sohle kann zwischen einem klassischen Kalottenvortrieb und einem Inselbetrieb für den Kalottenvortrieb unterschieden werden.

Dabei sieht der **klassische Kalottenvortrieb** die Ausbildung einer Rampe zur Strosse vor, d.h. die Ver- und Entsorgung der Kalotte kann mit rad- bzw. gleisgebundenen Fahrzeugen über die Strosse erfolgen. Vortriebsgeräte (z.B. Bohrwagen, Radlader, Mulden) können damit wahlweise für beide Vortriebsorte eingesetzt werden, sofern baubetriebliche Erfordernisse diesen Einsatz notwendig machen.

Im Gegensatz zum klassischen Kalottenvortrieb wird unter einem **Inselbetrieb** für die Kalotte ein baubetriebliches Vortriebskonzept verstanden, bei dem keine Ausbildung einer Rampe zur Strosse erfolgt (s. Abbildung 39 und Abbildung 40).

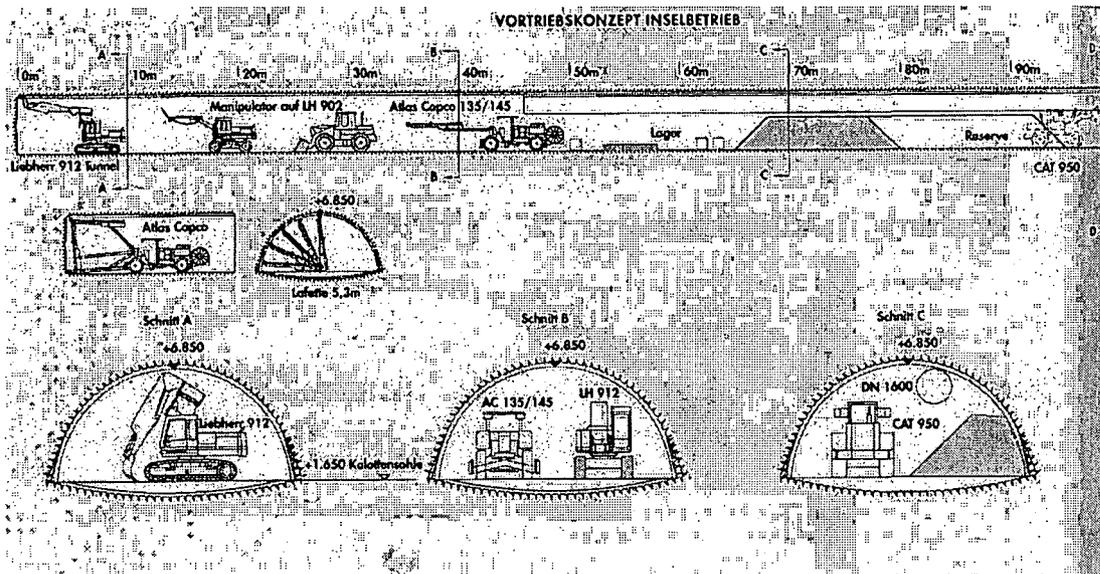


Abbildung 39: Beispiel für den Inselbetrieb des Kalottenvortriebes beim Tunnel Spital [61] - Teil 1

Ein solcher Inselbetrieb kann durch die je nach Vortriebsklasse vertraglich bestimmte Ausführung eines Ringschlusses in festgelegten Abständen nach der Ortsbrust der Kalotte erforderlich sein.

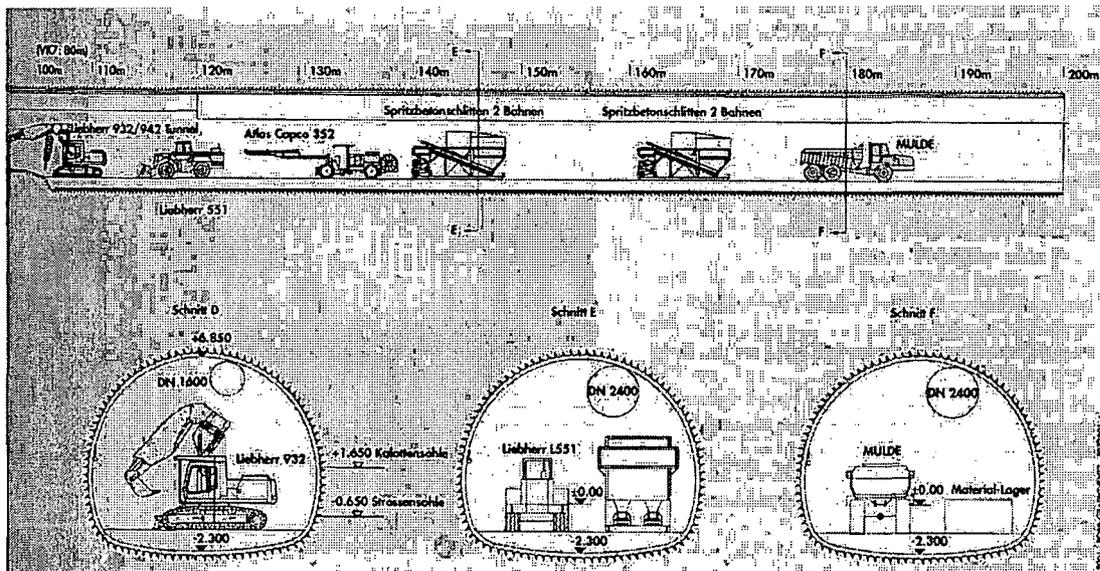


Abbildung 40: Beispiel für den Inselbetrieb des Kalottenvortriebes beim Tunnel Spital [61] – Teil 2

Die Ver- und Entsorgung der Kalotte kann bei einem Inselbetrieb nicht über die Strosse erfolgen (nachdem keine Verbindung zwischen diesen beiden Vortriebsarten besteht), daher müssen Vortriebsgeräte ausschließlich für die Kalotte vorgehalten werden und können nicht an anderen Vortriebsarten (z.B. in der Strosse) eingesetzt werden.

Hinsichtlich der Ausbruchs- bzw. Vortriebsart ergeben sich für die analysierten Spritzbetonsysteme damit die nachfolgenden Zielerträge (s. Punkt IV.3.1.2 bis IV.3.1.5). Für die Spritzbetonsysteme werden dabei die Lang- bzw. Kurzbezeichnungen gemäß Abbildung 29 verwendet, in den nachfolgenden Kapiteln werden in den Überschriften nur mehr die Kurzbezeichnungen angeführt. Die übersichtliche Darstellung der Zielerträge erfolgt in der Tabelle 16 in der Zeile „Ausbruchs- und Vortriebsart“.

IV.3.1.2 Trockenspritzbeton und Trockenmischgut – Fremd- und Eigenversorgung (TM-F und TM-E)

- In sehr wechselhaftem Gebirge mit flacher Überdeckung und einem häufigen Vortrieb mit Teilquerschnitten sehr gut einsetzbar.
- Auf Grund der hohen Flexibilität dieses Verfahrens bestehen gegenüber den anderen Spritzbetonsystemen Vorteile bei Vortrieben mit mehreren Angriffspunkten.
- Ein Inselbetrieb für die Kalotte ist hier nicht möglich.

IV.3.1.3 Trockenspritzbeton und Feuchtmischgut – Fremd- und Eigenversorgung (FMS-F und FMS-E)

- In sehr wechselhaftem Gebirge mit flacher Überdeckung und einem häufigen Vortrieb mit Teilquerschnitten sehr gut einsetzbar.
- Beim Ulmenstollenvortrieb – aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Ulmenstollen – ist der Einsatz dieses Verfahrens nicht möglich.
- Ein Inselbetrieb ist nur bei diesem Spritzbetonverfahren möglich.

IV.3.1.4 Nassspritzbeton im Dichtstromverfahren – Fremd- und Eigenversorgung (NSDI-F und NSDI-E)

- Bei einem Ausbruch von Teilflächen sind bei diesem Verfahren Behinderungen zu erwarten. Die aufzufahrenden Teilquerschnitte müssen den Einsatz von Spritzbetonmanipulatoren erlauben, außerdem können sich für diesen Fall Probleme mit der Verfügbarkeit dieses Spritzbetonsystems (z.B. Problematik der Betonbestellung oder Restmengen nach einem Spritzvorgang) ergeben.
- In der Kalotte kann bei diesen Verfahren kein Inselbetrieb erfolgen.

IV.3.1.5 Nassspritzbeton im Dünnstromverfahren – Fremd- und Eigenversorgung (NSDU-F und NSDU-E)

- Bei einem Ausbruch von Teilflächen sind geringere Behinderungen als beim System NSDI-F bzw. NSDI-E zu erwarten, nachdem durch den Spritzvorgang mit einer Rotorspritzmaschine geringe Förderleistungen erzielt werden können und damit ein

manueller Spritzbetonauftrag auch bei kleinen Teilflächen möglich ist. Die Problematik von Restmengen stellt sich allerdings auch bei diesem Verfahren.

- Aus baubetrieblichen Gründen kann auch bei diesen Verfahren kein Inselbetrieb in der Kalotte durchgeführt werden.

IV.3.2 Dosiertechnik

IV.3.2.1 Allgemeines

Entsprechend der Richtlinie Spritzbeton [106] ist die Dosierung von Erstarrungsbeschleuniger, Spritzbindemittel und Gesteinskörnung ein wesentliches Kriterium für die erzielbare Früh- und Endfestigkeit des Spritzbetons. Zur Sicherung einer gleichmäßigen Dosierung über die Einsatzdauer ist eine regelmäßige Wartung, Reinigung und Überprüfung der Dosiereinrichtung durchzuführen. Die Dosierung der Spritzbetonkomponenten kann sowohl gravimetrisch, als auch volumetrisch erfolgen [41].

Bei der gravimetrischen Dosierung ergeben sich folgende Nachteile:

- Belegte und verschmutzte Förderbänder verfälschen die Wägung.
- Das Gewicht des Gesteinskörnunges ist im Wesentlichen von der Eigenfeuchte abhängig, d.h. gleichzeitig mit der Wägung müsste eine exakte Bestimmung der Eigenfeuchte erfolgen.
- Es sind bei der gravimetrischen Dosierung empfindliche Messeinrichtungen erforderlich.
- Auf Grund von Sprengerschütterungen ist der Einsatz beim Sprengvortrieb problematisch.

Bei der volumetrischen Dosierung ergeben sich folgende Nachteile:

- Der Füllgrad der Rotorkammern (wesentlich für die Verfahren FMS und NSDU) ist von der Schüttdichte des Materials abhängig.
- Bei einer Änderung der Sieblinie ist eine neue Eichung der Messeinrichtungen erforderlich.
- Bei einer Schneckenförderung der Spritzbetonausgangsstoffe kann eine abgenutzte Schneckenwendel zu Ungenauigkeiten in der Dosierung führen.

IV.3.2.2 TM-F und TM-E

Die Dosierung der Einzelkomponenten (Gesteinskörnung, Spritzbindemittel und eventuell Zusatzstoffe) erfolgt vollautomatisch über Wiegebänder in einer externen Betonmischanlage (TM-F) oder in einer baustelleneigenen Mischanlage (TM-E). Das fertige Trockenmischgut (inkl. eines fallweise erforderlichen Erstarrungsbeschleunigers) wird dann

- entweder mit speziellen Silofahrzeugen von der externen Mischanlage zur Baustelle angeliefert und an einen unter Druck stehenden Vorratssilo (ca. 10 bar Überdruck) übergeben (TM-F) oder
- direkt auf der Baustelle von der baustelleneigenen Mischanlage mittels Schneckenförderung an einen unter Druck stehenden Vorratssilo (ca. 10 bar Überdruck) übergeben (TM-E).

Die Befüllung der Druckkessel des TM-Mobiles erfolgt über die bereits beschriebenen Vorratssilos mittels Schneckenförderung, wobei die jeweilige Mischgutmenge im Druckkessel vom Gerätefahrer per Knopfdruck gesteuert werden kann.

Es ergeben sich für die Verfahren TM-F und TM-E damit folgende Zielerträge (s. Tabelle 16):

- Die Dosierung der Spritzbetonausgangsstoffe erfolgt entweder in einer externen oder einer baustelleneigenen Mischanlage. Damit ist einerseits eine hohe Mischgutqualität gewährleistet, allerdings kann andererseits die Mischgutrezeptur vor Ort nicht mehr an geänderte Vortriebsbedingungen angepasst werden.
- Die eigentliche Durchmischung von Gesteinskörnung und Bindemittel erfolgt bei diesem Verfahren in der Förderleitung bzw. im Förderschlauch. Die Luftfeuchtigkeit in der Förderleitung muss daher genauestens beachtet werden, um eine Vorreaktion des ofentrockenen Mischgutes bereits vor der eigentlichen Wasserzugabe an der Spritzdüse auszuschließen (s. Anforderungen an das Mischgut – Kap. IV.5.1).
- Die Wasserzugabe an der Spritzdüse erfolgt manuell durch den Düsenführer. Damit kann der Wasser-Bindemittel-Wert verändert und der Rückprall, die Staubentwicklung und die Spritzbetonqualität beeinflusst werden.
- Durch die mögliche Gefahr einer Entmischung des Trockenmischgutes im Vorratssilo sind Ungenauigkeiten der Mengemessung bei der Befüllung der TM-Mobile nicht auszuschließen.

IV.3.2.3 FMS-F und FMS-E

Durch den Einsatz von mobilen Mischanlagen erfolgt bei diesem Verfahren die Dosierung der Gesteinskörnung in zwei Schritten. Ein Schieber am Abzugsförderband hinter dem Kiesbehälter regelt die Grobdosierung (s. Abbildung 22), über eine Bandverwiegung wird die genau erforderliche Menge der Gesteinskörnung ermittelt. Das Spritzbetonbindemittel wird mittels Zementschnecke gefördert und entsprechend dem eingestellten Mischungsverhältnis zudosiert, wobei die mengenmäßige Erfassung ebenfalls über ein Wiegeband erfolgt. Die beiden eingewogenen Spritzbetonausgangsstoffe fallen dann in einen – aus einer

Horizontalwelle mit Paddel bestehenden – Durchlaufmischer und werden im Gegenstromprinzip gemischt.

Für die Verfahren FMS-F und FMS-E ergeben sich somit folgende Zielerträge (s. Tabelle 16):

- Es bestehen hohe Genauigkeitsanforderungen an die Dosiereinrichtung, wobei die Zusammenführung der Materialkomponenten vor Ort problematisch sein kann.
- Durch Sprengerschütterungen können Fehler bei der gravimetrischen Dosierung der Spritzbetonausgangsstoffe auftreten.
- Die Mischgutrezeptur kann – auf Grund der Dosierung der Spritzbetonausgangsstoffe im Mobile Mischanlage unmittelbar vor Ort - durch die Vortriebsmannschaft an die geänderten Vortriebsverhältnisse angepasst werden.

IV.3.2.4 NSDI-E und NSDI-F

Die Zielerträge für diese Verfahren NSDI-F und NSDI-E lauten (s. Tabelle 16):

- Die Dosierung der Einzelkomponenten Gesteinskörnung, Zusatzstoffe, Bindemittel und Wasser erfolgt in einer externen (NSDI-F) oder einer baustelleneigenen Mischanlage (NSDI-E). Damit ist eine hohe Qualität und Gleichmäßigkeit des Mischgutes zu erwarten.
- Die Mischgutrezeptur kann vor Ort nicht mehr an geänderte Vortriebsverhältnisse angepasst werden.
- Bei der Auswahl von Förderpumpen für das Nassmischgut bzw. den Erstarrungsbeschleuniger sind die Viskosität des Fördermediums, die Saughöhe, die Pumpleistung, die Fördermenge und der erforderliche Förderdruck zu beachten.
- Flüssige Erstarrungsbeschleuniger können mittels Kolben- oder Membranpumpen (entsprechend der Hubfrequenz der eingesetzten Kolbenpumpe zur Betonförderung) in ausreichender Genauigkeit an der Spritzdüse zudosiert werden. Die Fördermenge der Dosiergeräte ist dabei stufenlos einstellbar, d.h. die eingestellte prozentuelle Beigabe nach dem Zementgehalt wird konstant gehalten. Wird die Förderleistung der Betonspritzmaschine geändert, kann die Zusatzmittelbeigabe nach einer erforderlichen Eichung der Maschine entsprechend angepasst werden.

IV.3.2.5 NSDU-E und NSDU-F

Für die Verfahren NSDU-E und NSDU-F gelten hinsichtlich der Dosiertechnik die Aussagen und Zielerträge im Punkt IV.3.2.4 und in der Tabelle 16.

IV.3.3 Einsatzbereich

In diesem Abschnitt sollen die optimalen baubetrieblichen Einsatzbereiche (inkl. der wesentlichen Vor- und Nachteile) der analysierten Spritzbetonsysteme angeführt werden.

IV.3.3.1 TM-F und TM-E

Bei oberflächennahen Tunnelbauvorhaben ist ein schnell erhärtender Spritzbeton erforderlich, um eine sofortige Tragwirkung der Spritzbetonaußenschale zu ermöglichen. Für diesen Fall erscheinen die Verfahren TM-F bzw. TM-E aufgrund der hohen erzielbaren Frühfestigkeit allen anderen Spritzbetonsystemen überlegen. Aufgrund der hohen Flexibilität dieser Verfahren eignet sich auch ein Einsatz bei mehreren gleichzeitig laufenden Vortrieben. Die TM-Mobile können nämlich direkt an den jeweiligen Spritzbetoneinbauort fahren, es entfallen somit einerseits aufwändige Rüstzeiten und andererseits können auch Kleinmengen an Spritzbeton zur Sicherung von Teilflächen aufgetragen werden. Die Problematik von Restmengen an Spritzbeton stellt sich bei diesem Verfahren auch nicht.

Für die Verfahren TM-E bzw. TM-F ergeben sich für den optimalen Einsatzbereich somit folgende Zielerträge (s. Tabelle 16):

- Ein möglicher Einsatzbereich ergibt sich bei kleinen Tunnel- und Stollenvolumina, denn die Systeme TM-E bzw. TM-F eignen sich gut für kurze Tunnel mit großem Querschnitt und mittellange Stollen mit kleinem Querschnitt.
- Durch den Einsatz von TM-Mobilen ist der Platzbedarf direkt am Einbauort gering, d.h. auch in sehr kleinen – von den TM-Mobilen gerade noch befahrbaren Querschnitten – sind diese Verfahren sehr gut einsetzbar (vgl. [67])
- Bei kurzen Tunnel- oder Stollenlängen von weniger als 400 m kann die Förderung des ofentrockenen Mischgutes auch direkt vom Vorratssilo über eine Dosierblasschnecke (Förderschnecke mit Hohlseele – s. Abbildung 13) über an der Ulme montierte Förderleitungen bis zum Einbauort an der Ortsbrust erfolgen. Damit entfällt die Vorhaltung von TM-Mobilen und das Verfahren stellt eine baubetrieblich und wirtschaftlich gute Alternative zu anderen Spritzbetonsystemen dar.
- Verschlechtern sich die Gebirgsverhältnisse sehr, so ist das Verfahren mit seiner fertigen Mischgutrezeptur und der geringeren Spritzleistung problematisch. Die kombinierte Verwendung mit einem der anderen Verfahren kann sich als wirtschaftliche Alternative darstellen. In dem Fall einer Verfahrenskombination werden mit den Verfahren TM-F bzw. TM-E einzelne Teilflächen gesichert und das Vorspritzen der Ortsbrust bewerkstelligt. Der Auftrag von großen Spritzbetondicken bis zu 40 cm in der Tunnellaubung und in der Sohle kann nachfolgend z.B. im Nassspritzverfahren erfolgen.

- Die Verfahren sind für die Sicherung von Teilflächen bzw. von Kleinbereichen sehr gut geeignet.

IV.3.3.2 FMS-F und FMS-E

Die Verfügbarkeit des Spritzbetons kann durch den Einsatz der vollautomatischen Dosier- und Mischanlage („Mobile Mischanlage“) direkt an der Ortsbrust sowohl für kleine (Sicherung von Teilflächen), als auch für große Spritzbetonmengen (Spritzbetonauskleidung der Tunnellaibung bei großen Schichtdicken) gewährleistet werden.

Es ergeben sich folgende Zielerträge in der Tabelle 16:

- Die Verfahren FMS-F und FMS-E sind universell einsetzbar, d.h. sowohl kleine als auch große Spritzbetonmengen können damit wirtschaftlich eingebaut werden.
- Die Vorort-Produktion des Spritzbetons ermöglicht eine unmittelbare Anpassung der Mischgutrezeptur an geänderte Vortriebsbedingungen.
- Eine Kombination des Verfahrens mit dem Nassspritzverfahren im Dünnstrom (NSDU-F bzw. NSDU-E) ist – auf Grund der ähnlichen Gerätedisposition dieser Systeme – sehr gut möglich. Das Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen wird in diesem Fall zur Voraussicherung von Teilflächen eingesetzt, der Einbau großer Spritzbetonmengen zur Sicherung der Hohlraumlaibung erfolgt dann mit dem Nassspritzverfahren im Dünnstrom. Dadurch können mehrere Synergieeffekte erzielt werden (vgl. auch [72]), einerseits wird die ständige Verfügbarkeit von Spritzbeton durch das System FMS genutzt und andererseits ermöglicht das Nassspritzverfahren im Dünnstrom niedrige Rückprallwerte und eine geringere Staubentwicklung.

IV.3.3.3 NSDI-F und NSDI-E

Die Zielerträge für die Verfahren NSDI-F und NSDI-E stellen sich wie folgt dar (s. Tabelle 16):

- Das Nassspritzverfahren im Dichtstrom ist bei großen Spritzbetonkubaturen (d.h. große Tunnelquerschnitte und große Abschlagslängen) und „guten“ Vortriebsbedingungen (d.h. standfestes Gebirge und geringer Bergwasserandrang) sehr gut einsetzbar. Diese guten Vortriebsbedingungen gewährleisten kurze Spritzbetonpausen und damit stellt sich die Problematik der Spritzbetonrestmengen bei mehrfachen Unterbrechungen der Spritzbetonarbeiten nicht.
- Beim Verfahren NSDI-F sollte die Entfernung der externen Mischanlage zur Baustelle berücksichtigt werden (s. Pkt. IV.2.6), um eine hohe Versorgungssicherheit der Baustelle mit dem Nassmischgut gewährleisten zu können.

- Beim Verfahren NSDI-E sollte die Mischanlage in der Nähe des Tunnelportals aufgestellt werden, um lange Transportwege des Fertigmischgutes von der Mischanlage zur Ortsbrust zu vermeiden.
- In der Kalkulation des Verfahrens NSDI-E müssen mögliche Synergieeffekte untersucht werden, die durch die Nutzung der Mischanlage für die Betonproduktion der Ortbetoninnenschale bei zweischaligen Konstruktionen (s. IV.2.3.1) entstehen.
- Durch den hohen Gerätebedarf (Fahrmischer, Betonpumpe und Spritzbetonmanipulator an der Ortsbrust) sind Behinderungen bei Vortrieben von Teilquerschnitten erwartbar.

IV.3.3.4 NSDU-F und NSDU-E

Für das Nassspritzverfahren im Dünnstrom ergeben sich folgende Zielerträge (s. Tabelle 16):

- Die Verfahren NSDU-F und NSDU-E haben einen breiter gefächerten Einsatzbereich als das Nassspritzverfahren im Dichtstrom. Sie können sowohl bei großen erforderlichen Spritzbetonkubaturen unter guten Vortriebsbedingungen (s. IV.3.3.3) eingesetzt werden, als auch bei kleinen Tunnelquerschnitten mit Teilflächenausbrüchen und kleinen erforderlichen Spritzbetonmengen (s. [59]).
- Beim Verfahren NSDU-E sollte die Mischanlage ebenfalls in der Nähe des Tunnelportals aufgestellt werden, um lange Transportwege des Fertigmischgutes von der Mischanlage zur Ortsbrust zu vermeiden.
- Mögliche Synergieeffekte müssen beim Verfahren NSDU-E durch die gleichzeitige oder nachträgliche Nutzung der Mischanlage für die Betonherstellung einer eventuell erforderlichen Ortbetoninnenschale kostenmäßig untersucht werden.
- Eine Kombination des Nassspritzverfahrens im Dünnstrom mit dem Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen ist gut möglich, damit können unterschiedlichste Vortriebsbereiche wirtschaftlich mit Spritzbeton gesichert werden.

IV.3.4 Flexibilität und Verfügbarkeit

IV.3.4.1 Allgemeines

Die Psychologie versteht unter dem Begriff „Flexibilität“ die Fähigkeit des Menschen, sich im Verhalten und Erleben wechselnder Situationen rasch anzupassen. In der gegenständlichen Arbeit wird unter dem Begriff „Flexibilität“ die Fähigkeit eines Spritzbetonsystems verstanden, sich rasch an unterschiedliche Vortriebsbedingungen (z.B. Änderung des Gebirgsverhaltens, starke Zunahme des Bergwasserandrangs, gleichzeitige Versorgung mehrerer Vortriebsorte) anzupassen.

Mit dem Begriff der „**Verfügbarkeit**“ wird die Eigenschaft eines Spritzbetonsystems bezeichnet, die richtige Menge Spritzbeton zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Vortriebsort bereitzustellen. Die Verfügbarkeit von Spritzbeton zählt nach der übereinstimmenden Aussage von Bauleitern zu einem der wesentlichen Entscheidungskriterien für ein Spritzbetonsystem. Besonders bei schlechten geologischen Verhältnissen ergibt sich oft das Problem, die richtige Menge an Spritzbeton zur richtigen Zeit bereitzustellen [50].

IV.3.4.2 TM-F und TM-E

Die Spritzbetonsysteme TM-F und TM-E zeichnen sich durch eine hohe Einsatzflexibilität und eine hohe Verfügbarkeit aus, d.h. eine rasche Anpassung an sehr unterschiedliche Vortriebsbedingungen ist bei diesen beiden Verfahren sehr gut möglich. Durch den Einsatz von allradgetriebenen TM-Mobilen ist zusätzlich eine hohe Verfügbarkeit von Spritzbeton gewährleistet.

Hinsichtlich der Flexibilität und Verfügbarkeit von TM-F und TM-E ergeben sich folgende Zilerträge (s. Tabelle 17 und Tabelle 18):

- Die allradgetriebenen Silofahrzeuge mit aufgebauter Dosierblanschnecke, die sogenannten TM-Mobile, sind leicht und sehr beweglich. Sie lassen sich daher unmittelbar am Einbauort schnell und ohne aufwändige Rüstarbeiten einsetzen.
- Es können mit diesen Verfahren mehrere Vortriebsorte gleichzeitig versorgt werden.
- Durch die Lagerfähigkeit des Trockenmischgutes im TM-Mobil, d.h. die Geräte können bereits vorab befüllt und im Tunnel einsatzbereit abgestellt werden, ist eine sehr hohe Verfügbarkeit mit Spritzbeton gegeben.
- Die geologischen (z.B. Änderung des Gebirgsverhaltens) und hydrologischen (starke Zunahme des Bergwasserandrangs) Randbedingungen können eine Öffnung der Ortsbrust in Teilquerschnitten bzw. in Teilflächen erfordern. Die daraus resultierenden, oftmals erforderlichen kleinen Spritzbetonmengen zur Sicherung des Hohlraumes sind beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut gut verarbeitbar.
- Spritzpausen bedingen keine aufwändige Reinigung der Spritzbetongeräte durch den Maschinisten.
- Die Spritzbetonmenge je Abschlag ist durch die Größe der Druckkessel der TM-Mobile begrenzt, d.h. bei großen Tunnelquerschnitten und großen Spritzbetondicken müssen entweder mehrere TM-Mobile vorgehalten oder der Spritzvorgang für die Dauer der Wiederbefüllung der Geräte unterbrochen werden.
- Die Anzahl der einzusetzenden TM-Mobile ist abhängig vom Spritzbetonbedarf und von der gleichzeitig notwendigen Verfügbarkeit von Spritzbeton an unterschiedlichen Vortriebsorten bzw. -abschnitten.

IV.3.4.3 FMS-F und FMS-E

Die vollautomatische Dosier- und Mischanlage, die sogenannte mobile Mischanlage, besitzt entweder ein Schlitten- oder ein Raupenfahrwerk (s. Abbildung 22). Die mobile Mischanlage darf zur Erreichung einer wirtschaftlichen Förderleistung in der Regel nicht mehr als 150 Meter vom Spritzbetoneinbauort entfernt sein (der theoretisch mögliche Maximalabstand beträgt ca. 300 m) und muss daher von Zeit zu Zeit entsprechend den erzielten Vortriebsleistungen umgestellt werden. Unter diesen Randbedingungen ergeben sich für die Verfahren FMS-F und FMS-E die entsprechenden Zielerträge der Tabelle 17 und Tabelle 18:

- Die Flexibilität dieses Verfahrens ist beim Einsatz einer vollautomatischen Dosier- und Mischanlage auf einem schweren und unbeweglichen Spritzbetonschlitten gegenüber den anderen Verfahren eingeschränkt.
- Verbesserungen hinsichtlich der Flexibilität lassen sich durch die Verwendung von verfahrenbaren Anlagen mit Raupenfahrwerk erzielen. Es kann dann auch beim System FMS mit der mobilen Mischanlage bis zum Einbauort des Spritzbetons gefahren werden, damit werden auch die Druckluft- und die Förderkosten minimiert.
- Die Verfügbarkeit von FMS-F und FMS-E ist sehr hoch, nachdem durch die direkte Produktion vor Ort jederzeit Spritzbeton in der richtigen Menge, zur richtigen Zeit und am richtigen Ort zur Verfügung gestellt werden kann.
- Durch die gespeicherten, unterschiedlichen Mischgutrezepturen ist das Trockenspritzverfahren mit Feuchtmischgut auch sehr gut an unterschiedliche Vortriebsbedingungen anpassbar. Die hohe Verfügbarkeit - besonders unter schwierigen geologischen Verhältnissen – stellt somit einen großen Vorteil gegenüber anderen Systemen dar (unter Umständen können auch Fasern zugegeben werden).
- Eine Spritzunterbrechung ist jederzeit möglich, jedoch ist ein Leerfahren der Kammern der Rotorspritzmaschine bei diesem Spritzbetonsystem notwendig.

IV.3.4.4 NSDI-F und NSDI-E

Beim Nassspritzverfahren im Dichtstrom hängen die Flexibilität und die Verfügbarkeit im Wesentlichen von der gewählten Gerätedisposition ab. Durch den Einsatz von Kompaktgeräten (d.h. Kolbenpumpe, Betonförderleitung und Spritzbetonmanipulator sind auf einem radgebundenen, fahrbaren Trägergerät montiert) ist eine ausreichende Flexibilität und eine gute Verfügbarkeit von Spritzbeton im „Normalbetrieb“ gewährleistet.

Es ergeben sich für die Verfahren NSDI-F und NSDI-E für die Beurteilungskriterien Flexibilität und Verfügbarkeit die Zielerträge der Tabelle 17 und Tabelle 18:

- Im „Normalbetrieb“ (d.h. gute Vortriebsbedingungen und große Spritzbetonkubaturen) werden eine ausreichende Flexibilität und eine gute Verfügbarkeit von Spritzbeton

erzielt. Treten allerdings plötzliche Änderungen des Gebirgsverhaltens oder starke Bergwasserzutritte auf, die eine Änderung der Ausbruchsart (z.B. Öffnen der Ortsbrust in zahlreichen kleinen Teilflächen gegenüber einem ausgeschriebenen Vollausbuch der Kalotte) erfordern, lassen sich die erforderlichen Spritzbetonkubaturen und der Zeitpunkt des Spritzbetoneinbaus vorab nur schwer abschätzen.

- Der Zeitbedarf für die Betonbestellung und der Antransport des Fertigmischgutes mit Fahrmischern wirken sich insbesondere bei kleinflächigen Teilausbrüchen nachteilig gegenüber den anderen Spritzbetonsystemen aus.
- Der große Zeitvorlauf der Betonbestellung bei einem externen Mischwerk (NSDI-F) wirkt sich gegenüber einer baustelleneigenen Mischanlage (NSDI-E) im „Notfall“ ebenfalls nachteilig auf die Verfügbarkeit des Spritzbetons aus.
- Das Verarbeiten und Aufbringen von kleinen Spritzbetonmengen ist durch die Zugabe eines entsprechenden Verzögerers zum Mischgut möglich. Allerdings muss die Kolbenpumpe nach jedem Spritzvorgang leergefahren werden und damit können insbesondere bei der kleinflächigen Sicherung von Vortriebsorten erhebliche Restmengen an Spritzbeton entstehen, wobei sich zusätzlich auch die Kosten durch den Einsatz chemischer Mittel erhöhen [72].
- Beim Einsatz von mobilen Kompaktgeräten können mehrere Vortriebsorte bearbeitet werden.
- Durch den hohen Gerätebedarf (Spritzbetonmobil + Fahrmischer) an der Ortsbrust können bei kleinflächigen Teilausbrüchen Behinderungen der Vortriebsarbeiten auftreten, erhöhte Rüst- und Gerätewechselzeiten sind die Folge.
- Der Einsatz eines Manipulators hängt im Wesentlichen von der Tunnelgeometrie ab, d.h. bei räumlicher Enge stellt der hohe Platzbedarf von Fahrmischer, Kompaktgerät und angebautem Manipulator vor Ort einen Nachteil gegenüber anderen Spritzbetonsystemen dar.

IV.3.4.5 NSDU-F und NSDU-E

Es gelten sinngemäß die im Punkt IV.3.4.4 getroffenen Aussagen für das Nassspritzverfahren im Dichtstrom. Aufgrund der niedrigen Förderleistungen beim Nassspritzverfahren im Dünnstrom lassen sich aber folgende Verbesserungen erzielen:

- Eine Umstellung von NSDU-F bzw. NSDU-E auf FMS ist rasch möglich und ermöglicht unter diesem Gesichtspunkt einen flexiblen Einsatz unterschiedlicher Systeme und eine hohe Verfügbarkeit von Spritzbeton auch bei schwierigen geologischen Verhältnissen.
- Durch die Förderung des Fertigmischgutes im Dünnstrom und die geringeren Förderleistungen gegenüber der Dichtstromförderung ist auch ein manueller Spritzbetonauftrag und damit auch ein Einsatz in beengten Platzverhältnissen möglich.

IV.3.5 Förderung, Förderleitung und Förderleistung

Wesentliche Beurteilungskriterien für den Beurteilungsaspekt „Baubetrieb“ eines Spritzbetonsystems stellen die Art der Förderung, die maximal mögliche Länge der Förderleitung von der Spritzbetonmaschine bzw. Kolbenpumpe bis zur Spritzdüse und die erzielbare Förderleistung eines Systems dar. Ein Anforderungsprofil an das Fördersystem lässt sich nach [74] wie folgt erstellen:

- Eine staubfreie, kontinuierliche Förderung des Mischgutes bis zur Spritzdüse muss gewährleistet sein.
- Das Spritzbetonfördersystem muss wartungs- und verschleißarm sein.
- Das Fördersystem muss für die Vortriebsmannschaft einfach handhabbar sein.
- Um einen konstanten Massestrom der Feststoffe (Gesteinskörnung, Zement) zu erhalten, muss die Beschickung der Spritzbetonmaschine bzw. Kolbenpumpe an die jeweilige Förderleistung angepasst werden.

IV.3.5.1 TM-F und TM-E

Bei den Spritzbetonsystemen TM-F und TM-E erfolgt die Förderung des ofentrockenen Mischgutes im Dünnstrom. Dabei können sowohl Rotorspritzmaschinen als auch sogenannte Dosierblasschnecken (s. Abbildung 41) eingesetzt werden. Dosierblasschnecken bestehen aus einer Schneckenwendel in einem Rohrgehäuse mit einem Elektroantrieb und einem stufenlos verstellbaren Getriebe.

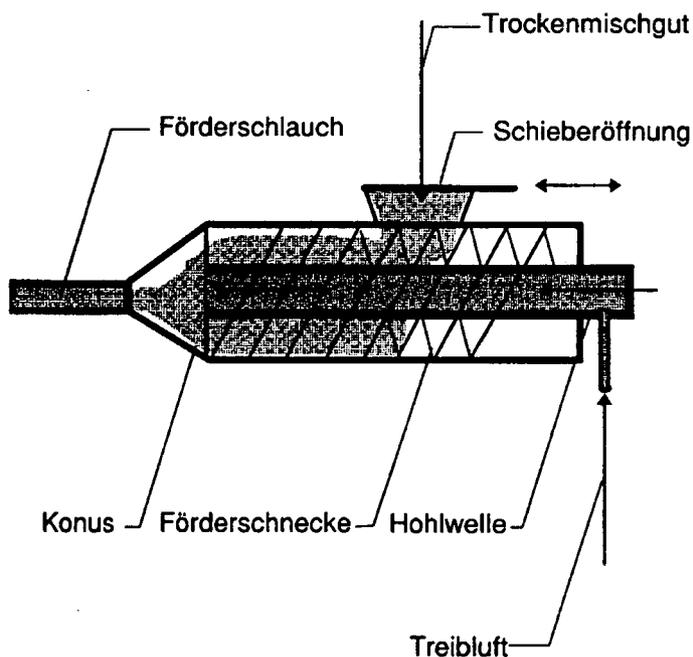


Abbildung 41: Prinzipskizze einer Dosierblasschnecke [43]

Die Dosierblasschnecke zieht dabei aus einer mit einem Druckschieber verschließbaren Öffnung im Boden des Druckkessels (ca. 4 bar Überdruck) des TM-Mobiles das Trockenmischgut ab (s. Abbildung 13 und Abbildung 41). Am vorderen Ende des Schneckengehäuses sitzt der Konus, der sich auf den gewünschten Schlauchdurchmesser verjüngt (meist wird ein Schlauchdurchmesser von 65 mm verwendet). Direkt an den Konus ist der Schlauch mit einer Schnellkupplung angeschlossen. Die Schneckenwendel sitzt auf einer Hohlwelle, durch welche die Treibluft zur Förderung des Spritzgutes gelangt. [43]

Am Ende der Wendel drückt die Treibluft (bei einem Förderdruck von ca. 4,5 bar) das Spritzgut über den Konus in den Schlauch, damit ist eine kontinuierliche Förderung des Mischgutes gewährleistet. Durch die Staubabkapselung der Dosierblasschnecke wird eine staubfreie Förderung des ofentrockenen Mischgutes bis zur Spritzdüse erreicht. Die Förderleistung der Dosierblasschnecke ist abhängig von der Druckdifferenz zwischen Druckkessel und Treibluft, vom Körnungsaufbau und der Zusammensetzung des zu fördernden Materials, vom Querschnitt der Förderleitung, von der Förderweite und von der Verlegung und Art der Förderleitung (Rohr- oder Schlauchleitung) sowie von der Drehzahl der Förderschnecke.

Hinsichtlich der Förderung, Förderleitung und Förderleistung ergeben sich für die Systeme TM-F und TM-E die nachfolgenden Zielerträge (s. Tabelle 17):

- Die kontinuierliche (d.h. pulsationsfreie) Förderung des ofentrockenen Mischgutes erfolgt im Dünnstrom über eine Dosierblasschnecke. Durch die Staubabkapselung der Dosierblasschnecke ist Staubfreiheit bis zur Spritzdüse gewährleistet.
- Förderleitungslängen von max. 300 m Länge sind theoretisch möglich, allerdings treten ab einer Leitungslänge von mehr als 150 m eine deutliche Reduktion der Förderleistung und eine Erhöhung des Rückpralls und der Staubentwicklung ein.
- Die Geschwindigkeit des ofentrockenen Mischgutes in der Förderleitung beträgt ca. 20 – 40 m/sec und führt zu erhöhtem Verschleiß an Rohren und Schläuchen.
- Durch den Einsatz von mobilen Spritzgeräten („TM-Mobile“) und die Positionierung der Geräte beim Spritzbetonauftrag direkt an der Ortsbrust wird die Spritzschlauchlänge auf maximal 30 m minimiert. Damit wird nicht nur die Gefahr von „Stopfern“ in den Rohr- bzw. Schlauchleitungen herabgesetzt, sondern auch der erforderliche Druckluftbedarf der Dosierblasschnecke minimiert.
- Mit diesem Verfahren sind Förderleistungen von ca. 5,5 – 8,0 m³-Spritzbeton je Stunde und Spritzdüse erzielbar.

IV.3.5.2 FMS-F und FMS-E

Beim Trockenspritzverfahren mit Feuchtmischgut erfolgt die Förderung des Mischgutes mit Rotorspritzmaschinen im Dünnstromverfahren (s. Abbildung 17). Entsprechend der Tabelle 17 können für die Systeme FMS-F und FMS-E folgende Zielerträge formuliert werden:

- Mit FMS-F und FMS-E können Förderleistungen von ca. 5,5 bis 9,0 m³-Spritzbeton je Stunde und Düse erzielt werden. Beispielsweise konnten beim Zammer Tunnel [102] Spritzleistungen von 5,5 bis 9,3 m³-Spritzbeton je Stunde und Düse erzielt werden, wobei sich ein Mittelwert der Förderleistung von 6,7 m³/h ergab.
- Die Förderung mit Rotorspritzmaschinen bedingt eine leichte Pulsation im Förderstrom. Diese Pulsation kann zu einer mangelhaften Durchmischung von Mischgut und Wasser an der Düse und damit zu erheblicher Staub- und Rückprallentwicklung führen. [74]
- Förderleitungslängen von 300 m Länge sind möglich [67].
- Die vollautomatischen Dosier- und Mischanlagen (zwei- oder dreibahnige mobile Mischanlagen) werden ca. 50 m hinter der Ortsbrust aufgestellt, um die Länge der Spritzleitung zu verkürzen. Durch die kurzen Leitungslängen werden einerseits eine gute Kapazitätsauslastung und andererseits eine Minderung der Stopfergefahr erzielt.
- Die Geschwindigkeit des erdfeuchten Mischgutes in der Förderleitung beträt ca. 20 bis 40 m/sec, führt allerdings – aufgrund der Eigenfeuchte der Zuschläge - zu einem geringeren Verschleiß an Rohren und Schläuchen als beim Verfahren mit ofentrockenem Mischgut.

IV.3.5.3 NSDI-F und NSDI-E

Die Systeme NSDI-F und NSDI-E zeichnen sich gegenüber allen anderen Spritzbetonverfahren durch sehr hohe Förderleistungen aus. Die Förderung des Fertigmischgutes erfolgt im Dichtstrom mit Kolbenpumpen mit schnell durchschaltenden Rohrweichen (s. Abbildung 26). Es können vom Maschinisten mittels Fernbedienung stufenlos Fördermengen von „Null“ bis zu einem Maximum von ca. 30 m³ pro Stunde und Düse erreicht werden.

Die Zielerträge lassen sich für dieses Verfahren wie folgt darstellen (s. Tabelle 17):

- Die Fördergeschwindigkeiten des Mischgutes in den Förderleitungen liegen bei ca. 30 % des Trockenspritzverfahrens, d.h. sie liegen bei ca. 6 bis 14 m/sec [72]. Diese geringen Fördergeschwindigkeiten bedingen einen deutlich geringeren Verschleiß an den Schlauch- und Förderleitungen als beim Trockenspritzverfahren. Allerdings sind beim Nassspritzverfahren längere Schlauchleitungen erforderlich.
- Durch den Einsatz leistungsfähiger Betonpumpen und den erforderlichen Spritzbetonauftrag mit Manipulatoren (auf Grund der hohen Förderleistungen ist eine

manuelle Steuerung der Spritzdüse durch den Düsenführer nicht mehr möglich) sind höhere Spritzleistungen als beim Trockenspritzverfahren möglich. Bei optimalen Einsatzbedingungen in Großquerschnitten sind bei durchschnittlichen Spritzbetonschichtdicken von 10 cm im Regelfall Einbauleistungen von ca. 20 m³/h möglich [80].

- Die anzustrebende Spritzbetonleistung über Kopf liegt beim Nassspritzen im Dichtstromverfahren bei ca. 12 bis 15 m³ Spritzbeton pro Stunde und Düse. Jede höhere Einbauleistung würde in diesem Fall nur zu einer minderen Betonqualität führen. Spritzschatten, mangelhafte Verfüllung von Hohlräumen, Profiligenauigkeiten und erhöhte Rückprallwerte wären die Folge.
- Die Förderleitungslänge ist beim System NSDI mit 100 m begrenzt.

IV.3.5.4 NSDU-F und NSDU-E

Das Nassspritzverfahren im Dünnstrom wurde erstmalig in Österreich beim Erkundungsstollen Fiecht (Tirol) eingesetzt. Die Förderung des Fertigmischgutes erfolgt mit Rotorspritzmaschinen im Dünnstromverfahren.

Gegenüber der Dichtstromförderung mit Kolbenpumpen weist das Dünnstromverfahren mit Rotorspritzmaschinen folgende Vorteile aus [59]:

- Es besteht eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Konsistenzschwankungen des Fertigmischgutes.
- Es entfallen Betonrestmengen bei der Entleerung der Spritzmaschine und
- Rotorspritzmaschinen sind leichter zu reinigen als Kolbenpumpen.

Die Zielerträge für Förderung, Förderleitung und Förderleistung für die Verfahren NSDU-F und NSDU-E lauten somit (s. Tabelle 17):

- Die leicht pulsierende Förderung des Fertigmischgutes erfolgt im Dünnstrom mit adaptierten Rotorspritzmaschinen.
- Es sind Förderleistungen von 10 bis 15 m³ Spritzbeton pro Stunde und Düse erreichbar.
- Die Fördergeschwindigkeiten des Mischgutes in den Förderleitungen liegen aufgrund der Verwendung von Rotorspritzmaschinen im Bereich der Trockenspritzverfahren, allerdings ergibt sich durch die Nassförderung ein geringerer Verschleiß an den Schlauch- und Förderleitungen als beim Trockenspritzverfahren.
- Die Förderleitungslänge ist beim NSDU mit ca. 80 m begrenzt.

IV.3.6 Gerätedisposition

IV.3.6.1 Allgemeines

Einen wesentlichen baubetrieblichen Einfluss übt die unterschiedliche Gerätedisposition der analysierten Spritzbetonsysteme aus. In den Punkten IV.3.6.2 bis IV.3.6.5 werden für die einzelnen Verfahren beispielhafte Gerätezusammenstellungen für die Musterkalkulation (s. Pkt. V) herausgearbeitet und in der Tabelle 17 als Zielerträge dargestellt. Es werden in diesem Abschnitt allerdings nur „reine“ Vortriebsgeräte - jene Geräte, die unmittelbar beim Spritzbetoneinbau vor Ort eingesetzt werden - analysiert. Die Baustelleneinrichtung der Spritzbetonsysteme (z.B. Errichtung von Silos für die Lagerung von Mischgut, Entscheidung über eine eigene oder externe Mischanlage) wird im Abschnitt IV.4 behandelt und ist nicht Gegenstand der baubetrieblichen Analyse der Vortriebsgeräte.

IV.3.6.2 TM-E und TM-F

Beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut werden für den Transport des ofentrockenen Mischgutes vom Vorratssilo bis zum Einbauort und den Spritzbetonauftrag in der Regel straßentaugliche, allradgetriebene Trägerfahrzeuge – sogenannte „TM-Mobile“ – mit zwei aufgebauten Druckbehältern (Fassungsvermögen je Behälter ca. 10 m³) eingesetzt. Bereits in den TM-Mobile integriert sind eine Dosierblasschnecke je Druckbehälter und ein komplettes Luft-, Strom- und Wasserverteilungssystem.

Die Druckbehälter müssen hinsichtlich ihrer Größe so dimensioniert sein, dass für einen kompletten Abschlag genügend Mischgut zur Verfügung steht, da ein Nachfüllen während des Spritzvorgangs nicht möglich ist. Die Befüllung der Druckkessel erfolgt über ein in der Nähe des Tunnelportals aufgestelltes Silo (Transportwege müssen so gering wie möglich gehalten werden), welches mit einer staubfreien Verladeeinrichtung versehen ist. Der Füllvorgang des TM-Mobiles dauert ca. 10 min (s. [145]), danach wird der TM-Mobile direkt zum Einbauort gefahren, wo unmittelbar vor dem eigentlichen Spritzbetonauftrag die mit ofentrockenem Mischgut gefüllten Druckbehälter mit Druckluft beaufschlagt (max. 6 bar) werden. Wenn der erforderliche Druck erreicht ist, werden vom Geräteführer die Dosierblasschnecken eingeschaltet und anschließend der Materialschieber geöffnet.

Die Materialfördermenge kann dabei vom Maschinisten durch ein verstellbares Getriebe stufenlos reguliert werden, der gewünschte Förderdruck kann mittels Handschieber eingestellt werden. Die Luftregulierung für die Druckluftbeaufschlagung des Kessels erfolgt automatisch. Zu beachten ist bei diesem System, dass die Förderung des ofentrockenen Mischgutes mit relativ trockener Druckluft erfolgen muss, um chemische Vorreaktionen des ofentrockenen Mischguts mit feuchter Treibluft möglichst zu vermeiden.

Für die Verfahren TM-F und TM-E lassen sich die Zielerträge „Gerätedisposition“ wie folgt darstellen (s. Tabelle 17 - vgl. [81]):

- Gerätedisposition im Vortrieb: Es kommen in der Regel im Vortrieb nur allradgetriebene „TM-Mobile“ mit aufgebauten Druckkesseln und integrierten Dosierblasschnecken zum Einsatz. Neben den TM-Mobilen wird noch ein Schraubenkompressor zur Druckluftherzeugung benötigt. Das Verfahren zeichnet sich gegenüber allen anderen Spritzbetonsystemen durch einen „sehr sparsamen“ Geräteeinsatz aus.
- Durch die hohe Mobilität der Fahrzeuge und den zentralen Strom-, Luft- und Wasseranschluss am TM-Mobile werden Rüstzeiten von weniger als 15 Minuten erreicht.
- Durch die Positionierung der TM-Mobile unmittelbar beim Einbauort können Spritzschlauchlängen und Verschleißteile erheblich reduziert werden.
- Das System zeichnet sich durch eine einfache und wartungsarme Handhabung aus.
- Durch das „geschlossene“ System vom Einblasen des Mischgutes in den Silo, über die Befüllung der TM-Mobile bis zum Austritt des Spritzbetons an der Spritzdüse wird die Staubentwicklung deutlich reduziert und das Trockenmischgut wird vor Feuchtigkeit geschützt.
- Der Wartungsaufwand und der Verschleiß dieses Systems ist gering, da am Ende des Spritzvorganges die Dosierblasschnecke leer gefahren und nur einmal in der Woche der Konus der Dosierblasschnecke weggeschwenkt wird, um eventuelle Materialverkrustungen zu entfernen. Täglich muss eine Schmierung vorgenommen werden [72].
- Beim Sonderfall sehr kurzer Vortriebe – d.h. bei Vortriebslängen von weniger als 400 m - kann unter Umständen auf den Einsatz von TM-Mobilen verzichtet werden und die Förderung des ofentrockenen Mischgutes direkt vom unter Druck stehenden Vorratssilo über eine Dosierblasschnecke und entsprechende Rohrleitung bis zur Spritzdüse erfolgen. Diese Vorgangsweise wurde beispielsweise am Ebelsbergtunnel in Linz gewählt [72].

IV.3.6.3 FMS-F und FMS-E

Die Gerätedisposition beim Trockenspritzverfahren mit Feuchtmischgut unterscheidet sich gegenüber den anderen Verfahren durch einen erhöhten Platzbedarf im Tunnel (aufgrund der geometrischen Abmessungen der mobilen Mischanlagen ist dieses Verfahren bei einem Ulmenstollenvortrieb nicht einsetzbar – s. IV.3.1.3).

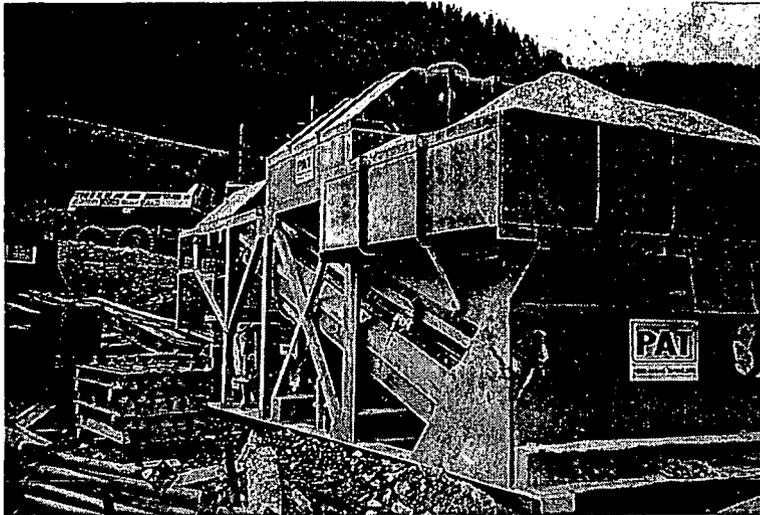


Abbildung 42: Spritzanlage – Zweibahniger Mobile Mischanlage – Tunnelbaustelle Spital/Semmering [72]

Die Zielerträge für die Systeme FMS-F und FMS-E ergeben sich in der zugehörigen Matrix (s. Tabelle 17) wie folgt:

- Die mobile Mischanlage besteht aus folgenden Komponenten:
 - ↓ Der Vorratssilo für die Gesteinskörnung hat einen Inhalt von ca. 24 m³ und wird kontinuierlich während der Spritzbetonpausen mittels Radlader beschickt. Dazu kann jener Radlader verwendet werden, der im Tunnel auch zum Schüttern des Ausbruchmaterials eingesetzt wird.
 - ↓ Der Vorratssilo für das Spritzbetonbindemittel hat einen Inhalt von ca. 17 m³ und wird mit speziellen Silofahrzeugen (s. Abbildung 43) beschickt. Das Bindemittel wird in Silos in der Nähe des Tunnelportals gelagert, bei Bedarf an baustelleneigene Silowagen übergeben, zur mobilen Mischanlage verführt und dort vom Silowagen in den entsprechenden Bindemittelvorratssilo umgeblasen. Der Silowagen kann gleichzeitig als Zwischenlager für das Spritzbetonbindemittel verwendet werden.



Abbildung 43: Silowagen nach dem Befüllen – Tunnel Spital am Semmering [72]

- ⚡ Die Dosierung von Gesteinskörnung und Bindemittel erfolgt durch in die Abzugsförderbänder integrierte Wiegebänder (Details s. IV.3.2.3). Gesteinskörnung und Bindemittel werden in der entsprechenden Dosierung in einem Durchlaufmischer nach dem Gegenstromprinzip gemischt, das Mischgut wird anschließend mit Hilfe von Rotorspritzmaschinen über Rohr- und Schlauchleitungen zur Spritzdüse transportiert. Entsprechend der Anzahl der Rotorspritzmaschinen werden ein-, zwei- oder dreibahnige Spritzbetonanlagen unterschieden. Die Anzahl der erforderlichen Bahnen kann entsprechend den Randbedingungen des Tunnelvortriebes variiert werden.
 - ⚡ Die Druckluft für die Rotorspritzmaschinen wird von Kompressoren erzeugt.
- Beim Einsatz von dreibahnigen mobilen Mischanlagen können mehrere Vortriebsorte gleichzeitig bearbeitet werden, d.h. es kann z.B. mit zwei Spritzmaschinen (= Bahnen) die Kalotte und mit der dritten Bahn die Strosse mit Spritzbeton versorgt werden. [79]
 - Der Vorteil von mehrbahnigen Anlagen liegt darin, dass bei einem etwaigem Ausfall einer Spritzmaschine oder bei Stopferbildung durch einfaches Umschließen von Rohrleitungen und Schläuchen Wartezeiten gänzlich vermieden bzw. verringert werden können. Dadurch ist eine hohe Ausfalls- und Versorgungssicherheit gewährleistet.

IV.3.6.4 NSDI-F und NSDI-E

Für den Spritzbetonauftrag im Nassspritzverfahren im Dichtstrom werden zumeist Spritzmobile (s. Abbildung 44) eingesetzt.



Abbildung 44: Spritzmobil [Fotoarchiv Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft an der TU - Wien]

Darunter werden radgebundene, straßentaugliche Fahrzeuge mit Allradlenkung und Allradantrieb, einer leistungsfähigen Betonpumpe (in der Regel Doppelkolbenpumpen), robusten Manipulatoren mit Reichhöhen bis 14 m und sämtlichen Dosier- und Überwachungseinrichtungen verstanden. Bei einer zusätzlichen Ausrüstung mit Kompressoren kann eine nahezu völlig unabhängige Spritzbetonlogistik erreicht werden. [93]

Es ergeben sich entsprechend der Tabelle 17 folgende Zielerträge für die Systeme NSDI-F und NSDI-E:

- Die Doppelkolbenpumpen zur Dichtstromförderung decken folgendes Leistungsspektrum ab [47]:
 - ↓ Förderleistungen: 2 – 20 m³/h
 - ↓ Förderschlauch: 50/65/100 mm
 - ↓ Luftmenge: 4 – 12 m³/min
 - ↓ Luftbedarf: 6 -7 bar
- Spritzmobile lassen sich in kürzester Zeit in eine günstige Position vor Ort fahren und machen zwischen den periodischen Einsätzen ebenso schnell wieder Platz für Abbau- und Schuttergeräte. [79]
- Der Antransport und die Zwischenlagerung des Mischgutes erfolgen mit eigenen (NSDI-E) oder fremden (NSDI-F) Betonnachmischfahrzeugen mit Trommelinhalten von ca. 6 bis 9 m³. Die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge hängt dabei im Wesentlichen von
 - ↓ der Entfernung der Mischanlage zum Einbauort des Spritzbetons,
 - ↓ vom Fahrbahnzustand im Tunnel (der Fahrbahnzustand bestimmt die Fahrtgeschwindigkeit und damit wesentlich die Umlaufzeit eines Fahrmischers) und
 - ↓ der Möglichkeit der Zwischenlagerung von Mischgut für Teilquerschnitte und den Notfall ab.
- Mögliche Transporteinschränkungen (Nacht- bzw. Wochenendfahrverbote) sind insbesondere bei der Fremdversorgung mit Mischgut zu beachten.
- Die Anwendung von Spritzmanipulatoren ermöglicht hohe Durchsatz- und Förderleistungen bis zu 20 (bei manueller Düsenführung sind die Spritzleistungen aufgrund des „Rückstosses“ mit ca. 8 m³ pro Stunde begrenzt). Außerdem ist eine Erhöhung der Arbeitssicherheit, eine Verbesserung der Materialqualität und eine Rückprallverminderung durch die optimale Düsenführungstechnik zu erwarten.
- Die Zudosierung von flüssigen Erstarrungsbeschleunigern erfolgt mit Dosierpumpen synchron zum Hub der Kolbenpumpe

IV.3.6.5 NSDU-F und NSDU-E

Beim Nassspritzverfahren gelten die Aussagen des vorherigen Abschnittes (s. IV.3.6.4) mit folgenden Änderungen:

- Der Spritzbetonauftrag erfolgt mit Spritzmobilen, allerdings werden beim Dünnstromverfahren adaptierte Rotorspritzmaschinen zur Spritzbetonförderung eingesetzt. Die eingesetzten Spritzmaschinen decken folgendes Leistungsspektrum ab [47]:
 - ⬇ Förderleistungen: 4 – 9 m³/h
 - ⬇ Förderschlauch: 50/60 mm
 - ⬇ Luftmenge: 8 – 15 m³/min
 - ⬇ Luftbedarf: 4 -7 bar
- Mit dieser Gerätedisposition werden zwar nicht so hohe Förderleistungen wie beim Dichtstromverfahren erreicht, allerdings besteht auf Grund der niedrigen Durchsatzleistung beim Dünnstromverfahren im „Notfall“ auch die Möglichkeit einer manuellen Düsenführung.
- Die Zudosierung von flüssigen Erstarrungsbeschleunigern erfolgt mit Dosierpumpen.

IV.3.7 Nachbearbeitung der Spritzbetonschale (Ebenflächigkeit)

An die Ebenflächigkeit der Spritzbetonschale werden je nach Nutzung des Tunnelbauwerks unterschiedliche Anforderungen gestellt. Sollten beim ersten Spritzbetonauftrag diese Anforderungen an die Ebenflächigkeit nicht erfüllt werden, sind zusätzliche Arbeitsschritte (z.B. Aufbringen eines Isolierträgers) – sogenannte Nachbearbeitungsmaßnahmen - erforderlich.

Um den Arbeitsaufwand für diese Nachbearbeitungsmaßnahmen möglichst gering zu halten, sind folgende Grundsätze zu beachten (vgl. [43], [72], [123], [126]):

- Geringe Förderleistungen begünstigen eine ebenflächige Spritzbetonschichte. Spritzbetonfördermengen von 15 bis 20 m³/h sind eher für das Vorspritzen (Verfüllen von Ritzen und Löchern) oder für Schichtdicken größer als 20 cm geeignet.
- Die einzelnen Spritzbetonschichten sollten max. ca. 5 bis 15 cm dick sein, um eine entsprechende Ebenflächigkeit zu erzielen.
- Der optimale Düsenabstand zur Hohlraumoberfläche sollte eingehalten werden.
- Ungleichförmige Spritzbetonoberflächen bedingen eine aufwändige Nachbearbeitung.

Die Zieldarstellungen des Beurteilungskriteriums „Nachbearbeitung der Spritzbetonoberfläche“ lassen sich in tabellarischer Form (s. Tabelle 14 und vgl. Tabelle 17) wie folgt darstellen:

TM-F und TM-E, FMS-F und FMS-E, NSDU-F und NSDU-E	NSDI-F und NSDI-E
<p>Geringe Förderleistungen begünstigen einen gleichmäßigen Spritzbetonauftrag und eine gute Ebenflächigkeit der Spritzbetonoberfläche</p> <p style="text-align: center;">—</p> <p>Nachbearbeitung kaum erforderlich!</p>	<p>Probleme bei hohen Förderleistungen und großen Auftragsdicken mit der erzielbaren Ebenflächigkeit der Spritzbetonoberfläche</p> <p style="text-align: center;">—</p> <p>erhöhter Nachbearbeitungsbedarf (Isolierträger aufbringen!)</p>

Tabelle 14: Zieilerträge „Nachbearbeitung der Spritzbetonschale“

IV.3.8 Personaldisposition

IV.3.8.1 Allgemeines

Eine Vortriebsmannschaft in der Kalotte setzt sich in der Regel aus 6 bis 7 Mann zusammen. Auf Grund dieses sparsamen Personaleinsatzes und des großen wirtschaftlichen Druckes bei Tunnelprojekten (als Ergebnis von schlechten Marktpreisen und großem Zeitdruck) resultiert die Forderung nach einer universellen Einsatzbereitschaft der Vortriebsmannschaften, einer baupraktisch und theoretisch fundierten Ausbildung der Mineure und einer möglichst einfachen Bedien- und Handhabbarkeit der eingesetzten Vortriebsgeräte.

Hinsichtlich der Personaldisposition ergeben sich im Vortrieb zwei Phasen (vgl. auch [48]):

- Bei einzelnen Vortriebstätigkeiten – z.B. Bohren und Laden der Sprenglöcher, Schuttern des Ausbruchsmaterials und Stützmitteleinbau - ist in der Kalotte der gleichzeitige Einsatz der gesamten Mannschaft von 6 bis 7 Mann notwendig.
- Für den eigentlichen Spritzbetonauftrag sind allerdings – je nach verwendetem Spritzbetonsystem und je nach Anzahl der eingesetzten Spritzdüsen – lediglich 2 bis 4 Mineure erforderlich, d.h. für den produktiven Einsatz der „freien“ Mineure müssen für diesen Zeitraum leistungsbezogene Tätigkeiten gefunden werden.

Nach Lauffer [56] muss für eine Vergleichsrechnung der Verfahren allerdings die gesamte Vortriebsmannschaft auf den Spritzbeton umgelegt werden und zwar unabhängig davon, wie viele Mineure tatsächlich mit der Verarbeitung des Spritzbetons beschäftigt sind. Wird jedoch ein Teil der Mannschaft so produktiv eingesetzt, dass andere Arbeitsphasen vorbereitet werden, ergibt sich eine Beschleunigung der Vortriebsarbeiten, wodurch umgelegte Fixkosten bzw. zeitgebundene Baustellengemeinkosten gesenkt werden können.

Lauffer gibt die Anzahl der „freien“ Mineure für Nebentätigkeiten in einer Bandbreite von 2 Mineuren (beim Trockenspritzverfahren mit lagerfähigem Feuchtmischgut, automatisierter

Düsenführung und 2 Spritzdüsen) und 4 Mineuren (beim Nassspritzverfahren mit automatischer Düsenführung und einer Spritzdüse) an.

Diese Reduktion von Fixkosten bzw. zeitgebundenen Baustellengemeinkosten hängt von der Art der zu erbringenden Nebentätigkeit, von der Anzahl der „freien“ Mineure im Vortrieb und von der Organisation und Qualifikation der Mannschaft ab. In der Musterkalkulation wird von einem durchschnittlichen Personalstand in der Kalotte von 6 Mann ausgegangen bzw. werden die o.a. Festlegungen im Wirtschaftlichkeitsvergleich der Verfahren entsprechend berücksichtigt (s. Punkt V). Die entsprechenden baubetrieblichen Zielerträge werden in den Punkten IV.3.8.2 bis IV.3.8.5 erarbeitet und in der Tabelle 17 dargestellt.

IV.3.8.2 TM-F und TM-E

Für den Spritzbetonauftrag mit zwei Spritzdüsen (zwei Druckkessel + Dosierblasschnecken je eingesetztem TM-Mobile) sind bei diesen beiden Verfahren insgesamt 3 Mineure erforderlich. Dabei werden die Mineure wie folgt eingesetzt:

- Zwei Mineure sind als Düsenführer im Einsatz, wobei die Düsenführung manuell von einer Hebebühne aus oder mittels ferngesteuerter Spritzarme erfolgen kann.
- Ein Maschinist ist für die Bedienung und Wartung der TM-Mobile zuständig. Der Maschinist befüllt, fährt und reinigt das TM-Mobil (inkl. der Druckkessel und der Dosierblasschnecken).
- Drei Mineure stehen bei diesem Spritzbetonsystem somit für die Ausführung von Nebentätigkeiten zur Verfügung.
- Beim Verfahren TM-E ist zusätzlich noch ein Mann für die Bedienung und Wartung der baustelleneigenen Trocknungs- und Mischanlage zur Herstellung des ofentrockenen Mischgutes kalkulatativ zu berücksichtigen.

IV.3.8.3 FMS-F und FMS-E

Bei den Verfahren FMS-F und FMS-E ist für das Bedienen, das Befüllen, das Reinigen und die Wartung einer mehrbahnigen Anlage (in der Regel erfolgt die Spritzbetonversorgung der Kalotte mit zwei Bahnen) ein Mann durchgehend erforderlich. Für den Spritzbetonauftrag mit zwei Düsen sind vor Ort in der Regel drei Mann notwendig, damit ergibt sich folgende Personaldisposition:

- Zwei Mann sind als Düsenführer im Einsatz (manuelle oder ferngesteuerte Düsenführung) und
- ein Maschinist steuert und wartet die vollautomatische Dosier- und Mischanlage.
- In der Regel stehen damit bei diesem Spritzbetonsystem für die Ausführung von Nebentätigkeiten drei Mineure zur Verfügung, allerdings müssen für die Befüllung der

Vorratssilos an der mobilen Mischanlage zeitweilig ein Gerätefahrer für den Radlader (Vorratssilo für Gesteinskörnung) und ein Gerätefahrer für den Silowagen (Vorratssilo für Spritzbetonbindemittel) eingesetzt werden.

- Nachdem bei diesem Verfahren die Herstellung des Mischgutes unmittelbar vor Ort erfolgt und damit kein zusätzlicher Mann an einer baustelleneigenen Mischanlage kalkulatativ berücksichtigt werden muss, gibt es hinsichtlich der Personaldisposition keine Unterschiede zwischen den Verfahren FMS-F und FMS-E.

IV.3.8.4 NSDI-F und NSDI-E

Diese Verfahren stellen erhöhte Anforderungen an die Poliere und die vor Ort tätigen Mineure, da sich Fehlmengen von Beton und Verzögerungen bei der Betonzulieferung sehr kostenintensiv auswirken. Das Personal muss daher entsprechend qualifiziert sein und laufend geschult werden. Auf Grund der hohen erzielbaren Förderleistungen wird bei diesem Spritzbetonsystem ein Spritzmobil mit einem Spritzmanipulator und einer Spritzdüse eingesetzt.

Für die Bedienung des Systems ergibt sich somit folgende Personalzusammenstellung:

- Der Spritzbetonauftrag erfolgt mittels Spritzmanipulator und einer ferngesteuerten Spritzdüse durch einen Mineur.
- Ein weiterer Mineur ist für die Bedienung, Wartung und Reinigung der Doppelkolbenpumpe bzw. des gesamten Spritzmobiles erforderlich.
- Damit können beim Verfahren NSDI-F insgesamt 4 Mineure für Nebentätigkeiten eingesetzt werden. Die erforderliche Anzahl an Gerätefahrern für die Fahrmischer für den Antransport des Nassmischgutes von der Mischanlage zum Einbauort wird vom Subunternehmer beigestellt, d.h. die entsprechenden Lohnkosten der Fahrer sind bereits in den Materialkosten für den Transportbeton („Lieferung frei Baustelle“) inkludiert und müssen daher kalkulatativ nicht mehr berücksichtigt werden.
- Beim Verfahren NSDI-E müssen die Lohnkosten der Fahrer der Fahrmischer für einen Kostenvergleich der unterschiedlichen Systeme kalkulatativ berücksichtigt werden. Die Anzahl der erforderlichen Gerätefahrer für die Fahrmischer hängt dabei im Wesentlichen von den erforderlichen Spritzbetonkubaturen für einen Abschlag (Trommelinhalt je Mischer ca. 6 bis 9 m³), der Entfernung der Mischanlage vom tatsächlichen Einbauort und den entsprechenden Umlaufzeiten der Fahrmischer ab.
- Beim Verfahren NSDI-E ist ein zusätzlicher Mann für die Bedienung und Wartung der baustelleneigenen Mischanlage kalkulatativ zu berücksichtigen.

IV.3.8.5 NSDU-F und NSDU-E

Es gelten hinsichtlich der Personaldisposition für das Dünnstromverfahren sinngemäß die Zielerträge des Nassspritzverfahrens im Dichtstrom, d.h.:

- ein Mineur ist für die Düsenführung zuständig und
- ein weiterer Mineur bedient, wartet und reinigt die adaptierte Rotorspritzmaschine bzw. das gesamte Spritzmobil.
- Beim Verfahren NSDU-E ist ein zusätzlicher Mann für die Bedienung und Wartung der baustelleneigenen Mischanlage kalkulatorisch zu berücksichtigen.
- Hinsichtlich der Gerätefahrer für die Fahrmischer gelten die Aussagen des Punktes IV.3.8.4 analog.

IV.3.9 Reinigung und Wartung der Spritzbetongeräte

IV.3.9.1 Allgemeines

Eine zeitaufwändige Reinigung bzw. Wartung der eingesetzten Geräte nach dem Spritzbetonauftrag stellt gerade bei der oftmaligen Sicherung von Teilflächen mit geringen Spritzbetonkubaturen ein wichtiges baubetriebliches Beurteilungskriterium dar. Zeit- und lohnintensive Reinigungs- und Wartungsaufgaben wirken sich einerseits auf die Flexibilität und Verfügbarkeit und andererseits auf die Wirtschaftlichkeit der Verfahren erheblich aus.

IV.3.9.2 TM-F und TM-E

Die Zielerträge ergeben sich entsprechend Tabelle 18 wie folgt:

- Der Reinigungs- und Wartungsaufwand ist bei diesen Systemen sehr gering.
- Am Ende des Spritzvorganges muss lediglich die Dosierblasschnecke vom Maschinisten leergefahren werden.
- Einmal täglich muss eine Schmierung der Geräte vorgenommen werden.
- Einmal in der Woche wird der Konus an der Dosierblasschnecke weggeschwenkt, um eventuelle Materialverkrustungen zu entfernen [75].
- Verschmutzte, schlecht gewartete oder falsch abgestimmte Maschinen- und Zubehörkomponenten führen zu erhöhter Staubentwicklung und erhöhtem Verschleiß an Schläuchen und Düsen.

IV.3.9.3 FMS-F und FMS-E

Auch bei diesem Verfahren ist der Reinigungs- und Wartungsaufwand als gering einzustufen:

- Nach dem Ende des Spritzvorganges wird die Rotorspritzmaschine leergefahren. Eine oberflächliche Reinigung und Wartung der mobilen Mischanlage kann durch den

verantwortlichen Maschinisten somit bereits während des Abschlagszyklus durchgeführt werden.

- Für eine genaue Reinigung und Wartung wird in regelmäßigen zeitlichen Abständen ein Service der gesamten Anlage von der Produktionsfirma durchgeführt.
- Um die Staubentwicklung an der Rotorspritzmaschine zu minimieren, ist insbesondere der ordnungsgemäße Zustand der Reib- bzw. Dichtscheiben zwischen dem Rotor und dem Maschinengehäuse regelmäßig zu kontrollieren. Die Reibscheiben sind daher regelmäßig auszutauschen (s. Abbildung 17).
- In bestimmten zeitlichen Abständen müssen die Förderanlagen gesäubert, kontrolliert und nachgeeicht werden, da verschmutzte Förderbänder und Taschenräder zu Fehlern in der Zuteilgenauigkeit führen können. [40]

IV.3.9.4 NSDI-F und NSDI-E

Die Zielerträge hinsichtlich Reinigung und Wartung lassen sich für das Nassspritzverfahren im Dichtstrom entsprechend Tabelle 18 darstellen:

- Beim Verfahren NSDU-F und NSDU-E hat nach jedem Spritzvorgang eine Reinigung der Betonpumpe und des Spritzarmes innerhalb einer begrenzten Zeitspanne zu erfolgen. Die dabei anfallenden Lohnstunden können nach Lauffer [56] nur sehr beschränkt als Füllarbeit betrachtet werden und sind daher kalkulatativ in den Lohnkosten zu berücksichtigen.
- Der regelmäßige Reinigungsaufwand nach dem Spritzvorgang erfordert einerseits einen hohen Wasserbedarf und wirkt sich andererseits nachteilig bei oftmaligen, kleinflächigen Spritzbetonsicherungen aus. Durch geschickten wechselnden Einsatz der Spritzmobile lässt sich der Reinigungswand allerdings entsprechend reduzieren.
- Werden die Reinigungs- und Wartungsarbeiten mangelhaft durchgeführt, steigt die Gefahr von „Stopfern“ in den Rohrleitungen und führt damit zu sehr lohn- und zeitintensiven Unterbrechungen der Spritzbetonversorgung.
- Beim System NSDI-E ist die Reinigung der Fahrmischer durch den Gerätefahrer zusätzlich kalkulatativ zu berücksichtigen.

IV.3.9.5 NSDU-F und NSDU-E

Das Nassspritzverfahren im Dünnstrom zeichnet sich gegenüber dem Dichtstromverfahren durch einen geringeren Reinigungs- und Wartungsaufwand aus:

- Nach dem Spritzvorgang werden die Trommeln der Rotorspritzmaschine leergefahren, danach wird die Reinigung und Wartung der eingesetzten Geräte vom verantwortlichen Maschinisten durchgeführt.

- Eine regelmäßige Kontrolle und Wartung der Reibscheiben der Rotorspritzmaschine ist zur Reduzierung der Staubentwicklung analog dem Trockenspritzverfahren mit Feuchtmischgut (s. IV.3.9.3) durchzuführen.
- Beim System NSDU-E ist die Reinigung der Fahrmischer durch den Gerätefahrer zusätzlich kalkulatativ zu berücksichtigen.

IV.3.10 Restmengen

Restmengen an Mischgut nach dem Spritzbetonauftrag beeinflussen - insbesondere bei der Notwendigkeit von oftmaligen, kleinflächigen Sicherungen von Teilflächen mit geringen Spritzbetonkubaturen - die Auswahl eines Spritzbetonsystems wesentlich. Zur Vermeidung von Restmengen werden – insbesondere bei den Nassspritzverfahren - hohe Anforderungen an die Organisation der „Mischgutbestellung“ (hinsichtlich Menge und Zeitpunkt der Mischgutlieferung) durch den Polier bzw. Drittführer gestellt.

Eine baubetriebliche Analyse der Verfahren hinsichtlich der Restmengen an Mischgut ergibt folgende Ergebnisse (s. Tabelle 15 und Tabelle 18):

TM-F und TM-E, FMS-F und FMS-E	NSDI-F und NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E
<p style="text-align: center;">Keine Restmengenproblematik!</p> <p>Bei diesen Systemen verbleiben keine Restmengen an Mischgut beim Spritzbetonauftrag von Kleinstmengen.</p> <p>Der Spritzvorgang kann jederzeit beendet werden und die Mischgutbestellung stellt hinsichtlich Menge und Zeitpunkt kein Problem dar.</p>	<p style="text-align: center;">Hohe Restmengenproblematik!</p> <p>Beim Spritzbetonauftrag von Kleinstmengen und oftmaligen Spritzbetonpausen verbleiben Restmengen an Mischgut, die nur aufwändig (Einsatz von Nachmischern, Zugabe von chemischen Zusätzen) aufbereitet und wiederverwendet werden können.</p> <p>Spritzbetonpausen wirken sich problematisch auf die Bestellung von Fertigmischgut (Menge und Zeitpunkt) aus.</p>

Tabelle 15: *Zielerträge „Restmengen an Mischgut“*

IV.3.11 Rückprall

IV.3.11.1 Allgemeines

Nach [106] wird unter dem Begriff „**Rückprall**“ jener Anteil des Spritzgemisches (Mischgut und Zugabewasser) verstanden, der unmittelbar beim Aufbringen von der Auftragsfläche zurückprallt. Rückprall besteht zum überwiegenden Teil aus Gesteinskörnung, zum geringeren Teil aus Bindemittel und Anmachwasser. Im Gegensatz dazu wird mit „**Rückfall**“ jenes Gemisch aus Spritzbeton und Untergrund bezeichnet, das infolge mangelnder Abreißfestigkeiten des Untergrundes nicht haftet.

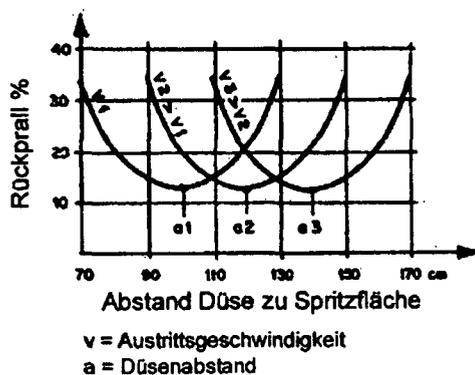
Es bestehen sowohl baustellenspezifische, verfahrenstechnische und betontechnologische **Einflüsse auf das Rückprallverhalten** bei der Anwendung unterschiedlicher Spritzbetonsysteme:

- *Baustellenspezifische Randbedingungen*
 - ✚ Art der Auftragsfläche (standfestes, nachbrüchiges oder druckhaftes Gebirge)
 - ✚ Neigung der Auftragsfläche zur Horizontalen
 - ✚ Spritzbetonschichtdicke
 - ✚ Art der einzuspritzenden Stützmittel (z.B. Baustahlgitter, Stahl- oder Gitterbögen)
 - ✚ Bergwasserandrang am Spritzbetoneinbauort (s. IV.2.5)
 - ✚ Geschicklichkeit des Düsenführers
- *Spritzbetonverfahrenstechnik (s. Abbildung 46)*
 - ✚ Förderverfahren (Dichtstrom, Dünnstrom)
 - ✚ Luftmenge
 - ✚ Aufprallgeschwindigkeit des Spritzbetons bzw. Düsenabstand zur Auftragsfläche (zu hoher Düsenabstand erfordert höheren Förderdruck und damit höheren Rückprall, zu niedriger Düsenabstand führt zu einer hohen Auftreffgeschwindigkeit des Spritzbetons an der Gesteinsoberfläche)
 - ✚ Winkel der Spritzdüse zur Auftragsfläche (optimal: rechtwinkelig zur Auftragsfläche)
 - ✚ Durchmischung des Mischgutes an der Spritzdüse (beim Trockenspritzverfahren)
- *Betontechnologie*
 - ✚ Mischgutzusammensetzung
 - ✚ Eigenfeuchte der Zuschläge
 - ✚ Wasser-Bindemittel-Wert des Mischgutes (durch Steigerung des Wassergehaltes verringert sich das Rückprallverhalten – z.B. bedeutet eine Steigerung des W/B-Wertes von 0,4 auf 0,5 eine Rückprallreduktion um bis zu 50 %, allerdings führt das auch zu einer gleichzeitigen Reduktion der Festigkeit bzw. Dichtigkeit um bis zu 20 %) [51]

- ⚡ Art und Dosierung der Zusatzmittel
- ⚡ Spritzbetonkonsistenz an der Auftragsfläche (für geringe Rückprallwerte ist ein plastisches Verhalten erforderlich, damit sich die Gesteinskörnungskörner gut in die „frische“ Spritzbetonschichte einbetten können)

In der Abbildung 45 wird der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Einflussparametern (Austrittsgeschwindigkeit an der Düse, Düsenabstand und Düsenneigung zur Spritzbetonoberfläche) und dem Rückprallverhalten grafisch dargestellt.

Zusammenhang zwischen Austrittsgeschwindigkeit, Düsenabstand und Rückprall



Zusammenhang zwischen Neigungswinkel der Spritzrichtung gegen die Auftragsfläche und Rückprall

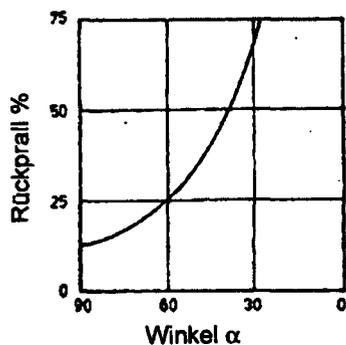


Abbildung 45: Einflüsse auf das Rückprallverhalten nach Lindner [46]

Bei der Erfassung des Rückprallanteils müssen zunächst zwei unabhängige Parameter ermittelt werden. Zum einen ist es erforderlich, die geförderte Menge an Spritzgemisch (Austrag aus der Düse) zu kennen, zum anderen muss die applizierte Spritzbetonmenge an der Auftragsfläche oder die Rückprallmenge am Boden erfasst werden. Der Rückprallfaktor ermittelt sich daher wie folgt [132]:

$$\text{Rückprall [\%]} = (100 / \text{Spritzleistung [kg/h]}) * \text{Rückprall [kg/h]}$$

Formel 4: Rechnerische Bestimmung des Rückprallfaktors

Der optimale Düsenabstand von der Auftragsfläche ist von der gewählten Spritzbetonverfahrenstechnik – aufgrund von unterschiedlichen Austrittsgeschwindigkeiten an der Düse - abhängig.

Er liegt beim Trockenspritzen zwischen 1,30 und 1,80 m und beim Nassspritzen zwischen 1,50 und 1,60 m (vgl. [47]).

Die Auswirkungen des Spritzwinkels zur Auftragsfläche sind qualitativ unabhängig von der gewählten Spritzbetonverfahrenstechnik (Trocken-/Nassspritzverfahren).

Der Rückprall hängt wesentlich vom Spritzwinkel zur Auftragsfläche ab und erreicht bei 90° ein Minimum.

Ein hoher Rückprallwert wirkt sich nicht nur unmittelbar auf die Materialkosten (durch den erhöhten Spritzbetonbedarf) aus, sondern bedeutet baubetrieblich eine Erhöhung des Zeitbedarfs für den Spritzbetonauftrag und führt damit zu einer Verlängerung des Zeitbedarfs für einen Abschlagszyklus. Damit sinkt die Vortriebsleistung und höhere zeitabhängige Kosten (z.B. zeitgebundene Baustellengemeinkosten, Energiekosten) sind die Folge. Durch eine Rückprallreduktion können somit folgende Verbesserungen erreicht werden (s. [58]):

- Geringere Herstellkosten durch den geringeren Materialbedarf und geringere Kosten für die Entsorgung des Rückpralls.
- Geringerer Rückprall bedeutet eine Erhöhung der Vortriebsleistungen (durch die Verminderung des Zeitbedarfs für den Spritzbetonauftrag) und führt damit zu Reduzierung der Bauzeit. Daraus resultiert zwangsläufig eine Kostenminimierung durch die Verringerung der zeitgebundenen Baustellengemeinkosten.
- Geringerer Rückprall bedeutet auch Einsparungen bei der Entsorgung von umweltbelastenden Schuttermengen.
- Es kommt zu einer Reduktion der Staubentwicklung am Spritzbetoneinbauort.
- Durch die Reduzierung des Rückpralls sinkt auch die Verletzungsgefahr der Vortriebsmannschaft.

Für die analysierten Spritzbetonsysteme ergeben sich auf der Grundlage der durchgeführten Literaturstudie folgende Richtwertbandbreiten der Rückprallfaktoren:

- Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut: 25 bis 45 %
- Trockenspritzverfahren mit erdfeuchtem Mischgut: 15 bis 30 %
- Nassspritzverfahren im Dichtstrom: 5 bis 20 %
- Nassspritzverfahren im Dünnstrom: 5 bis 15 %

In der Abbildung 46 sind diese Bandbreiten für die unterschiedlichen Systeme grafisch dargestellt, zusätzliche Erklärungen sind in den Punkten IV.3.11.2 bis IV.3.11.5 angeführt.

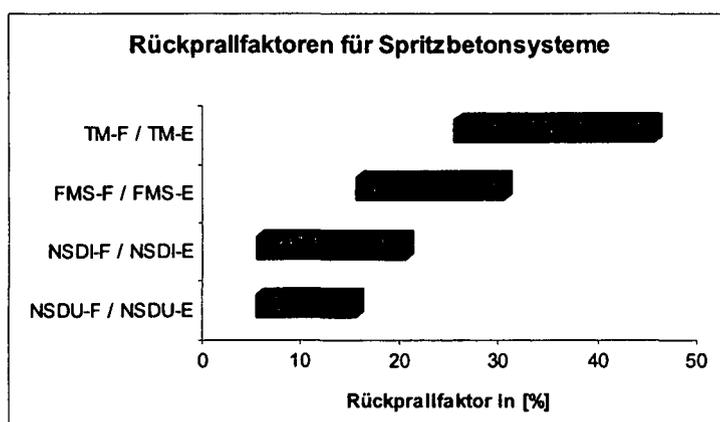


Abbildung 46: Regelbereiche der Rückprallfaktoren für die analysierten Spritzbetonsysteme

Die in der Abbildung 46 angeführten Regelbereiche können bei ungünstigen Verhältnissen beim Spritzbetonauftrag noch bedeutend überschritten bzw. durch die Zugabe von Rückprallminderern auch unterschritten werden.

IV.3.11.2 TM-F und TM-E

Bei den Verfahren TM-F und TM-E ist durch die Verwendung von ofentrockenen Zuschlägen die Höhe des anfallenden Rückpralls vom verwendeten Bindemittel (SBM-T oder SBM-FT) und von der Mischguttemperatur abhängig. Nach [108] ergibt sich in Abhängigkeit von der Temperatur des ofentrockenen Trockenmischgutes folgender Verlauf des Rückprallverhaltens (s. Abbildung 47):

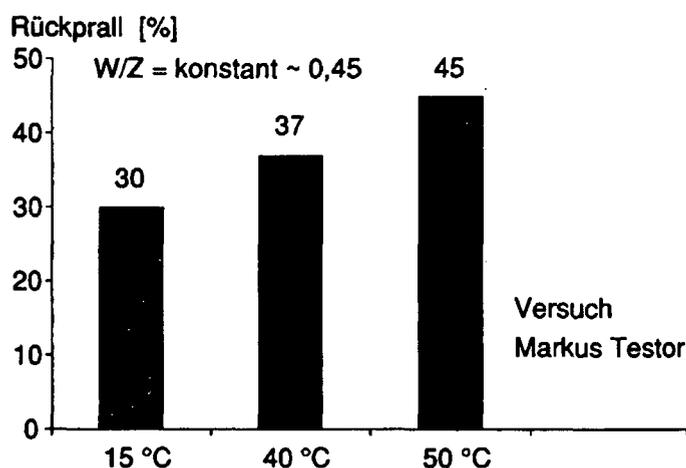


Abbildung 47: Abhängigkeit des Rückprallfaktors von der Mischguttemperatur [108]

Es zeigt sich damit (vgl. [52]):

- Sehr schnell reagierende Bindemittel (Erstarrungsbeginn < 20 sec) und hohe Mischguttrezepturen (bis zu 60 °C sind möglich) führen zu Rückprallwerten > 40 %.
- Durch geeignete Bindemittelwahl und Mischguttemperaturen (< 25 °C) kann eine Reduktion der Rückprallwerte auf ca. 30 % erreicht werden.

Die hohen Geschwindigkeiten beim Materialtransport in der Förderleitung (ca. 20 bis 40 m/sec) führen bei diesem Spritzbetonsystem zu hohen Rückprallfaktoren. Eine Reduktion des Rückprallfaktors (und der Staubbelastung) kann durch die Vorbenetzung des ofentrockenen Mischgutes ca. 2 bis 3 m vor der Hauptbenetzungsdüse erreicht werden (Details zur Vorbenetzungsdüse s. IV.3.12). Die Rückprallfaktoren bewegen sich bei den Systemen TM-F und TM-E innerhalb einer Bandbreite von 25 bis 45 % (vgl. [40], [43], [72], [100], [108], [116], [132], [136]). In [52] wird von einem durchschnittlichen Rückprallfaktor für die Verfahren TM-F und TM-E von 37 % ausgegangen.

IV.3.11.3 FMS-F und FMS-E

Bei den Trockenspritzverfahren FMS-F und FMS-E wird das Rückprallverhalten auch von der Eigenfeuchte der Zuschläge bestimmt.

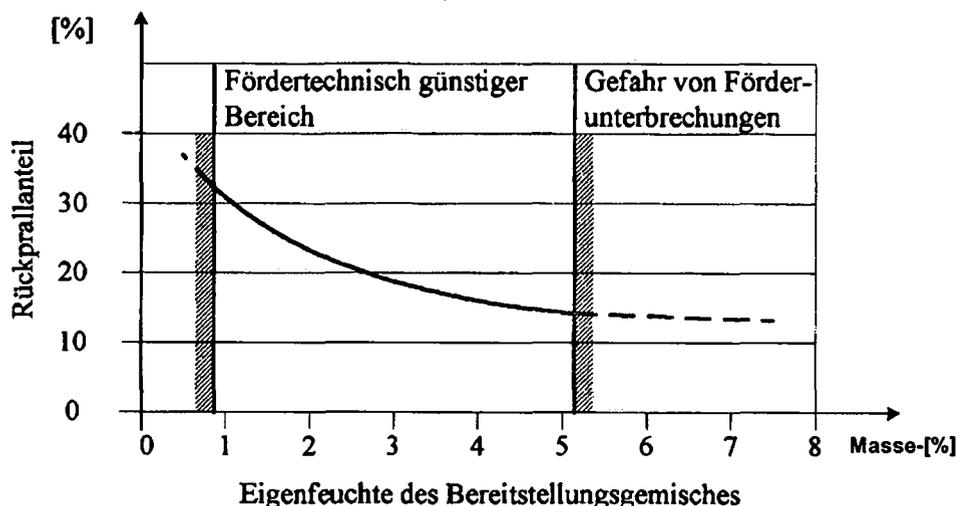


Abbildung 48: Einfluss der Eigenfeuchte der Zuschläge auf den Rückprallanteil beim System FMS [91]

Zur Begrenzung des Rückprallanteils wird daher (in Übereinstimmung mit den Forschungsergebnissen an der Ruhr-Universität Bochum [91]) in der Richtlinie für Spritzbeton [106] die Eigenfeuchte der Zuschläge mit 2,0 – 4,0 Masse-% begrenzt. Bei einer zu hohen Eigenfeuchte der Zuschläge würde die Gefahr des Abbindens des Mischgutes in der Spritzbetonleitung bzw. im Spritzbetonschlauch bestehen und Förderunterbrechungen („Stopfer“) wären die Folge.

Es ergeben sich **Rückprallfaktoren** für den Spritzbetonauftrag im Überkopfbereich in einer **Bandbreite von 15 – 30 %** (vgl. [40], [43], [72], [100], [108], [132]). In [52] wird von einem durchschnittlichen Rückprallfaktor für die Verfahren FMS-F und FMS-E von 22 % ausgegangen.

IV.3.11.4 NSDI-F und NSDI-E

Das Nassspritzverfahren im Dichtstrom zeichnet sich gegenüber allen anderen Systemen durch die niedrigsten Rückprallwerte aus, sofern keine Haftungsprobleme am Spritzbetonuntergrund aufgrund von Wasserdrang auftreten. In engem Zusammenhang mit dem Rückprall steht allerdings die zugehörige Förderleistung. Wird mit einer hohen Förderleistung von ca. 15 m³/h eine Schicht von lediglich 5 cm Dicke aufgetragen, ist der Rückprall meist doppelt so hoch wie beim Trockenspritzverfahren, weil große Spritzbetonmengen mit sehr hoher Aufprallgeschwindigkeit auf eine noch zu dünne Spritzschicht auftreffen und daher keine entsprechende „Einbettung“ in die noch weichen Spritzbetonschichten erfolgen kann (vgl. auch [72]).

Die Rückprallfaktoren reichen von 5 bis 20 % (vgl. [40], [43], [72], [80], [82], [93], [98], [108], [132], [133], [134], [136]). In [52] wird von einem durchschnittlichen Rückprallfaktor für die Verfahren NSDI-F und NSDI-E bei einer alkalifreien Erstarrungsbeschleunigung von 15 % ausgegangen.

IV.3.11.5 NSDU-F und NSDU-E

Beim Nassspritzverfahren im Dünnstrom ist der Rückprallfaktor ähnlich gering wie bei den Verfahren NSDI-F und NSDI-E. Nachdem dieses Verfahren aber erstmalig in Österreich am Erkundungsstollen Fiecht eingesetzt wurde, liegen für diese Systeme keine wissenschaftlich abgesicherten Werte für den Rückprallfaktor vor. Die baustellenspezifischen Werte hängen allerdings stark vom Untergrund (Fels- oder Lockermaterial), dem Bergwasserzudrang, dem Ort des Spritzbetonauftrages (Überkopf, Kämpfer, Ulme oder Sohle) und der Art und Anzahl der eingebauten Stützmittel ab.

Beim Erkundungsstollen Fiecht bewegt sich der Rückprallfaktor nach [59] innerhalb einer Bandbreite von 11 bis 15 %. Diese Werte stimmen auch mit den Literaturangaben (vgl. [47]) gut überein, dort wird von einer Bandbreite von 5 – 15 % ausgegangen.

IV.3.12 Spritzdüse, Benetzungstechnik und Düsenführung

IV.3.12.1 Allgemeines

Die Benetzungstechnik im unmittelbaren Düsenbereich (Hauptbenetzung) bzw. zusätzlich im Förderschlauch vor der Spritzdüse (Vorbenetzung) spielt für die Spritzbetonqualität, den Rückprall und die Staubentwicklung eine entscheidende Rolle. Für einen baubetrieblich und wirtschaftlich erfolgreichen Spritzbetonauftrag muss durch die Spritzdüse innerhalb weniger Meter (vom Düsenende bis zur Auftragsfläche) – insbesondere beim Trockenspritzverfahren - eine intensive Durchmischung des Mischgutes mit dem Zugabewasser und falls erforderlich mit einem Erstarrungsbeschleuniger erfolgen.

An die Spritzdüse werden folgende Anforderungen gestellt (vgl. [89]):

- geringe Anschaffungs- und Verschleißkosten
- optimale Benetzung
- minimale Staubentwicklung
- unproblematische Reinigung
- leichte Handhabung
- optimale Beimengung des EB
- gute Bündelung des Spritzstrahles

Die Spritzdüsen lassen sich hinsichtlich Aufbau und Formgebung in eine Gruppe für das Trockenspritzverfahren (TM-F, TM-E, FMS-F und FMS-E) und eine andere Gruppe für das Nassspritzverfahren (NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E) einteilen.

IV.3.12.2 Trockenspritzverfahren (TM-F, TM-E, FMS-F und FMS-E)

Nach [106] muss die Spritzdüse (Hauptbenetzungsdüse) so beschaffen sein, dass eine gute Vermischung von Mischgut, Wasser und bei Bedarf auch des Erstarrungsbeschleunigers und der Zusatzstoffe gewährleistet ist. Beim Trockenspritzverfahren können zur Reduzierung von Rückprall und Staub neben den Hauptbenetzungsdüsen zusätzlich im Förderschlauch „vorgeschaltete“ sogenannte Vorbenetzungsdüsen eingesetzt werden.

Hauptbenetzung

Die herkömmliche Düse besteht aus einem meist konisch zulaufenden Kunststoffrohr, dem ein Wasserring vorgeschaltet ist, mit dem das Anmachwasser dem Materialstrom turbulent zugeführt und hydrodynamisch mit dem Mischgut (ofentrocken oder erdfeucht) vermischt wird. Die Hauptbenetzungsdüse erfüllt dabei einerseits die Aufgabe des Mischkörpers (Anmachwasser + Mischgut) und andererseits wird durch die Spritzdüse der Spritzstrahl am Förderleitungsende kompakt und möglichst wirbelarm geformt.

Die Wasserzugabe mit je nach Verfahren unterschiedlichem Druck erfolgt bei den Düsen im Trockenspritzverfahren direkt am Anfang der Düse, damit haben die Feinpartikel im Gemisch Zeit, sich auf den letzten Metern der Flugförderung mit dem Anmachwasser zu binden. Je nach Eigenfeuchte des Gesteinskörnungs ist mehr oder weniger Anmachwasser an der Düse erforderlich. Wird z.B. eine Mischgutrezeptur mit hoher Eigenfeuchte verarbeitet, so ist wenig Wasser an der Düse erforderlich. Die richtige Wasserzugabe an der Düse obliegt dabei dem Können des Düsenführers und ist entscheidend für die Konsistenz und das Aussehen des aufgespritzten Materials. Nachdem die Wasserzufuhr also vom Düsenführer selbst reguliert wird, unterliegt der Wasser-Bindemittelwert des Spritzbetons gewissen Schwankungen, allerdings wird der W/B-Wert nach [47] in Abhängigkeit vom Mischgut und vom EB durch folgende Grenzen eingeschränkt:

- W/B-Wert $< 0,40$? das Mischgut ist zu trocken, es ist mit einer erhöhten Staub- und Rückprallentwicklung zu rechnen.
- W/B-Wert $> 0,55$? das Mischgut ist zu feucht, es kommt zu einem Abfließen des Spritzbetons von der Auftragsfläche.

Der prinzipielle Aufbau einer Hauptbenetzungsdüse im Trockenspritzverfahren und die verschieden möglichen Benetzungssysteme werden in der Abbildung 49 dargestellt.

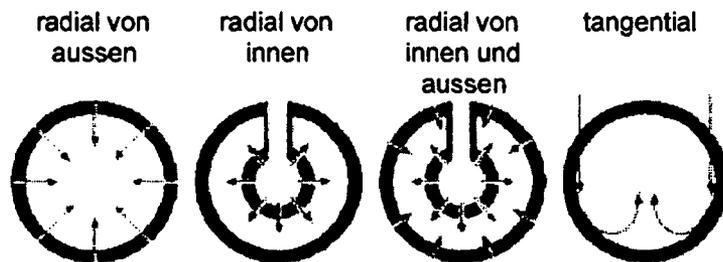
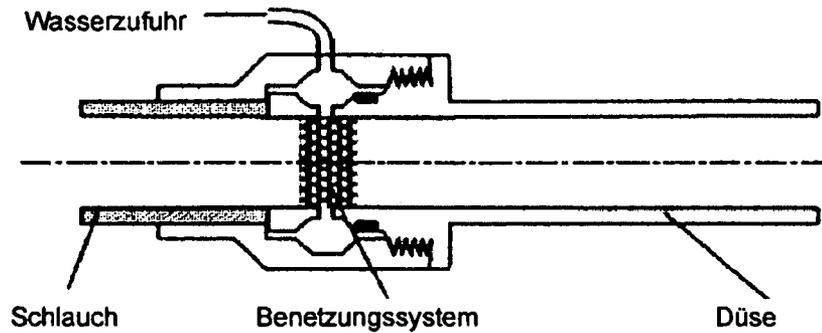


Abbildung 49: Prinzipielle Möglichkeiten für die Wasserführung im Aufbau einer Hauptbenetzungsdüse im Trockenspritzverfahren [47]

Hauptbenetzungsdüsen für das Trockenspritzverfahren ohne Vorbenetzung des Mischgutes setzen sich aus folgenden Komponenten zusammen (s. [41]):

- Stahl- oder Kunststoffrohr mit gleichbleibendem oder sich zum Ende hin verjüngendem Querschnitt und unterschiedlicher Länge.
- Gehäuse mit Wasserzufuhr und Reguliereinrichtung.
- Düsenringe mit unterschiedlicher Anzahl von Bohrungen, Bohrdurchmessern, die Zugaberichtung und Anordnung der Bohrungen erfolgt in verschiedenen Ebenen.
- Düsenringe mit Einkerbungen zur Wasserzugabe.
- Düsenkörper mit Einbauten von Störkörpern im Gehäuse und/oder Umlenkkörpern im Stahlrohr.

Vorbenetzung

Beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut besteht bereits beim Abzug des Trockenmischgutes aus dem Vorratssilo die Möglichkeit, bereits in der Förderschnecke das Trockenmischgut mit einem Wassersprühnebel zu beaufschlagen. Es besteht aber auch die Möglichkeit in Verbindung mit den Hauptbenetzungsdüsen das Spritzgut an der Aufgabeeinheit oder bereits wenige Meter vor der Hauptwasserzugabe vorzubefeuchten, um den Rückprallfaktor und die Staubentwicklung zu reduzieren (s. Abbildung 50).

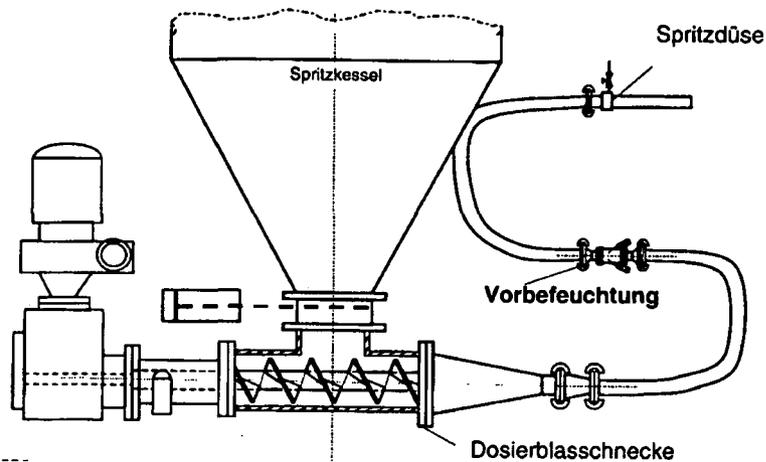


Abbildung 50: Prinzipskizze der Vorbenetzungstechnik beim Verfahren TM-F bzw. TM-E [142]

Es zeigt sich, dass der Rückprallanteil beim Trockenspritzverfahren ein Minimum bei einer Benetzungsstrecke von ca. 2,5 m erreicht (s. Abbildung 51).

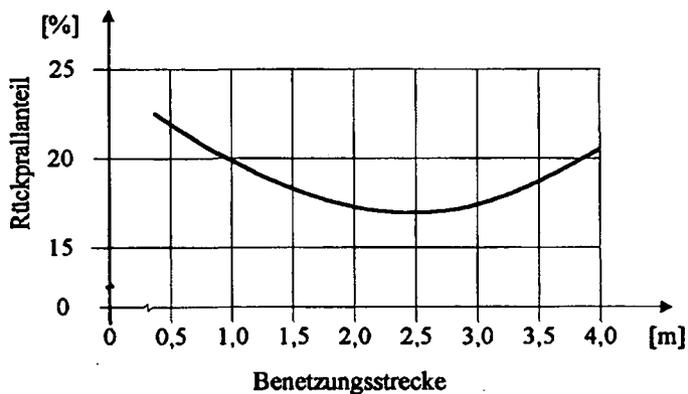


Abbildung 51: Einfluss der Benetzungsstrecke auf den Rückprall beim Trockenspritzverfahren [91]

Allerdings ist bei der Vorbenetzung des Mischgutes (Vorbenetzungswassermenge ca. 30 % der Gesamtwassermenge) die eingesetzte Bindemittelart zu beachten, da sehr reaktionsschnelle Spritzbindemittel sofort mit dem Vorbenetzungswasser reagieren und die Benetzungsstrecke entsprechend adaptiert werden muss. Als Beispiel für den Aufbau und die Wirkungsweise einer Vorbenetzungsdüse soll die „Pfeuffer-Düse“ beschrieben werden, die am Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck auf Basis der Zugabe eines Druckluft-Wasser-Gemisches entwickelt wurde (s. Abbildung 52).

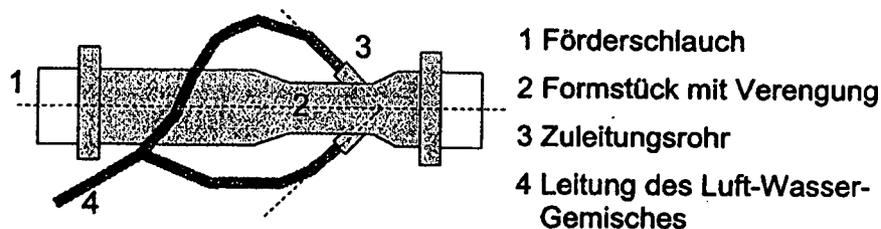


Abbildung 52: Schematischer Aufbau der Pfeuffer - Vorbenetzungsdüse [142]

Die Pfeuffer - Vorbenetzungsdüse weist eine Verengung des Benetzungskörpers (2) zur Veränderung des Strömungsverhaltens des Mischgutes auf. Durch diese Verengung kommt es zu einer Beschleunigung des Förderstroms und gleichzeitig entsteht eine Unterdruck-Sogwirkung (vergleichbar mit der Wirkungsweise von Vergasern bei Verbrennungsmotoren). Dadurch wird im Einleitungsbereich ein Anpacken von Feststoffpartikeln des Mischgutes verhindert und zum anderen erleichtert der Unterdruck ein einfacheres Eindringen des Luft-Wasser-Gemisches über die Zuleitungsrohre (3). Dadurch wird erreicht, dass das Luft-Wasser-Gemisch mit jenem Förderdruck eingedüst werden kann, der im Förderschlauch vorherrscht. Das Strömungsverhalten des Mischgutes im Förderschlauch bleibt dadurch unverändert. Durch die schleifende Zuleitung des Luft-Wasser-Gemisches ($\leq 45^\circ$) wird einerseits eine große Benetzungsfläche im Durchströmungsquerschnitt und ein zusätzlich beschleunigender Effekt des Förderstroms erreicht.

Bei Labor- und Baustellenversuchen wurde die Pfeuffer – Vorbenetzungsdüse sowohl für das Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut, als auch beim Trockenspritzverfahren mit erdfeuchtem Mischgut eingesetzt. Die Versuche wurden unter stets gleichen Randbedingungen durchgeführt, wobei die Vorbenetzungsdüse zum einen unmittelbar nach der Dosierblanschnecke und zum anderen 2,2 m vor der Hauptbenetzung in den Förderschlauch eingebaut wurde. Die Vorbenetzungswassermenge wurde bei den Versuchen mit 30 % der Gesamtwassermenge begrenzt, die Restwassermenge wurde vom Düsenführer manuell an der Hauptbenetzungsdüse zudosiert. Dadurch konnte eine Staubreduktion beim Verfahren mit TM von bis zu ca. 70 % gegenüber einer Hochdruck-Hauptbenetzung und beim Verfahren mit FMS von bis zu ca. 40 % erreicht werden. Neben der Staubreduzierung im Vortrieb konnte auch der Verschleiß der Förderschläuche bei der Verwendung von ofentrockenem Mischgut ebenfalls reduziert werden. (vgl. [142])

Düsenführung

Die Grenze der manuellen Düsenführung liegt bei Förderleistungen von 8 – 9 m³/h, wobei moderne Rotorspritzmaschinen innerhalb dieser Förderleistungsbandbreite und bei entsprechender Schlauchlänge nahezu pulsationsfrei arbeiten [90]. Eine Steigerung der Förderleistung (> 10 m³/h) erfordert eine erhöhte Druckluftmenge und führt damit zu einer Erhöhung des Rückstosses an der Düse, wodurch eine manuelle Düsenführung nicht mehr möglich ist.

Der Spritzbetonauftrag kann daher bei den Trockenspritzverfahren (s. Pkt. IV.3.5) mit ofentrockenem bzw. erdfeuchtem Mischgut sowohl mittels manueller Düsenführung als auch mit einem Manipulator erfolgen. Die Zielerträge für Spritzdüse, Benetzungstechnik und

Düsenführung bei den Trockenspritzverfahren stellen sich wie folgt dar (s. auch Tabelle 16 und Tabelle 18):

- Durch die relativ geringe Förderleistung wird – unter der Voraussetzung einer „geschickten“ Düsenführung - eine gute Ebenflächigkeit der aufgetragenen Spritzbetonoberfläche erreicht.
- Eine „geschickte“ Düsenführung bedingt allerdings auch – gerade bei manueller Düsenführung - eine ausreichende Schulung der Mineure, die je nach Schwierigkeitsgrad der Arbeiten hinsichtlich der eingesetzten Verfahrenstechnik und der Betontechnologie entsprechendes praktisches und theoretisches Wissen mitbringen müssen.
- Durch einen mechanisierten Spritzbetonauftrag mittels Spritzmanipulatoren kann die Qualität des Spritzbetonauftrages hinsichtlich Druckfestigkeit, Gleichmäßigkeit, Rückprall und Feinstaubkonzentration verbessert werden. In der Abbildung 53 werden ein manueller und ein mechanisierter Spritzbetonauftrag unter gleichen Rahmenbedingungen miteinander verglichen, wobei die Werte bei einer mechanisierten Düsenführung mit 100 % festgesetzt werden. Beispielsweise zeigt sich damit, dass bei einer manuellen Düsenführung die Rückprallwerte ca. 30 % über jenen Werten eines mechanisierten Spritzbetonauftrages liegen.

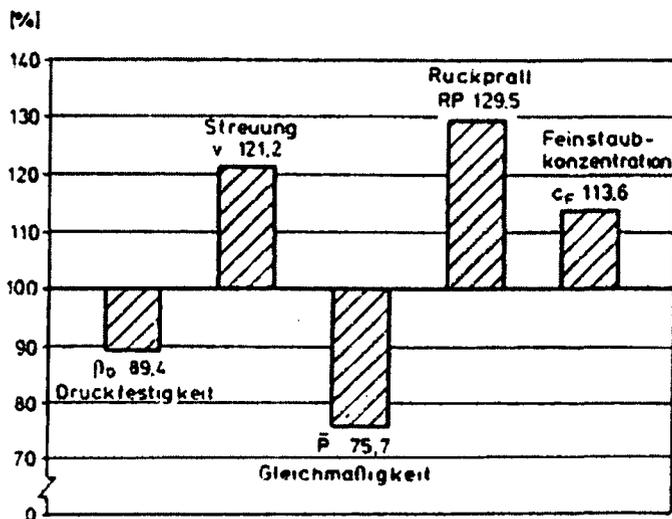


Abbildung 53: Abweichungen der manuellen zur mechanisierter Düsenführung (Ausgangsbasis bilden die Werte der mechanisierten Düsenführung mit 100 %) [85]

- Durch den Einsatz von Spritz-Bindemittel und der damit erzielbaren hohen Frühfestigkeit des Spritzbetons wird dem Düsenführer der Auftrag dicker Schichten in einem Arbeitsgang ermöglicht, wodurch ein schnellerer Arbeitsfortschritt erreicht wird.
- Durch den „geringen Platzbedarf im Tunnel“ – nachdem kein Einsatz eines Spritzmobils erforderlich ist – kann bei manuellem Spritzbetonauftrag auch die Sicherung von Teilflächen bzw. Kleinbereichen schnell und einfach erfolgen.

Die Luftzuführung am Umfang der Düse erzielt hohe Anwurfgeschwindigkeiten bei schlankem Spritzstrahl, sodass relativ große Spritzweiten und das Durchspritzen von Bewehrungen möglich sind. Der Nachteil liegt jedoch in der hohen Entmischung des Materials an der Auftragsfläche begründet. [72]

Düsenführung

Auch bei den Nassspritzverfahren kann die Düsenführung sowohl von Hand als auch mit einem Manipulator erfolgen.

- Nachdem allerdings ein großer baubetrieblicher Vorteil bei den Nassspritzverfahren in der Erzielung hoher Förderleistungen von bis zu 30 m³/h je Düse liegt, wird der Spritzbetonauftrag im Regelfall mit einem Spritzmobil erfolgen müssen. Bei solch hohen Förderleistungen ist eine manuelle Düsenführung nicht mehr möglich.
- Durch den Einsatz von Spritzmobilen kann es durch den hohen Gerätebedarf vor Ort und den erhöhten Platzbedarf im Tunnel insbesondere bei der Sicherung von Teil- und Kleinflächen zu Behinderungen im Vortrieb kommen.
- Beim Nassspritzverfahren ist der Düsenführer – analog zum Trockenspritzverfahren - ein bedeutender Faktor für die Erzielung einer guten Spritzbetonqualität, eine entsprechende praktische und theoretische Ausbildung ist daher unbedingt erforderlich.

IV.3.13 Störungsanfälligkeit

IV.3.13.1 Allgemeines

Unter einer **Störung** wird nach [86] eine unbeabsichtigte Unterbrechung oder Beeinträchtigung eines Baugerätes durch Unterbrechen der Funktionsbereitschaft verstanden, wenn der Fehler mit im Verhältnis zum Wert des Gerätes geringem Aufwand und in kurzer Zeit behoben werden kann.

Funktionsunterbrechungen allein aufgrund offensichtlicher Bedienungsunzulänglichkeiten sind keine Störungen (vgl. ÖN M 8100, Pkt. 2 Z 4.8).

Unter der **Störungsanfälligkeit** wird in der gegenständlichen Arbeit die Häufigkeit von Vortriebsbehinderungen bzw. -unterbrechungen verstanden, die durch

- z.B. verlängerte Rüstzeiten im Vortrieb durch erschwerte Gerätewechsel an der Ortsbrust (verursacht durch hohen Platzbedarf einer Spritzbetonausrüstung im Tunnel) oder
- durch den Ausfall eines Spritzbetonsystems entstehen.

Je höher die Störungsanfälligkeit eines Spritzbetonsystems ist, desto höher ist daher die Wahrscheinlichkeit von Vortriebsbehinderungen bzw. Vortriebsunterbrechungen durch den Ausfall der Spritzbetongeräte beim Spritzbetonauftrag. Die Zielerträge hinsichtlich der Störungsanfälligkeit stellen sich für die analysierten Spritzbetonsysteme entsprechend den Punkten IV.3.13.2 bis dar (s. auch Tabelle 18):

IV.3.13.2 TM-F und TM-E

Für die Beurteilung der Störungsanfälligkeit dieses Systems werden die nachfolgenden Überlegungen herangezogen:

- Durch eine ausreichende Anzahl an TM-Mobilen im Vortrieb und die hohe Mobilität dieser Geräte ist eine hohe Einsatzflexibilität und Verfügbarkeit dieses Spritzbetonsystems an den unterschiedlichsten Vortriebsorten gewährleistet (s. IV.3.4).
- Nachdem sich während der Vortriebsarbeiten beim Bohren, Laden, Sprengen und Schüttern – bedingt durch den Einsatz der mobilen TM-Mobile - keine stationären, maschinellen Spritzeinrichtungen vor Ort befinden, können durch das eingesetzte Spritzbetonsystem keine Behinderungen im Vortrieb resultieren.
- Durch die Lagerung des Mischgutes in Vorratssilos können auch Probleme bei der Mischgutanlieferung (z.B. Wochenend- und Nachtfahrverbote, Vermehrungen der Baustellenzufahrt) gut bewältigt werden.

Die Störungsanfälligkeit des Gesamtsystems wird aus den o.a. Gründen als „sehr gering“ beurteilt.

IV.3.13.3 FMS-F und FMS-E

- Beim Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen können bei kleinen Ausbruchsquerschnitten Behinderungen beim Gerätewechsel an der Ortsbrust durch den großen Platzbedarf der mobilen Mischanlage entstehen.
- Durch Sprengerschütterungen kann es bei diesem Spritzbetonsystem zu Fehlern bei der gravimetrischen Dosierung der Spritzbetonausgangsstoffe kommen (s. IV.3.2.3).
- Durch die Lagerung der erdfeuchten Gesteinskörnung im Tunnel (Witterungssicherheit) bzw. der Lagerung der Bindemittel im Vorratssilo und die Befüllung der mobilen Mischanlage mit einem baustelleneigenen Radlader ist eine hohe Versorgungssicherheit gewährleistet.

Die Störungsanfälligkeit dieses Systems wird daher als „sehr gering“ beurteilt.

IV.3.13.4 NSDI-F und NSDI-E

- Das Aufstellen von Stationär- oder Anbaugeräten und der Transportmischer vor Ort verursachen mitunter große Behinderungen der Vortriebsgeräte (Bagger, Radlader und Bohrwagen).
- Beim Einsatz eines Spritzmobils ist die Störungsanfälligkeit des Vortriebs vergleichbar gering wie bei den Systemen TM-F und TM-E.
- Insbesondere beim System NSDI-F (Mischgutversorgung über eine externe Betonmischanlage) kann es durch Betonfehlbestellungen – hinsichtlich der erforderlichen Betonmenge und dem Lieferzeitpunkt – zu Behinderungen der Vortriebsarbeiten kommen.
- Durch den erhöhten Gerätebedarf an der Ortsbrust kann es – besonders bei der Sicherung von Teil- bzw. Kleinflächen – durch zeitaufwändige Gerätewechsel an der Ortsbrust zu Vortriebsbehinderungen kommen.
- Bei einer erschwerten Erreichbarkeit der Baustelle (z.B. Wochenendfahrverbot, Sperre der Baustellenzufahrt wegen Lawinen oder Vermehrungen, große Entfernung der Baustelle von der Mischanlage) kann es bei verspäteten Betonzulieferungen zu Vortriebsbehinderungen kommen.

Die Störungsanfälligkeit ist aufgrund begrenzter Flexibilität erhöht [72] und wird in der gegenständlichen Arbeit als „gering“ beurteilt.

IV.3.13.5 NSDU-F und NSDU-E

Es gelten die Aussagen im Punkt IV.3.13.4 – die Störungsanfälligkeit wird daher ebenfalls als „gering“ beurteilt.

IV.3.14 Verschleiß

IV.3.14.1 Allgemeines

Das Handwörterbuch der Bauwirtschaft definiert die Begriffe „Verschleiß“, „Verschleißvorgang“, „Verschleißerscheinung“ und „Verschleißteil“ wie folgt (s. [86] – *Begriffsdefinitionen sind in kursiver Schrift dargestellt*):

Unter Verschleiß wird der ungewollte Materialabtrag an Oberflächen aufgrund mechanischer und sonstiger physikalischer Einwirkungen (abrasive oder materialermüdende Beanspruchungen, z.B. von Baggerschaufelzähnen, -böden, Brecherbacken, Fahrzeugreifenprofilen, Oberflächenabbau an Lagern, Verzahnungen) verstanden. Bei den Spritzbetonsystemen ist der Verschleiß an den Spritzbetongeräten (z.B. Dosierblas-

schnecke, Rotorspritzmaschine, Kolbenpumpe), der Förderleitung, dem Förderschlauch und der Spritzdüse zu analysieren.

*Als **Verschleißvorgang** wird der unter normaler mechanischer, thermischer, chemischer Betriebsbeanspruchung unvermeidliche, vorauszusehende allmähliche Materialabtrag an der Oberfläche bezeichnet. Der Verschleißvorgang des unvorhergesehenen raschen Materialabtrags entspricht einer Schadensentwicklung.*

*Als **Verschleißerscheinung** wird der Zustand eines Bauteils nach erfolgtem, unter normalen Betriebsbeanspruchungen unvermeidlichem Verschleißvorgang bezeichnet. Der Zustand entspricht dem aufgrund der vorgesehenen Betriebsbeanspruchung erwartetem Bild (vgl. ÖN M 8100, Pkt. 2 Z 5.6.4).*

*Ein **Verschleißteil** ist ein Bauteil, der an Stellen eingesetzt wird, an denen betriebsbedingt unvermeidbarer Verschleiß auftritt, um dadurch andere Bauteile vor Verschleiß zu schützen. Das Verschleißteil ist vom Konzept her für den Austausch vorgesehen. (vgl. ÖN M 8100, Pkt. 2 Z 9.2)*

IV.3.14.2 TM-F und TM-E

Beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut sind die TM-Mobile, die Druckkessel und die Dosierblasschnecke (kaum rotierende und bewegliche Teile) als sehr wartungsfreundlich und verschleißarm zu bezeichnen (vgl. [43]).

Durch die hohe Geschwindigkeit im Materialstrom und die Förderung des ofentrockenen Mischgutes im Dünnstromverfahren (es bildet sich daher kein Gleitfilm zwischen dem Förderschlauch und dem Mischgut aus) zeigen sich allerdings bei diesem System an den Förderschläuchen und den Spritzdüsen hohe Verschleißerscheinungen. Durch den Einsatz von Vorbenetzungsdüsen können die Standzeiten der Förderschläuche und Düsen allerdings erhöht werden.

IV.3.14.3 FMS-F und FMS-E

Beim Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen unterliegen die gummibeschichteten Reibscheiben (und etwas geringer die am Rotor montierten Stahlscheiben) der Rotorspritzmaschine, die als Abdichtung des Rotors gegen den Einfülltrichter und den Ausblasstutzen dienen, dem größten Verschleiß (s. Abbildung 17). Durch die Verwendung einer automatischen Plattenschmierung kann der Verschleiß an der Rotorspritzmaschine allerdings reduziert werden. Die Verwendung von erdfeuchten Zuschlägen reduziert trotz der hohen Geschwindigkeit des Mischgutes in der Förderleitung

bzw. im Förderschlauch den Verschleiß an Schläuchen und Düsen gegenüber dem Verfahren mit ofentrockenem Mischgut.

IV.3.14.4 NSDI-F und NSDI-E

Durch die geringe Geschwindigkeit des Dichtstroms in der Förderleitung und der daraus resultierenden Ausbildung eines Gleitfilms zwischen dem Mischgut und der Rohrwandung in den Förderleitungen weisen die Verfahren NSDI-F und NSDI-E gegenüber dem Trockenspritzverfahren einen deutlich reduzierten Verschleiß auf.

Durch den Verschleiß hervorgerufene ungünstige Beeinflussungen des Förderstroms ergeben erhöhte Rückprallwerte, ein schlechtes Spritzergebnis und auch Auswirkungen auf die Standzeiten der Schlauchleitungen und Spritzdüsen [73].

IV.3.14.5 NSDU-F und NSDU-E

Es gelten für das Dünnstromverfahren sinngemäß die Aussagen im Punkt IV.3.14.4.

IV.3.15 Wintertauglichkeit

IV.3.15.1 TM-F und TM-E

Das ofentrockene Mischgut wird entweder in Säcken oder mit speziellen Silowagen antransportiert und auf der Baustelle in entsprechenden Vorratssilos gelagert. Durch diese Art der Lagerung (Sack oder Silo) auf der Baustelle und den Transport des Mischgutes vor Ort in den Druckkesseln der TM-Mobile – erst an der Spritzdüse kommt das ofentrockene Mischgut mit dem Anmachwasser in Berührung - ist dieses Spritzbetonsystem witterungsunempfindlich.

Der Einfluss der Temperatur des Mischgutes auf den Rückprall ist allerdings – der Jahreszeit entsprechend – zu berücksichtigen (s. Pkt. IV.3.11.2 - Abbildung 47). Es ist daher ein Aufwärmen des Anmachwassers im Winter auf max. 60 °C empfehlenswert, im Hochsommer müssen heiße Zuschläge eventuell gekühlt werden.

Der Einsatz dieses Spritzbetonsystems ist bis zu -15 °C problemlos einsetzbar [50], das System wird daher als „sehr gut wintertauglich“ beurteilt.

IV.3.15.2 FMS-F und FMS-E

Bei der Lagerung der erdfeuchten Zuschläge ist die Einhaltung der Bandbreite der zulässigen Eigenfeuchte der Gesteinskörnung zwischen 2,0 M-% und 4,0 M-% zu beachten.

Zu trockene Zuschläge führen zu erhöhter Staubentwicklung, zu feuchte Zuschläge wiederum zu einer schlechten Frühfestigkeitsentwicklung.

Im Winterbetrieb sind Zusatzaufwendungen wie das Aufwärmen des Anmachwassers und bei sehr kalten Temperaturen eine Zusatzheizung im Gesteinskörnungssilo erforderlich. Bei hohen Temperaturen müssen die Zuschläge eventuell gekühlt oder mit Wasser berieselt werden. Falls sich ein Lager außerhalb des Tunnels befindet, sollten bei hohen bzw. tiefen Temperaturen die Zuschläge abgedeckt oder geschlossen gelagert werden. [72] Eine Zwischenlagerung des Mischgutes im Tunnel (in einer ausreichenden Menge von mehreren Tagesrationen) bietet einen guten und kostengünstigen Schutz vor Witterungseinflüssen, eine geschlossene Lagerung der Zuschläge im Silo ist witterungsunempfindlich.

Die Systeme FMS-F und FMS-E sind somit ebenfalls als „gut wintertauglich“ zu beurteilen.

IV.3.15.3 NSDI-F und NSDI-E

Durch eine geschlossene Bevorratung von Gesteinskörnung und Bindemittel in den Vorratssilos der Mischanlage ist eine hohe Wintertauglichkeit dieses Spritzbetonsystems gewährleistet. Bei der Versorgung mit Nassmischgut von externen Mischanlagen sind eventuell Zufahrtsprobleme (z.B. vereiste Baustraße) für die Fahrmischer zu beachten.

Das System NSDI-F wird als „wintertauglich“ und das System NSDI-E wird als „hoch wintertauglich“ beurteilt.

IV.3.15.4 NSDU-F und NSDU-E

Es gelten für das Dünnstromverfahren sinngemäß die Aussagen im Punkt IV.3.15.3.

IV.3.16 Zusammenfassung

Die baubetrieblichen Zielerträge für die in diesem Kapitel angeführten Beurteilungskriterien sind übersichtlich in einer Zielertragsmatrix dargestellt. Diese Zielertragsmatrix bildet in weiterer Folge die Grundlage zur Bewertung der Verfahren und ist in den Tabelle 16 bis Tabelle 18 dargestellt.

Beurteilungskriterien	TM – F	TM – E	FMS – F	FMS – E	NSDI – F	NSDI – E	NSDU – F	NSDU – E
Ausbruchsart – Vortriebsart	In sehr wechselhaftem Gebirge mit flacher Überdeckung und einem häufigen Vortrieb mit Teilquerschnitten sehr gut einsetzbar. Vorteile bei Vortrieben mit mehreren Angriffspunkten – Inselbetrieb nicht möglich.		In sehr wechselhaftem Gebirge mit flacher Überdeckung und einem häufigen Vortrieb mit Teilquerschnitten sehr gut einsetzbar. Beim Ulmenstollenvortrieb nicht einsetzbar.		Behinderung erwartbar – aufzufahrende Teilquerschnitte müssen den Einsatz von Spritzbetonmanipulatoren erlauben, Probleme mit der Verfügbarkeit möglich. Kein Inselbetrieb möglich.		Behinderung erwartbar – aufzufahrende Teilquerschnitte müssen den Einsatz von Spritzbetonmanipulatoren erlauben, Probleme mit der Verfügbarkeit möglich. Kein Inselbetrieb möglich.	
Benetzungstechnik	Manuelle Wasserzugabe an der Hauptbenetzungsdüse durch den Düsenführer – hohe Qualifikation des Düsenführers erforderlich – Einsatz einer Vorbenetzungsdüse zur Staubreduzierung möglich (Vorbenetzungswassermenge ca. 30 % der Gesamtwassermenge) - Reaktionszeit des SBM bei der Bemessung der Vorbenetzungsstrecke beachten				Förderung des Fertigmischgutes – keine Wasserzugabe an der Düse erforderlich			
Dosiertechnik (gravimetrisch-volumetrisch)	Mischung und Dosierung des TM im Werk	Mischung und Dosierung des TM in baustelleneigener Mischanlage	Dosierung der Spritzbetonausgangsstoffe kann an die Vortriebsverhältnisse angepasst werden – hohe Genauigkeitsanforderungen an die Dosiereinrichtung und aufwendige Zusammenführung der Materialkomponenten vor Ort (Bandverwiegung) – Fehleranfälligkeit im Sprengbetrieb.		Dosierung der Einzelkomponenten im Werk	Dosierung der Einzelkomponenten in baustelleneigener Mischanlage	Dosierung der Einzelkomponenten im Werk	Dosierung der Einzelkomponenten in baustelleneigener Mischanlage
	Zusätzliche Durchmischung von Gesteinskörnung und Bindemittel im Förderschlauch – Wasserdosierung subjektiv – Mengemessung bei der Dosierung ungenau				Dosierung der Einzelkomponenten im Werk	Dosierung der Einzelkomponenten in baustelleneigener Mischanlage	Dosierung der Einzelkomponenten im Werk	Dosierung der Einzelkomponenten in baustelleneigener Mischanlage
Düsenführung	Manuelle oder mechanisierte Düsenführung möglich – „geschickte“ Düsenführung gewährleistet gute Ebenföchigkeit der Spritzbetonoberfläche – Verwendung von SBM führt zu hoher Frühfestigkeit, dadurch hohe Auftragsdicken möglich				Mechanisierte Düsenführung mit Manipulator- Erfahrung und Qualifikation der Vortriebsmannschaft nötig		Manuelle oder mechanisierte Düsenführung möglich – Erfahrung und Qualifikation der Vortriebsmannschaft nötig	
Einsatzbereich	Kleine Stollen- und Tunnelvolumina (kurze Tunnel mit großem Querschnitt bzw. kurze bis mittellange Stollen mit kleinem Querschnitt). Einsatz bei mehrfachen Tunnelangriffen und Vortriebsarten möglich bzw. bei Nachprofilierungsarbeiten bewährt. Bei kurzen Tunnel- oder Stollenlängen (weniger als 400 m) ist eine Förderung des Mischgutes direkt vom Silo an den Einbauort möglich (d.h. Entfall von TM-Mobilen). Vorsicherung von Teilflächen bzw. Sicherung von Kleinbereichen gut möglich.		Universell einsetzbar, d.h. sowohl für große als auch für kleine Spritzbetonkubaturen wirtschaftlich einsetzbar. Anpassung an unterschiedlichste Vortriebsbedingungen vor Ort durch veränderbare Mischgutrezeptur gut möglich. Kombination mit den Verfahren NSDU-F und NSDU-E gut möglich.		Bei großen Spritzmengen, guten Vortriebsbedingungen und kurzen Spritzpausen gut geeignet.		Universell einsetzbar, d.h. für große und kleine Spritzbetonvolumina einsetzbar.	
					Mischanlagen sollten in der Nähe des Tunnelportals sein. Synergieeffekte Spritzbeton und Ortbetoninnenschale berücksichtigen. Behinderungen bei kleinen Querschnitten durch hohen Gerätebedarf vor Ort erwartbar.		Mischanlagen sollten in der Nähe des Tunnelportals sein. Synergieeffekte Spritzbeton und Ortbetoninnenschale berücksichtigen. Kombination mit den Verfahren FMS-F und FMS-E gut möglich.	
Fahrbahn	Ordentliche Fahrbahn bis zur Ortsbrust für TM-Mobile erforderlich				Ordentliche Fahrbahn bis zur Ortsbrust für Fahrmischer erforderlich			

Tabelle 16: Zielertragsmatrix Baubetrieb – Teil 1

Beurteilungskriterien	TM – F	TM – E	FMS - F	FMS - E	NSDI – F	NSDI – E	NSDU – F	NSDU - E
Flexibilität	Sehr beweglich – leichte und sehr flexible Geräte – kein Umrüstungsaufwand – an den unterschiedlichsten Orten einsetzbar		Eingeschränkt – schwere und unbewegliche Einrichtung (ausgenommen raupenfahrbares Mobilcrete)		Großer Zeitvorauslauf für Betonbestellung erforderlich		Großer Zeitvorauslauf für Betonbestellung erforderlich	
					Eingeschränkte Flexibilität erhöht Störungsanfälligkeit		Umstellung von NSDU auf FMS rasch möglich – Einsatz in unterschiedlichster Geologie möglich.	
Förderleitung	Bis 300 m Förderleitung möglich – allerdings ab 150 m deutliche Reduktion der Leistung und Erhöhung von Rückprall und Staub – Geschwindigkeit des TM bzw. FMS in der Leitung ca. 20 – 40 m/sec.				Keine lange Spritzleitung möglich - ca. 100 m		Keine lange Spritzleitung möglich - ca. 80 m	
					Fördergeschwindigkeiten ca. 1/3 von den Trockenspritzverfahren – ca. 6 bis 14 m/sec			
Förderung	Dünnstrom – Förderung über Dosierblasschnecke, Staubbefreiung von der Mischgutlagerung über die Dosierblasschnecke bis zum Austritt an der Düse durch Abkapselung – kontinuierliche Förderung - Feuchtigkeit im Förderschlauch beachten		Dünnstrom – Förderung über Rotorspritzmaschine, Staubbefreiung an der Rotorspritzmaschine – schnell pulsierende Förderung		Dichtstrom – Förderung mit Kolbenpumpe - langsam pulsierende Förderung		Dünnstrom – langsam pulsierende Förderung mit adaptierter Rotorspritzmaschine	
Förderleistung	Ca. 5,5 – 8,0 m³/h		Ca. 5,5 – 9,0 m³/h		Bis zu 30 m³/h möglich (nur bei Großquerschnitten erreichbar – effektive Einbauleistung von 20 m³/h möglich) – für exakten Spritzbetonauftrag ca. 10 m³/h		10 – 15 m³/h	
Gerätedisposition (Vortrieb)	Mobile „TM-Mobile“ mit 2 x ca. 10 m³ Druckkessel und Dosierblasschnecke, Strom-, Wasser- und Luftanschluss. Füllvorgang < 10 min, Rüstzeiten < 15 min		Kompaktanlage (zwei- oder dreibahnig) – Versorgung von mehreren Vortriebsorten gleichzeitig möglich – Befüllung mit Gesteinskörnung durch Radlader bzw. mit Zement durch Silowagen – Förderung des Mischgutes mit Rotorspritzmaschinen		Einsatz von Spritzmobilen (inkl. Doppelkolbenpumpe, Manipulator und ferngesteuerte Düse, Behälter für EB, Kompressor)		Einsatz von Spritzmobilen (inkl. Behälter für EB, Kompressor, adaptierte Rotorspritzmaschine, Manipulator und ferngesteuerte Düse)	
	Bei kurzen Vortriebslängen (< 400 m): Drucksilo, Dosierblasschnecke und Spritzbetonleitung bis zur Düse (keine TM-Mobile erforderlich!)				Keine eigenen Fahrmischer erforderlich!	Eigene Fahrmischer von der eigenen Mischanlage zum Einbauort erforderlich!	Keine eigenen Fahrmischer erforderlich!	Eigene Fahrmischer von der eigenen Mischanlage zum Einbauort erforderlich!
Nachbearbeitung Spritzbetonoberfläche	Gleichmäßiger Auftrag, daher gute Ebenfächigkeit – Nachbearbeitung kaum erforderlich		Gleichmäßiger Auftrag, daher gute Ebenfächigkeit – Nachbearbeitung kaum erforderlich		Probleme einer glatten Spritzbetonoberfläche bei hohen Förderleistungen und großen Auftragsdicken – aufwändige Nachbearbeitung möglich		Gleichmäßiger Auftrag, daher gute Ebenfächigkeit – Nachbearbeitung kaum erforderlich	
Personaldisposition	Beim Spritzbetonauftrag mit 2 Düsen insgesamt 3 Mann erforderlich: 2 Mann an den Düsen, 1 Mann am TM-Mobile Für Nebentätigkeiten: 3 Mann zur Verfügung		Beim Spritzbetonauftrag mit 2 Düsen insgesamt 3 Mann erforderlich: 1 Maschinenführer und ein Düsenführer je Spritzmaschine erforderlich – zeitweilig auch ein zusätzlicher Lader- bzw. Silowagenfahrer erforderlich Für Nebentätigkeiten: 3 Mann zur Verfügung		Beim Spritzbetonauftrag mit 1 Düse: 1 Mann an der Kolbenpumpe, 1 Düsenführer Für Nebentätigkeiten: max. 4 Mann verfügbar		Beim Spritzbetonauftrag mit 1 Düse: 1 Mann an der Rotorspritzmaschine, 1 Düsenführer Für Nebentätigkeiten: max. 4 Mann verfügbar	
		Maschinist für eigene Mischanlage erforderlich.			Transportbeton: Keine Fahrer für Fahrmischer erforderlich!	Fahrer für Fahrmischer und Maschinist für eigene Mischanlage erforderlich!	Transportbeton: Keine Fahrer für Fahrmischer erforderlich!	Fahrer für Fahrmischer und Maschinist für eigene Mischanlage erforderlich!

Tabelle 17: Zielertragsmatrix Baubetrieb – Teil 2

Beurteilungskriterien	TM – F	TM – E	FMS - F	FMS - E	NSDI – F	NSDI – E	NSDU – F	NSDU - E
Reinigung - Wartung	Sehr geringer Aufwand – Leerfahren der Dosierblasschnecke, tägliche Schmierung, wöchentliche Entfernung von Materialverkrustungen am Konus der Dosierblasschnecke		Geringer Aufwand – Leerfahren der Rotorspritzmaschine, oberflächliche Reinigung des Mobile Mischanlageen, genaue Wartung der Reibscheiben der Rotorspritzmaschine erforderlich, regelmäßiges Service der Förderanlagen		Hoher Aufwand – Reinigung der Betonpumpe nach jedem Spritzbetonauftrag, hoher Wasserbedarf, bei Nachlässigkeit Gefahr von Stopfern		Geringer Aufwand als bei NSDI – Leerfahren der Rotorspritzmaschine und anschließende Reinigung der Trichter - regelmäßige Kontrolle der Reibscheiben der Rotorspritzmaschine	
Restmengen	Keine Restmengen – nach dem Leerfahren der Dosierblasschnecke bleibt Mischgut im Druckkessel des TM-Mobiles		Keine Restmengen – nur der effektive Spritzbetonbedarf wird vor Ort gemischt		Gefahr von Restmengen bei oftmaligen Spritzbetonpausen – aufwändiges Vorhalten einer Spritzbetonreserve (Nachmischer, Verzögerer), Problematik bei der Betonbestellung (Menge und Zeitpunkt)			
Rückprall	Hoch – ca. 25 – 45 %		Zufriedenstellend – ca. 15 – 30 %		Gering – ca. 5 – 20 %		Gering – ca. 5 – 15 %	
Spritzbetonmanipulator	Manueller Spritzbetonauftrag möglich – d.h. nicht unbedingt erforderlich		Manueller Spritzbetonauftrag möglich – d.h. nicht unbedingt erforderlich		Unbedingt erforderlich – hohe Spritzleistungen, allerdings bei mehreren Vortriebsorten intensive Geräteausstattung		Unbedingt erforderlich – hohe Spritzleistungen, allerdings bei mehreren Vortriebsorten intensive Geräteausstattung	
Spritzdüse	Stahl- bzw. Kunststoffrohr mit gleichbleibendem oder sich zum Ende hin verjüngenden Querschnitt – eventuell Vorschaltung einer Vorbenetzungsdüse (ca. 2,2 m vor der Hauptbenetzung) Aufgabe des Mischkörpers (Anmachwasser + Mischgut) und Formgebung des Spritzstrahls – manuelle Wasserzugabe an der Düse durch den Düsenführer				Luft- und Beschleunigerzugabe an der Düse – zentrale Luftzufuhr oder Luftzuführung am Umfang der Düse möglich			
Störungsanfälligkeit	Sehr gering – ausreichende Anzahl an TM-Mobiles vor Ort – hohe Mobilität - keine stationären Spritzbetongeräte vor Ort		Sehr gering – Autarke Versorgung mit Gesteinskörnung und Bindemittel mit baustelleneigenem Gerät - bei kleinen Querschnitten erhöhte Rüstzeiten durch stationäre Dosier- und Mischanlage vor Ort möglich.		Gering – Behinderung der Vortriebsgeräte durch umfangreiche Spritzbetonausrüstung möglich - Gefahr von Betonfehlbestellungen (hinsichtlich Zeitpunkt und Menge der Anlieferung) – Behinderungen bei einer erschwerten Baustellenzufahrt erwartbar!			
Verfügbarkeit	Hoch – Hauptvorteil des Verfahrens, richtige Menge Spritzbeton zur richtigen Zeit am richtigen Ort, Unterbrechung jederzeit möglich, Spritzbetonmenge pro Spritzvorgang begrenzt		Sehr hoch – Spritzbeton jederzeit in der richtigen Menge lieferbar, Leerfahren der Maschine erforderlich		Gut – im Notfall bei kleinen Spritzbetonmengen problematisch; Abhängigkeit vom Transportbetonwerk	Gut – im Notfall bei kleinen Spritzbetonmengen problematisch	Gut – im Notfall bei kleinen Spritzbetonmengen problematisch; Abhängigkeit vom Transportbetonwerk	Gut – im Notfall bei kleinen Spritzbetonmengen problematisch
Verschleiß	Druckkessel und Dosierblasschnecke verschleißarm – an Schlauch und Düse höchste Verschleißerscheinungen – Verschleißreduktion durch Einsatz von Vorbenetzungsdüsen		Hoher Verschleiß an Reibscheiben der Rotorspritzmaschine – erdfuchte Zuschläge bewirken verminderten Verschleiß an Schläuchen und Düsen		Sehr geringer Verschleiß durch Dichtstromförderung von Nassmischgut und geringe Fördergeschwindigkeiten in Förderschlauch und -leitung		Sehr geringer Verschleiß durch Dünnstromförderung von Nassmischgut Und geringe Fördergeschwindigkeiten in Förderschlauch und -leitung	
Wintertauglichkeit	Sehr gute Wintertauglichkeit bis – 15°C einsetzbar – kaum Zusatzaufwendung im Winterbetrieb		Gute Wintertauglichkeit – Zwischenlagerung der Gesteinskörnung im Tunnel als guter Witerungsschutz – Zusatzaufwendungen im Winterbetrieb		Wintertauglich – eventuell Probleme bei der Zufahrt der externen Fahrmischer	Gute Wintertauglichkeit	Wintertauglich – eventuell Probleme bei der Zufahrt der externen Fahrmischer	Gute Wintertauglichkeit
Lagerung von Bindemittel und Gesteinskörnung in geschlossenen Silos bei der Mischanlage – Zusatzaufwendungen im Winterbetrieb								

Tabelle 18: Zielertragsmatrix Baubetrieb – Teil 3

IV.4 Baustelleneinrichtung

Die erforderliche Baustelleneinrichtung für eine Tunnelbaustelle stellt einen wesentlichen Beurteilungsaspekt für die Auswahl eines Spritzbetonverfahrens dar. Insbesondere bei der Entscheidungsfindung für eine Eigen- (baustelleneigene Mischanlage inkl. erforderlicher Lagerflächen bzw. Silos für die einzelnen Mischgutkomponenten) oder eine Fremdversorgung (externes Betonmischwerk) der Baustelle mit Spritzbeton ist für jedes Spritzbetonverfahren der Platzbedarf und die Wirtschaftlichkeit der Baustelleneinrichtung zu untersuchen.

Übersichtlich dargestellt werden die Beurteilungskriterien für die insgesamt acht analysierten Spritzbetonverfahren in einer Zielertragsmatrix für die Baustelleneinrichtung (s. Tabelle 19). Analog zum Beurteilungsaspekt „Baubetrieb“ werden die für die Baustelleneinrichtung relevanten Beurteilungskriterien in einer Zielertragsmatrix beschrieben und anschließend einer ganzheitlichen Bewertung mittels einer Nutzwertanalyse unterzogen (vgl. Kap. VI).

IV.4.1 Art der Lagerung – Bindemittel und Gesteinskörnung

IV.4.1.1 Allgemeines

Bei der Lagerung der Ausgangsstoffe Bindemittel und Gesteinskörnung sind zunächst die Baustellenrandbedingungen (z.B. Lage der Baustelle, Zu- und Abfahrtsmöglichkeiten zu den Silos, Zustand der Bau- bzw. Zufahrtsstraße) zu prüfen. Insbesondere die Bevorratung von Bindemittel und Gesteinskörnung für den Wochenend- bzw. Nachtbedarf an Spritzbeton ist dabei in der Baustelleneinrichtung zu beachten und stellt ein bedeutendes Entscheidungskriterium für die Auswahl eines Spritzbetonverfahrens dar.

IV.4.1.2 TM-F

Beim Spritzbetonsystem TM-F ist keine Lagerung von Bindemittel und Gesteinskörnung auf der Baustelle erforderlich. Das fertige Trockenmischgut (Bereitstellungsgemisch aus Bindemittel und Gesteinskörnung) wird entweder mit speziellen Silowagen vom Betonwerk zur Baustelle transportiert und dort in bereitgestellte Silos umgeblasen oder bereits im Betonwerk selbst in geschlossene Silos gefüllt, die dann zur Baustelle geliefert und dort aufgestellt werden.

IV.4.1.3 TM-E

Wird das Trockenmischgut in einer Mischanlage auf der Baustelle selbst hergestellt, sind in der Baustelleneinrichtung folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Für die Lagerung des Bindemittels sind Silos auf der Baustelle vorzuhalten.
- Die Lagerung der Zuschläge erfolgt entweder in Silos oder in anderwärtigen trockenen Lagerstätten (z.B. Witterungsschutz durch Überdachung oder Einhausung).

Die Dimensionierung der Baustelleneinrichtungsfläche hinsichtlich der Lagerung von Bindemittel und Gesteinskörnung (Größe und Anzahl der Silos, Flächenbedarf für Gesteinskörnungslagerstätten) ist auf den erforderlichen Spritzbetonbedarf der Baustelle abzustimmen, insbesondere sind dabei auch Wochenend- und Nachtfahrverbote für die Zulieferung der Spritzbetonausgangsstoffe zu beachten.

IV.4.1.4 FMS-F und FMS-E

Bei den Spritzbetonsystemen FMS-F und FMS-E erfolgt die Mischguterzeugung direkt vor Ort mit einer mobilen Mischanlage (s. IV.3.6.3), d.h. bei beiden Verfahren – unabhängig von Eigen- oder Fremdversorgung – müssen auf der Baustelle Lagerungsmöglichkeiten für Bindemittel und Zuschläge vorgesehen werden. Die Lagerung der Bindemittel erfolgt in jedem Fall in baustelleneigenen Silos in der Nähe des Tunnelportals, wobei deren Größe und Anzahl nach dem erforderlichen Spritzbetonbedarf (Wochenend- und Nachtvorrat) zu bemessen ist.

Die Unterscheidung von Eigen- und Fremdversorgung ergibt sich bei den Spritzbetonverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen lediglich durch die Art der Versorgung der Baustelle mit Zuschlägen.

- Bei dem System FMS-F (Fremdversorgung) wird der Gesteinskörnung von einem (möglichst nahegelegenen) externen Kieswerk antransportiert und auf der Baustelle gelagert.
- Beim System FMS-E (Eigenversorgung) wird der Gesteinskörnung von einer baustelleneigenen Aufbereitungsanlage bereitgestellt (z.B. Aufbereitung und Wiederverwendung von Ausbruchsmaterial).

Die Lagerung der Zuschläge kann bei beiden Spritzbetonsystemen in Silos oder einfacher und kostengünstiger auf einer Zwischendeponie im Tunnel – ca. 300 bis 1.000 m hinter der Spritzanlage – erfolgen. Damit der in der Richtlinie für Spritzbeton [106] festgelegte Regelbereich der Gesteinskörnungseigenfeuchte von 2 Masse-% bis 4 Masse-% eingehalten werden kann, sollten zur „Materialtrocknung“ im Tunnel immer drei bis vier Tagesrationen an Gesteinskörnung vorgehalten werden. Bei einem feuchten Tunnel oder bei flächigen Wasserzutritten sind Maßnahmen zu treffen, um das Gesteinskörnungslager trocken zu halten (z.B. Abdeckung mit Noppenbahnen, Drainagen).

IV.4.1.5 NSDI-F und NSDU-F

Bei der Fremdversorgung mit Nassmischgut ist – unabhängig von einer Spritzbetonförderung im Dicht- oder Dünnstrom – keine Lagerung von Bindemittel und Gesteinskörnung auf der Baustelle erforderlich.

IV.4.1.6 NSDI-E und NSDU-E

Wird das Nassmischgut in einer baustelleneigenen Betonmischanlage hergestellt, sind – unabhängig von der anschließenden Spritzbetonförderung im Dicht- oder Dünnstrom - in der Baustelleneinrichtung folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Die Lagerung des Bindemittels erfolgt in Silos.
- Für die Lagerung der Zuschläge sind Silos oder anderwärtige trockene Lagerstätten (z.B. Witterungsschutz durch Überdachung oder Einhausung) in der Nähe dieser Mischanlage vorzusehen.

Die Bemessung der dafür erforderlichen Baustelleneinrichtungsfläche (Größe und Anzahl der Silos, Flächenbedarf für Lagerstätten) ist auf den erforderlichen Spritzbetonbedarf der Baustelle abzustimmen, insbesondere sind Wochenend- und Nachtfahrverbote bei der Zulieferung der Spritzbeton Ausgangsstoffe zu beachten.

IV.4.2 Art der Lagerung – Mischgut

IV.4.2.1 TM-F und TM-E

Das ofentrockene Mischgut mit einem Gesteinskörnungswassergehalt von $< 0,2$ Masse-% (Obergrenze gemäß [106]) muss in Vorratssilos geschlossen gelagert werden, damit durch etwaige Feuchtigkeit Zutritte keine Vorreaktionen des Mischgutes im Silo erfolgen können. Die Silos werden kontinuierlich mit straßentauglichen Silofahrzeugen gefüllt, wobei die Lagerfähigkeit des Mischgutes im Silo bis zu drei Monate betragen kann [81]. Daher können bei einer entsprechenden Bemessung der Silos hinsichtlich der Zulieferung von Mischgut verkehrstechnische Bestimmungen über Nachtfahr- oder Wochenendfahrverbote nahezu vernachlässigt werden (d.h. Wochenendvorräte können auf der Baustelle vorgehalten werden). Außerdem können durch die Silolagerung des Mischgutes sowohl Transportunterbrechungen als auch Verbrauchsschwankungen ausgeglichen werden.

Beim Materialumschlag des Trockenmischgutes in und aus Silos können Entmischungen auftreten, die sich bei der Spritzbetonverarbeitung nachteilig auswirken. So führen Feinmaterialanhäufungen beim Spritzbetonauftrag zu großen Staubbelastungen und Grobmaterialanhäufungen zu erhöhtem Rückprall. Außerdem ergeben sich durch die Entmischung beim Ausziehen des Materials aus dem Silo Fehler in der Mengennmessung bei der Schneckenförderung, daraus kann eine unterschiedliche Befüllung der Druckkessel der TM-Mobile resultieren. *Schwab* schlägt daher in [48] folgende Maßnahmen zur Reduzierung der Entmischungsgefahr bei der Silolagerung von Trockenmischgut vor:

- Das Einblasen des Trockenmischgutes in den Silo sollte mittels Pralltopf und Zentralrohr erfolgen.

- Beim Ausziehen aus dem Silo können durch den Einbau eines Schwingbodens Verbesserungen erzielt werden.
- Besonders beim Austrag des letzten Drittels der Silofüllung muss mit Entmischungerscheinungen gerechnet werden. Daher sollte der Silo nicht komplett leergezogen werden, sondern mindestens ein Viertel bis ein Drittel des möglichen Inhalts immer im Silo belassen werden.
- Die Häufigkeit des Ein- und Ausblasens des Mischgutes im System „Silofahrzeug – Silo – TM-Mobil – Spritzbetonleitung“ sollte möglichst gering sein.

IV.4.2.2 FMS-F und FMS-E

Nachdem das Mischgut erst in der mobilen Mischanlage direkt vor Ort gemischt wird, ist keine Lagerung des Mischgutes erforderlich. Für die Lagerung der erforderlichen Spritzbetonausgangsstoffe ist IV.4.1.4 zu berücksichtigen.

IV.4.2.3 NSDI-F und NSDU-F

Bei der Fremdversorgung mit Nassmischgut erfolgt – unabhängig von einer Spritzbetonförderung im Dicht- oder Dünnstrom – die Anlieferung des erforderlichen Nassmischgutes mit Fahrmischern eines externen Transportbetonwerkes direkt zum Einbauort (z.B. Betonpumpe, Spritzbetonmobil), d.h. eine Lagerung des Mischgutes ist auf der Baustelle nicht erforderlich.

IV.4.2.4 NSDU-F und NSDU-E

Bei der Eigenversorgung mit Nassmischgut erfolgt – unabhängig von einer Spritzbetonförderung im Dicht- oder Dünnstrom – die Anlieferung des erforderlichen Nassmischgutes mit Fahrmischern von der baustelleneigenen Mischanlage direkt zum Einbauort (z.B. Betonpumpe, Spritzbetonmobil), d.h. eine Lagerung des Mischgutes ist auf der Baustelle nicht erforderlich.

IV.4.3 Baustelleneigene Betonmischanlage

IV.4.3.1 Allgemeines

Für eine grundsätzliche Beurteilung der wirtschaftlichen Versorgung der Baustelle mit Spritzbeton bzw. Ortbeton aus einer baustelleneigenen oder externen Mischanlage stellt die erforderliche Gesamtbetonkubatur auf der Baustelle eine grobe Entscheidungsgrundlage dar. Erst ab einer Gesamtbetonkubatur von mehr als 30.000 m³-fest (entspricht der Summe von SpB_{TH2} und OBI gemäß Formel 3) sollte der Einsatz einer baustelleneigenen Mischanlage überhaupt überlegt werden (vgl. IV.2).

Das konkrete Anforderungsprofil an (eigene oder externe) Betonmischanlagen bei der Spritzbetonerzeugung wird in der Richtlinie für Spritzbeton [106] für die einzelnen Spritzbetonsysteme im Punkt 5.1 „Zusammenstellung und Herstellung von Mischgut“ geregelt. Außerdem müssen Betonmischanlagen einer Erstprüfung durch eine akkreditierte Überwachungsstelle unterzogen werden, wobei diese Erstprüfung entsprechend der Richtlinie „Beton – Herstellung, Transport, Einbau und Gütenachweis“ (s. Punkt 5.1) durchzuführen ist.

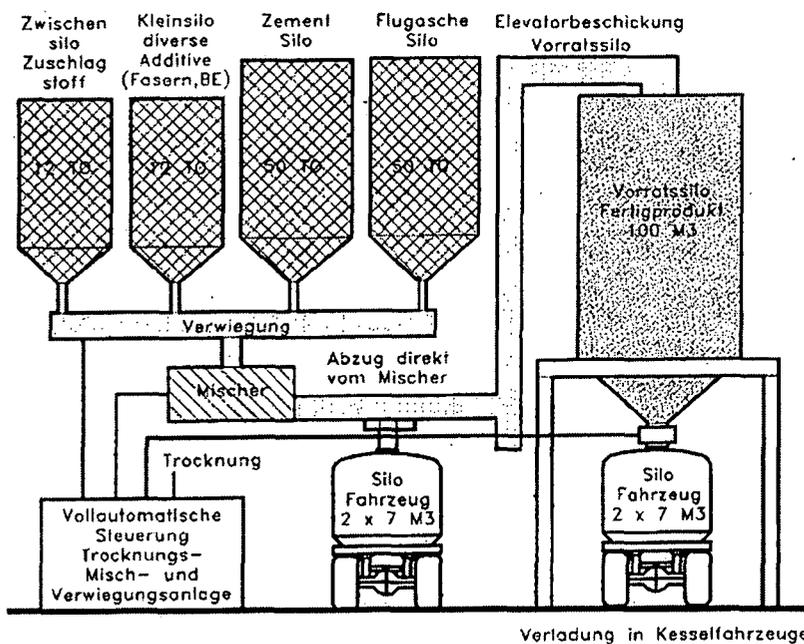
IV.4.3.2 TM-F

Bei der Fremdversorgung mit Trockenmischgut ist keine eigene Betonmischanlage zur Erzeugung des Spritzbetongemisches auf der Baustelle erforderlich.

IV.4.3.3 TM-E

Bei der Eigenversorgung mit Trockenmischgut ist die Nutzung der baustelleneigenen Mischanlage sowohl zur Spritzbetonerzeugung als auch für die Ortbetoninnenschale möglich. Das Anlagenkonzept einer Mischanlage (inkl. vollautomatischer Steuerung, Trocknungs- und Misch- und Verwiegungsanlage) wird in der Abbildung 55 dargestellt.

Anlagenkonzept Mischanlage, Abfüllung



Silos für Einzelkomponenten:

Durch die Pufferung des Zuschlagstoffes über einen kleinen Silo ist der kontinuierliche Parallelbetrieb Trocknungs-/Mischanlage gewährleistet.

Der Kleinsilo für diverse Additive erlaubt gegebenenfalls die Zugabe von Erstarrungsbeschleunigern, Fasern, Rückprallminderern u. dgl.

Verwiegen, Mischen:

Verwiegung der Einzelkomponenten erfolgt vollautomatisch über Computersteuerung, das Zuschalten der Mischanlage analog dem Kiesfüllstand im Zwischensilo. Die Abgabemenge vom Vorratssilo kann wahlweise nach Vorwahl oder effektiv geladener Tonnage erfolgen mit automatischem Lieferscheinausdruck.

Abbildung 55: Anlagenkonzept einer Mischanlage [81]

Die wirtschaftlichen Synergieeffekte, die sich aus dieser gemeinsamen Nutzung der Betonmischanlage ergeben, werden in der Musterkalkulation (s. V) berücksichtigt.

Für die Eigenversorgung mit Trockenmischgut muss die Mischeinrichtung folgende Anforderungen erfüllen (vgl. [106] / Punkt 5.1.1):

- Einrichtung für das trockene Lagern von Zement oder Spritz-Bindemittel und Zusatzstoffen sowie Einrichtungen für das saubere Lagern von Zuschlägen in den jeweiligen Körnungen.
- Waagen für alle Betonausgangsstoffe mit einer Messgenauigkeit von ± 2 Masse-%.
- Dosiereinrichtungen mit einer Zuteilgenauigkeit für den Gesteinskörnung und die übrigen Betonausgangsstoffe von ± 3 Masse-% der abzumessenden Menge.
- Mischmaschine mit ausreichender Mischwirkung, sodass ein homogener Spritzbeton an der Auftragsfläche gewährleistet ist.

IV.4.3.4 FMS-F und FMS-E

Bei den Spritzbetonsystemen FMS-F und FMS-E erfolgt – aufgrund der sehr kurzen Verarbeitungszeit des Spritz-Bindemittels von nur wenigen Minuten - die Mischung von naturfeuchter Gesteinskörnung und Spritzbetonbindemittel direkt vor dem Spritzbetonförderer (z.B. Förderung mit einer Rotorspritzmaschine) in einem Durchlaufmischer nach dem Gegenstromprinzip (vgl. IV.3.6.3). Der Aufbau und Betrieb einer baustelleneigenen Betonmischanlage ist daher nicht notwendig, die Erzeugung des Mischgutes erfolgt vor Ort mit einer mobilen Mischanlage.

IV.4.3.5 NSDI-F und NSDU-F

Bei der Fremdversorgung mit Nassmischgut erfolgt – unabhängig von einer Spritzbetonförderung im Dicht- oder Dünnstrom – die Anlieferung des erforderlichen Nassmischgutes mit Fahrmischern vom baustellenexternen Transportbetonwerk direkt zum Einbauort (z.B. Betonpumpe, Spritzbetonmobil), d.h. eine baustelleneigene Betonmischanlage ist nicht erforderlich.

IV.4.3.6 NSDI-F und NSDU-E

Bei der Eigenversorgung mit Nassmischgut ist die Nutzung der baustelleneigenen Mischanlage sowohl zur Spritzbetonerzeugung als auch für die Ortbetoninnenschale möglich. Die wirtschaftlichen Synergieeffekte, die sich aus dieser gemeinsamen Nutzung der Betonmischanlage ergeben, werden in der Musterkalkulation (s. V) berücksichtigt. Die Mischeinrichtung auf der Baustelle sollte einen möglichst verarbeitungsnahen Standort aufweisen und muss die Anforderungen im Punkt IV.4.3.3 erfüllen.

Zusätzlich sind aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen an das Nassmischgut für die Mischanlage eine elektronische Steuerung mit folgenden Einrichtungen vorgeschrieben, die bei der Erstprüfung der Anlage abzunehmen sind (vgl. [106] / Punkt 5.1.3):

- Automatische Messung des Wassergehaltes des Sandes und Korrektur der Wasserzugabe.
- Soll-Ist-Kontrolle der Einwaage der Betonkomponenten jeder Mischung.
- Messung und Ausdruck der Frischbetontemperatur sowie Angabe der Mischzeit in Chargenprotokollen.
- Datenausdruck: Chargenprotokolle, Wiegeabweichungen (Fehlprotokolle)
- Die Möglichkeit einer statistischen Auswertung wird empfohlen.

Exkurs: Österreichischer Sonderfall - Nassspritzbetonerzeugung mit Fahrmischern

Als „österreichischer“ Sonderfall soll die baustelleneigene Nassspritzbetonerzeugung mit Fahrmischern beim Erkundungsstollen Fiecht in Tirol angeführt werden. In vielen anderen europäischen Ländern (z.B. Italien) wird dieses Verfahren der Nassspritzbetonerzeugung jedoch zu 90 % eingesetzt, aus diesem Grund entschied sich die Bauleitung bei dieser Baustelle für die Anwendung von Nassspritzbeton und entwickelte in Zusammenarbeit mit der PORR - Tochterunternehmung K. Schwarzl Schotter- und Betonwerk und der staatlich akkreditierten Prüf- und Überwachungsstelle MVA Strass folgendes Baustellenkonzept für dieses sogenannte M.I.C. (Mixed in Car) – Verfahren (s. [59]):

- Die Betonausgangsstoffe wurden in einer Dosieranlage (entsprach vom Aufbau her im Wesentlichen einer Mischanlage ohne Zwangsmischer) in der richtigen Menge verwogen und anschließend an einen Fahrmischer übergeben, der eigentliche Mischvorgang erfolgte dann im Fahrmischer selbst.
- Die Dosiersteuerung erfolgte vollautomatisch mit Rezept- und Mischdatenausdruck.
- Eine elektronische Erfassung der Mischzeit im Fahrmischer gewährleistete die Einhaltung der Betongleichförmigkeit.
- Die Fahrmischer wiesen einen sehr guten Mischerschaufelzustand und eine spezielle Mischerschaufelanordnung auf.
- Die Silos für Gesteinskörnung und Bindemittel waren mit einem Abzugsband und integrierter Dosiersteuerung ausgestattet.
- Die Wasserdosiereinrichtung mit einem integrierten Fließmitteltank war elektronisch über die Kies- und Zementdosierung gesteuert.

Nachdem das M.I.C.–Verfahren beim Erkundungsstollen Fiecht das erste Mal in Österreich eingesetzt wurde, liegen noch keine abgesicherten Daten über den wirtschaftlichen Einsatz dieses Verfahrens der Spritzbetonerzeugung ohne baustelleneigener Mischanlage bei

anderen Baustellen vor. Daher wird dieses Verfahren in der gegenständlichen Arbeit zwar angeführt und kurz erläutert, allerdings findet es keinen Eingang in die Musterkalkulation und wird damit in weiterer Folge auch nicht im Entscheidungshilfesystem zur Auswahl eines Spritzbetonverfahrens berücksichtigt.

Ende Exkurs

IV.4.4 Baustelleneigene Gesteinskörnungsaufbereitung und -trocknung

IV.4.4.1 Allgemeines

Die Frage nach der Wirtschaftlichkeit einer baustelleneigenen Aufbereitungsanlage für Gesteinskörnungen stellt sich nur bei Spritzbetonsystemen mit Eigenversorgung (TM-E, FMS-E, NSDI-E und NSDU-E) und nur dann, wenn folgende Punkte erfüllt sind:

- Die Errichtung und der Betrieb einer eigenen Betonmischanlage sind unbedingt erforderlich (z.B. bei Hochgebirgsbaustellen oder bei Baustellen mit beschränkten Zufahrtsmöglichkeiten durch Wochenend- und Nachtfahrverbote) oder die Spritzbetonproduktion ist in einem externen Betonmischwerk wirtschaftlicher (vgl. auch IV.4.3.1).
- Die Aufbereitung von Zuschlägen aus gewonnenem Material (z.B. Aufbereitung von Ausbruchsmaterial bei Tunnelbaustellen, Aufbereitung von Zuschlägen in einem baustelleneigenen Kieswerk oder Steinbruch) ist für die Spritzbetonproduktion aufgrund baustellenspezifischer Randbedingungen unbedingt erforderlich.
- Die baustelleneigene Aufbereitung ist wirtschaftlicher als der Zukauf von Zuschlägen eines externen Kieswerkes.
- Das aufbereitete Material erfüllt die Anforderungen an Zuschläge entsprechend der Richtlinie für Spritzbeton und es kann so in Korngruppen aufgeteilt werden, dass der Regelbereich der Gesamtsieblinie gemäß Tabelle 4/3 der Richtlinie für Spritzbeton eingehalten werden kann (vgl. [106] / Punkt 4.3).

IV.4.4.2 TM-F, FMS-F, NSDI-F und NSDU-F

Bei sämtlichen Spritzbetonsystemen mit Fremdversorgung ist eine baustelleneigene Gesteinskörnungsaufbereitung inklusive einer eventuell erforderlichen Trocknung nicht notwendig. Im Regelfall führt der Lieferant die Aufbereitung und Trocknung der Gesteinskörnung durch und legt die anteiligen Geräte-, Personal- und Energiekosten auf das Fertigmischgut um.

IV.4.4.3 TM-E

Das Anlagenkonzept einer Trocknungsanlage wird am Beispiel des Lainbergtunnels (Phyrnautobahn / Österreich) in der Abbildung 56 dargestellt. Die angelieferten

Gesteinskörnungen müssen bei diesem System auf eine Restfeuchte von $< 0,2$ Masse-% getrocknet und mit Spritzbetonbindemittel gemischt werden.

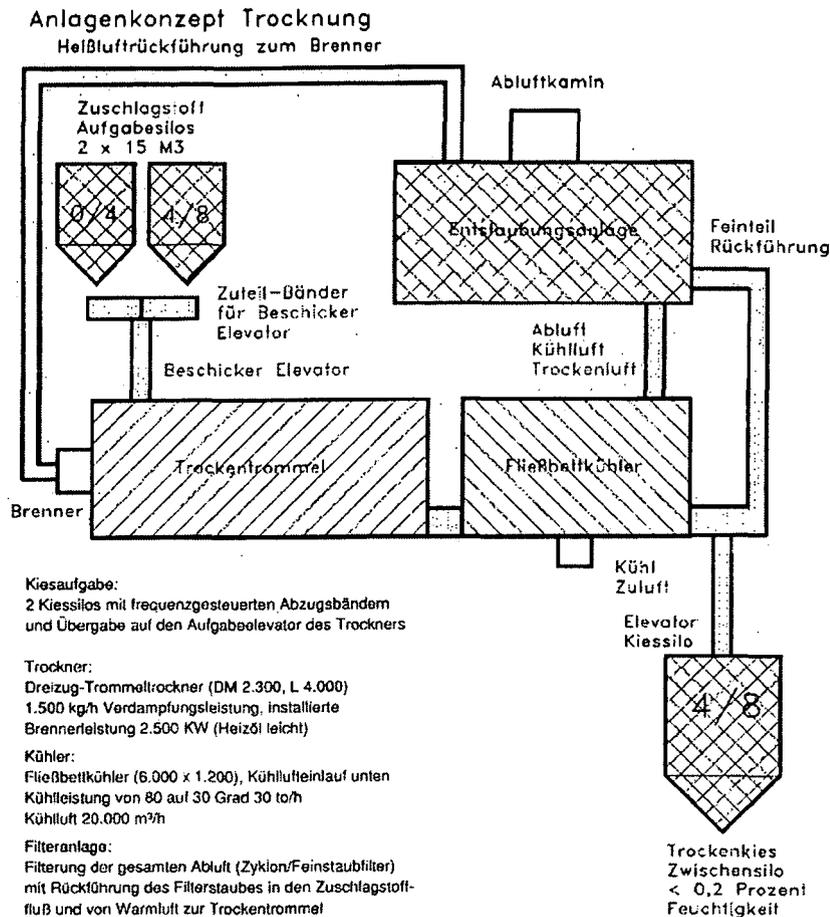


Abbildung 56: Anlagenkonzept einer Trocknungsanlage [81]

Die nach Kornfraktionen (0/4 und 4/8 mm) gelagerten Zuschläge werden von den Vorratssilos über Zuteilbänder einer Trockentrommel zugeführt. Bei einer Trocknungsleistung von mindestens 30 t Gesteinskörnung pro Stunde und einer Gesteinskörnungseigenfeuchte von 5 Masse-% ist bei der gegenständlichen Anlage eine installierte Brennerleistung des Trockners von ca. 2.500 kW erforderlich. Für die Bemessung der Brennerleistung kann daher ein Richtwert von rund 80 kWh/t (= 2.500 kW / 30 t/h) angesetzt werden.

Durch die Gesteinskörnungstrocknung überschreitet die Verarbeitungstemperatur der Zuschläge die in der Richtlinie für Spritzbeton geforderte Obergrenze von 40 °C (vgl. [106] / Tabelle 5/3). Um diese Temperaturobergrenze einzuhalten, sind die nachfolgenden Maßnahmen möglich:

- Die Trocknungseinrichtung wird groß dimensioniert, sodass mit niedrigen Temperaturgradienten gearbeitet werden kann.
- Ein Zwischenlager zur Abkühlung der Zuschläge wird in der Baustelleneinrichtung berücksichtigt.

- Ein Kühler (z.B. Fließbett- oder Trommelkühler) wird der Trocknungsanlage nachgeschaltet. Am Lainbergtunnel betrug bei einem Massendurchsatz von 30 t Gesteinskörnung pro Stunde und einer Kühlleistung von 80° C auf 30° C der Kühlluftbedarf 20.000 m³/h [81].

Es ergeben sich durch die Einrichtung und den Betrieb einer eigenen Trocknungsanlage auf der Baustelle sehr hohe Kosten, wodurch sich solche Anlagen erst ab einer höheren Spritzbetonmenge rechnen. Hohe Vorhalte- und Betriebsstoffkosten machen dieses System der Gesteinskörnungstrocknung für kleinere Tunnelbaustellen unwirtschaftlich [145].

IV.4.4.4 FMS-E

Bei diesem Spritzbetonsystem ist die baustelleneigene Aufbereitung von Zuschlägen möglich, in der Regel wird keine Trocknung der Zuschläge (Gesteinskörnungseigenfeuchte innerhalb einer Bandbreite von 2 bis 4 Masse-% möglich) erforderlich sein. Es gelten sinngemäß die Aussagen der Punkte IV.4.4.1 und IV.4.4.3.

IV.4.4.5 NSDI-E und NSDU-E

Bei den Nassspritzsystemen mit Eigenversorgung ist die baustelleneigene Aufbereitung von Zuschlägen möglich, in der Regel wird keine Trocknung der Zuschläge (Gesteinskörnungseigenfeuchte < 8 Masse-%) erforderlich sein. Es gelten sinngemäß die Aussagen der Punkte IV.4.4.1 und IV.4.4.3.

IV.4.5 Bewetterung

Aus der unterschiedlichen Staubentwicklung an der Spritzdüse resultieren bei den einzelnen Spritzbetonsystemen unterschiedliche Anforderungen an das Bewetterungssystem und mögliche Gesundheitsgefährdungen des Düsenführers bzw. der Mineure in unmittelbarer Nähe der Ortsbrust. Die Staubentwicklung und deren Folgen werden für die einzelnen Spritzbetonsysteme detailliert im Punkt I.1.1 erläutert.

IV.4.5.1 TM-F und TM-E

Bei der Anwendung des Trockenspritzverfahrens mit ofentrockenem Mischgut ist insbesondere bei Hohlraumbauwerken mit Querschnitten von weniger als 20 m² mit einer hohen Staubentwicklung am Spritzbetoneinbauort zu rechnen (vgl. I.1.1). Daraus resultieren hinsichtlich der Bewetterung

- einerseits Nachteile am Einbauort (z.B. mangelhafter Spritzbetonauftrag durch schlechte Sichtbedingungen für den Düsenführer) und
- andererseits der höchste Energie- und Kostenaufwand gegenüber allen anderen Spritzbetonverfahrenstechniken.

IV.4.5.2 FMS-F und FMS-E

Der Energie- und Kostenaufwand für die Bewetterung ist beim Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen aufgrund der geringeren Staubentwicklung an der Spritzdüse geringer als bei den Spritzbetonsystemen TM-F und TM-E, liegt aber über den Werten des Nassspritzverfahrens.

IV.4.5.3 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDI-E

Die Nassspritzverfahren – unabhängig von einer Spritzbetonförderung im Dicht- oder Dünnstrom – zeichnen sich durch die geringste Staubentwicklung sämtlicher Spritzbetonsysteme am Einbauort aus. Dadurch ist im Vergleich zu allen anderen Spritzbetonsystemen vom geringsten Energie- und Kostenaufwand für die Bewetterung auszugehen.

IV.4.6 Druckluft- und Energiebedarf

IV.4.6.1 Allgemeines

Bei der Spritzbetonförderung im Dünnstrom ist aufgrund der pneumatischen Förderung des Mischgutes sowohl bei den Trockenspritzverfahren (TM und FMS) als auch beim Nassspritzverfahren (NSDU) von einem großen Druckluftbedarf auszugehen. Die Druckluft dient bei der Dünnstromförderung nicht nur als reines Transportmedium, sondern auch zur Vermengung der Spritzbetonausgangsstoffe in der Förderleitung. Der Leistungsbedarf an der Spritzmaschine selbst ist bei der Dünnstromförderung allerdings gering. Im Gegensatz dazu ist bei der Dichtstromförderung aufgrund der hydraulischen Förderung des Nassmischgutes (NSDI) von einem geringen Druckluftbedarf auszugehen; der Energieaufwand zur Erzeugung der Förderleistung ist an der „Spritzmaschine“ (Betonpumpe) jedoch deutlich höher als bei einer Dünnstromförderung (vgl. auch [85]).

IV.4.6.2 TM-F und TM-E

Bei der pneumatischen Förderung von ofentrockenem Mischgut sind hohe Druckluftleistungen von bis zu 25 m³/min bei einem üblichen Betriebsdruck von ca. 7,0 bar erforderlich. Es müssen daher leistungsfähige Kompressoren mit entsprechend hohem Energieverbrauch eingesetzt werden, wobei sich die erforderliche Lieferkapazität des Kompressors nach den folgenden Parametern richtet:

- Förderleistung der Spritzmaschine,
- Durchmesser der Schlauchleitungen,
- Förderhöhe (Höhenunterschied zwischen Spritzbetonmaschine und Einbauort) und
- Förderleitungslänge.

Eine zu große Luftmenge bei der pneumatischen Förderung führt zu einer starken Verwirbelung der Feinpartikel und damit zu einer Zunahme der Staubeentwicklung. Bei einer zu geringen Luftmenge ist die Gefahr von Verstopfern in der Förderleitung oder eine ungenügende Verdichtung am Spritzbetoneinbauort gegeben. Bei der Verwendung von ofentrockenem Mischgut ist unbedingt mit „trockener“ Druckluft zu arbeiten, damit es nicht bereits in der Förderleitung aufgrund der Feuchtigkeit der Förderluft zu unerwünschten chemischen Vorreaktionen des Mischgutes kommt.

Bei einer Bewertung des Energieaufwands für die unterschiedlichen Spritzbetonsysteme ist beim Verfahren TM-E auch der Betrieb einer eventuell erforderlichen baustelleneigenen Trocknungsanlage der Gesteinskörnung zu berücksichtigen (s. IV.4.4.3).

IV.4.6.3 FMS-F und FMS-E

Es gelten hinsichtlich des Druckluft- und Energiebedarfes sinngemäß die Aussagen des Punktes IV.4.6.2. Aufgrund der pneumatischen Förderung des Mischgutes ist von einem hohen Druckluftbedarf (ca. 15 m³/min bei ca. 6 bar) auszugehen, der Leistungsbedarf der Spritzmaschine ist gering.

IV.4.6.4 NSDI-F und NSDI-E

Beim Dichtstromverfahren ist der Druckluftbedarf aufgrund der hydraulischen Förderung des Nassmischgutes mittels Kolbenpumpen sehr gering. Druckluft wird bei den Verfahren NSDI lediglich zur Beschleunigung des Mischgutes an der Spritzdüse benötigt, um die nötige Anwurfgeschwindigkeit zu erreichen und damit eine optimale Verdichtung bei möglichst geringem Rückprall zu erzielen.

Der Druckluftbedarf beim Nassspritzverfahren kann mit ca. 11,0 m³/min bei einem Betriebsdruck von 5,5 bar abgeschätzt werden [72]. Der Leistungsbedarf der Spritzgeräte (Betonpumpe) ist aufgrund der hydraulischen Förderung des Mischgutes niedriger als bei den Trockenspritzverfahren.

IV.4.6.5 NSDU-F und NSDU-E

Es gelten hinsichtlich des Druckluft- und Energiebedarfes sinngemäß die Aussagen für die Trockenspritzverfahren (s. IV.4.6.2 und IV.4.6.3). Aufgrund der pneumatischen Förderung des Mischgutes ist von einem Druckluftbedarf bis zu ca. 15 m³/min bei einem Förderdruck von ca. 4-7 bar auszugehen (vgl. auch IV.3.6.5). Der Leistungsbedarf der Spritzmaschine ist gering.

IV.4.7 Materialtransport und Materialumschlag

IV.4.7.1 TM-F und TM-E

Bei einer Fremdversorgung mit Trockenmischgut erfolgt der Materialtransport zur Baustelle entweder mit speziellen Silofahrzeugen (s. Abbildung 43) oder es wird bereits im externen Betonwerk das Fertigmischgut in Silos abgefüllt, die dann zur Baustelle transportiert und dort aufgestellt werden. Bei einer Eigenversorgung mit Mischgut braucht der Materialtransport zur Baustelle nicht berücksichtigt werden.

Der Transport des Mischgutes vom Silo unmittelbar zum Spritzbetoneinbauort erfolgt mit TM-Mobilen (Abbildung 14). Um die Gefahr von Entmischungen zu vermeiden, muss das mehrmalige Umfüllen bzw. Umblasen des Mischgutes im System „Silofahrzeug – Silo – TM-Mobil – Spritzbetonleitung“ vermieden werden.

IV.4.7.2 FMS-F und FMS-E

Nachdem die Spritzbetonproduktion erst direkt am Einbauort mit einer mobilen Mischanlage erfolgt, ist auf der Baustelle kein Mischguttransport erforderlich. Das Bindemittel wird mit Silofahrzeugen vom Bindemittelsilo zur mobilen Mischanlage transportiert und dort in den dafür vorgesehenen Vorratsbehälter umgeblasen. Die Zwischenlagerung von 3 bis 4 Tagesrationen an Zuschlägen erfolgt im Tunnel, der Mobile Mischanlage wird nach Bedarf mittels Radlader mit Gesteinskörnung befüllt.

Hinsichtlich oftmaliger Umschläge des Mischgutes ergeben sich bei diesem Verfahren keine Probleme.

IV.4.7.3 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Der Transport des Nassmischgutes – unabhängig von einer Spritzbetonförderung im Dicht- oder Dünnstrom – erfolgt entweder mit Fahrmischern eines externen Transportbetonwerkes (bei NSDI-F und NSDU-F) oder mit baustelleneigenen Fahrmischern (NSDI-E und NSDI-F). Für eine störungsfreie Versorgung der Baustelle mit Nassmischgut durch ein externes Transportbetonwerk sind folgende Gesichtspunkte zu beachten:

- Durchlaufende Arbeitszeiten der Baustellen,
- die geforderte Spritzbetonqualität,
- der Transport durch bewohntes Gebiet und
- sonstige rechtlich festgelegte Transportbestimmungen (insbesondere Nacht- und Wochenendfahrverbote beachten).

Hinsichtlich oftmaliger Umschläge des Mischgutes ergeben sich bei diesen Verfahren keine Probleme.

IV.4.8 Platzbedarf – Baustelleneinrichtung und Vortrieb

IV.4.8.1 Allgemeines

Für den Flächenbedarf einer eigenen Betonmischanlage bei Tunnelbauwerken kann nach Eber [111] nach Untersuchungen an deutschen Eisenbahntunneln ein Richtwert von 60 m² angenommen werden, der Lagerflächenbedarf für Baustoffe und Geräte (d.h. Lagerflächen für Zuschläge, Bindemittel, Bewehrung, Abstellplätze für Baugeräte) bewegt sich innerhalb einer Bandbreite von 1.400 bis 1.800 m². Der unterschiedliche Flächenbedarf für die Baustelleneinrichtung wird für die einzelnen Spritzbetonsysteme in der Kostenkalkulation monetär bewertet und fließt somit in weiterer Folge auch in die Nutzwertanalyse ein.

IV.4.8.2 TM-F und TM-E

Beim Spritzbetonsystem TM-F ist der Platzbedarf an Baustelleneinrichtungsfläche für die Lagerung des Mischgutes (Silolagerung!) als gering zu bewerten. Die Größe und Anzahl der Silos ist auf den maximalen Spritzbetonbedarf der Baustelle abzustimmen, insbesondere Wochenend- und Nachtfahrverbote für die Zulieferung des Fertigmischgutes sind zu beachten.

Bei einer Eigenversorgung mit Spritzbeton ist eine baustelleneigene Betonmischanlage (eventuell erfolgt auch die Aufbereitung von Gesteinskörnung direkt auf der Baustelle, dann muss flächenmäßig auch eine baustelleneigene Trocknungsanlage berücksichtigt werden) zu errichten und zu betreiben. Es ist daher bei diesem Verfahren von einem hohen Platzbedarf für die Materialzwischenlagerung und die Mischguterzeugung auszugehen.

Aufgrund der Gerätedisposition – die TM-Mobile sind mobil und fahren direkt zum Spritzbetoneinbauort - ergibt sich für dieses Verfahren im unmittelbaren Vortriebsbereich nur ein geringer Platzbedarf.

IV.4.8.3 FMS-F und FMS-E

Bei den Spritzbetonsystemen FMS-F und FMS-E erfolgt die Mischguterzeugung direkt vor Ort mit einer mobilen Mischanlage (s. IV.3.6.3), d.h. bei beiden Verfahren – unabhängig von Eigen- oder Fremdversorgung – müssen auf der Baustelle Lagerungsmöglichkeiten für Bindemittel und Zuschläge vorgesehen werden (s. IV.4.1.4).

Die Lagerung der Bindemittel erfolgt in jedem Fall in baustelleneigenen Silos in der Nähe des Tunnelportals, wobei deren Größe und Anzahl nach dem erforderlichen Spritzbetonbedarf (Wochenend- und Nachtvorrat) zu bemessen ist. Die Lagerung der Zuschläge kann bei

beiden Spritzbetonsystemen in Silos oder einfacher und kostengünstiger auf einer Zwischendeponie im Tunnel – ca. 300 bis 1.000 m hinter der Spritzanlage - erfolgen.

Nachdem ein Zwischenlager im Tunnel geschaffen werden muss und der „Mobile Mischanlage“ dem Vortrieb nachgezogen wird, ist im unmittelbaren Vortriebsbereich ein großer Platzbedarf erforderlich. Beengte Platzverhältnisse (z.B. Stollen) machen die Anwendung dieses Spritzbetonsystems schwierig, wenn nicht sogar unmöglich (z.B. Ulmenstollenvortrieb).

IV.4.8.4 NSDI-F und NSDU-F

Bei einer Fremdversorgung mit Nassmischgut ist keine Baustelleneinrichtungsfläche für die Spritzbetonproduktion vorzusehen, da das Nassmischgut mittels externen oder eigenen Fahrmischern direkt zum Einbauort transportiert wird.

Im unmittelbaren Vortriebsbereich kann sich – insbesondere bei kleinen Vortriebsquerschnitten und schlechten Vortriebsbedingungen - der große Platzbedarf für den Spritzmanipulator und die Fahrmischer nachteilig gegenüber den Trockenspritzverfahren auswirken.

IV.4.8.5 NSDI-E und NSDU-E

Bei einer Eigenversorgung mit Spritzbeton ist eine baustelleneigene Betonmischanlage (eventuell erfolgt auch eine eigene Gesteinskörnungsaufbereitung) zu errichten und zu betreiben. Es ist daher bei diesem Verfahren von einem hohen Platzbedarf für die Materialzwischenlagerung und die Mischguterzeugung auszugehen.

Hinsichtlich des Platzbedarfes im unmittelbaren Vortriebsbereich gelten die Aussagen im Punkt IV.4.8.4.

IV.4.9 Zusammenfassung

Die Zielerträge hinsichtlich der Baustelleneinrichtung für die in diesem Kapitel angeführten Beurteilungskriterien sind übersichtlich in einer Zielertragsmatrix dargestellt. Diese Zielertragsmatrix bildet in weiterer Folge die Grundlage zur Bewertung der Verfahren und ist in der Tabelle 19 dargestellt.

Beurteilungskriterien	TM – F	TM – E	FMS - F	FMS - E	NSDI – F	NSDI – E	NSDU – F	NSDU – E
Art der Lagerung Bindemittel	-	Silo	Silo		-	Silo	-	Silo
Art der Lagerung Mischgut und Lagerfähigkeit	Silo – Zusatzmaßnahmen gegen Entmischung erforderlich - Lagerfähigkeit des Mischgutes bis zu 3 Monate – Wochenendvorrat kein Problem		Mischgut wird direkt vor Ort erzeugt – keine Lagerung erforderlich		Mischgut von Betonwerk angeliefert – keine Lagerung – Wochenendfahrverbote beachten	Mischgut von baustelleneigener Mischanlage angeliefert – keine Lagerung	Mischgut von Betonwerk angeliefert – keine Lagerung – Wochenendfahrverbote beachten	Mischgut von baustelleneigener Mischanlage angeliefert – keine Lagerung
Art der Lagerung Gesteinskörnung	-	Silo, geschützte Lagerung	Silo, geschützte Lagerung (nur Maßnahmen im feuchten Tunnel und bei Außenlager erforderlich) – Wochenendvorrat kein Problem		-	Silo, geschützte Lagerung	-	Silo, geschützte Lagerung
Baustelleneigene Betonmischanlage	-	Erforderlich, Nutzung für Innenschalenbeton möglich	Nein – Mischguterzeugung vor Ort mit mobiler Mischanlage		-	Erforderlich (Sonderfall: Mischung im Fahrmischer), Nutzung für Innenschalenbeton möglich	-	Erforderlich (Sonderfall: Mischung im Fahrmischer), Nutzung für Innenschalenbeton möglich
Baustelleneigene Zuschlagsaufbereitung und -trocknung	-	Möglich, Gesteinskörnungstrocknung erforderlich	-	Möglich, eventuell Gesteinskörnungstrocknung erforderlich	-	Möglich	-	Möglich
Bewetterung	Hohe Staubentwicklung erfordert sehr gute Belüftung – Mehrkosten		Geringere Staubentwicklung als bei TM – höherer Energieaufwand als bei NSDU/NSDI		Geringe Staubentwicklung führt zu geringem Energieaufwand für die Bewetterung			
Druckluftbedarf	Hoch – pneumatische Förderung über Dosierblasschnecke		Hoch – pneumatische Förderung über Spritzmaschine + Vermengung der Ausgangsstoffe		Gering – hydraulische Förderung über Kolbenpumpe		Höher als beim NSDI – 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	
Materialtransport	Silo-LKW für Mischgut		Silo-LKW für Bindemittel, LKW für Gesteinskörnung		Fahrmischer			
Materialumschlag	Durch mehrmaliges Umfüllen und Umlasen Gefahr von Entmischungen!		Kein Problem		Kein Problem			
Platzbedarf (Baustelleneinrichtung)	Gering	Hoher Platzbedarf für Materialzwischenlagerung und Mischguterzeugung	Gering		-	Hoher Platzbedarf für Materialzwischenlagerung und Mischguterzeugung	-	Hoher Platzbedarf für Materialzwischenlagerung und Mischguterzeugung
Platzbedarf (Tunnel)	Gering		Hoch – beengte Verhältnisse problematisch (z.B. Ulmenstollen)		Hoher Platzbedarf für Spritzmanipulator und Fahrmischer bei engen Vortrieben im schlechten Gebirge			

Tabelle 19: Zielertragsmatrix Baustelleneinrichtung

IV.5 Betontechnologie

Im gegenständlichen Kapitel „Betontechnologie“ werden die nachfolgenden Beurteilungskriterien für die einzelnen Spritzbetonverfahren herausgearbeitet:

- Zunächst werden die unterschiedlich erforderlichen Anforderungen an die Spritzbetonausgangsstoffe (Bindemittel, Gesteinskörnung, Zusatzmittel und Zusatzstoffe) analysiert.
- Anschließend werden für das jeweilige Spritzbetonsystem die Festigkeitsentwicklung (Früh- und Endfestigkeit) und die Verarbeitungszeit des Spritzbetons untersucht und miteinander verglichen.
- Schlussendlich werden beispielhaft Mischgutrezepturen für die einzelnen Verfahren angegeben.

Übersichtlich dargestellt werden die Beurteilungskriterien in einer Zielertragsmatrix für die Betontechnologie in der Tabelle 21.

IV.5.1 Bindemittel

IV.5.1.1 Allgemeines

Als Bindemittel für Spritzbeton werden entweder

- **Portland- bzw. Tunnelzemente** in Verbindung mit hydraulisch wirksamen Zusatzstoffen (meist pulverförmige Zusätze oder Suspensionen, die bei richtiger Dosierung durch chemische und/oder physikalische Wirkung bestimmte Betoneigenschaften beeinflussen) oder
- **Spritz-Bindemittel** (Sammelbegriff für schnell erstarrende Bindemittel, die ohne weitere Zugabe von Zusatzmitteln das erforderliche Erstarren und eine rasche Festigkeitsentwicklung gewährleisten)

verwendet.

Portlandzemente zur Spritzbetonerzeugung müssen die Anforderungen der ÖNORM EN 197-1 und zusätzlich die darüber hinausgehenden Qualitätsanforderungen der Richtlinie für Spritzbeton (s. [106] / Punkt 4.1.1) und der ÖNORMEN B 3327-1 erfüllen. Als **Tunnelzemente** werden Portlandzemente mit einem Anteil von 15 % an Zumahlstoffen bezeichnet, die die entsprechenden Qualitätsanforderungen der ÖNORM EN 197-1 und von [106] erfüllen.

Um die für Spritzbeton erforderliche Festigkeit des Jungen Spritzbetons (vgl. IV.2.1.2) zu erreichen, werden bei der Verwendung von Portland- bzw. Tunnelzementen alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger zugegeben.

Spritz-Bindemittel sind Schnellzemente, die so eingestellt sind, dass sie nach wenigen Sekunden bis Minuten zu erstarren und erhärten beginnen und somit – im Gegensatz zur Verwendung von Portland- bzw. Tunnelzementen - keinerlei Zugabe von Erstarrungsbeschleunigern bedürfen. Es sind somit beim Einsatz von Spritz-Bindemitteln keine Dosiergeräte für die Zugabe der Erstarrungsbeschleuniger erforderlich. Nachdem das Spritzbindemittel bei Kontakt mit Wasser sehr rasch reagiert, ist ein konventionelles Mischen mit feuchten Zuschlägen nicht möglich.

Grundsätzlich sind zwei Arten von Spritzbindemitteln zu unterscheiden (vgl. [106], [68], [52]):

- **Spritz-Bindemittel SBM-T:** Dieser Bindemitteltyp wird in der Regel durch die Rücknahme oder durch gänzlich Weglassen des Gipses im Zement hergestellt und zeichnet sich durch einen Erstarrungsbeginn von wenigen Sekunden bis etwa einer Minute nach dem Kontakt mit Wasser aus. SBM-T ist feuchtigkeitsempfindlich und kann daher nur in Verbindung mit ofentrockenen Zuschlägen (< 0,2 Masse-% Wassergehalt) verarbeitet werden. Vielfach reagieren diese Bindemittel so schnell mit Wasser, dass auch eine Vorbefeuchtung des Mischgutes zur Reduzierung der Staubentwicklung an der Düse nicht möglich ist. Daher müssen aufgrund der Staubanfälligkeit der ofentrockenen Mischung geschlossene Systeme, z.B. Silo- TM-Mobil - Ausblasschnecke – eingesetzt werden.
- **Spritzbindemittel SMB-FT:** Der Erstarrungsbeginn dieses Bindemitteltyps liegt nach dem Kontakt mit Wasser über 90 Sekunden (i.d.R. 2 bis 7 min Verarbeitungszeit); es kann somit auch in Verbindung mit erdfeuchten Zuschlägen (Gesteinskörnungseigenfeuchte zwischen 2 bis 4 Masse-% Wassergehalt) verarbeitet werden. Für diesen Bindemitteltyp muss die Verfahrenstechnik auf die rasche Kontaktzeit des Bindemittels im System Mischer – Spritzmaschine - Förderschlauch abgestimmt werden, ein spezielles Durchlaufmischverfahren mit sofortiger anschließender Spritzbetonverarbeitung ist dafür erforderlich.

Bei der Verarbeitung von Spritzbeton mit Spritzbindemitteln (SBM-T und SMB-FT) ist insbesondere zu beachten, dass für jedes SBM ein Merkblatt vorliegt, in dem Aussagen über zulässige Reaktionszeiten, Gesteinskörnungsfeuchte, Gesteinskörnungstemperatur, Verarbeitungstemperatur und Anforderungen hinsichtlich Luftfeuchtigkeit beim Einblasen vom Hersteller anzugeben sind [106].

IV.5.1.2 TM-F und TM-E

Bei den Spritzbetonverfahren mit ofentrockenem Mischgut wird i.d.R. der Bindemitteltyp SMB-T verwendet, dadurch ist keine Zugabe von Erstarrungsbeschleunigern oder anderen Zusatzmitteln an der Spritzdüse erforderlich. Der Spritzbindemittelgehalt liegt innerhalb einer Bandbreite von 300 bis 400 kg/m³ Spritzbeton [85].

IV.5.1.3 FMS-F und FMS-E

Bei der Verwendung von erdfeuchten Zuschlägen kommt beim Trockenspritzverfahren der Spritzbindemitteltyp SMB-FT zum Einsatz, SMB-T kann aufgrund seiner raschen Reaktionszeit von unter einer Minute bei diesem Spritzbetonverfahren nicht verarbeitet werden. Es ist – analog zu den Verfahren TM-F und TM-E - keine Zugabe von Erstarrungsbeschleunigern oder anderen Zusatzmitteln an der Spritzdüse erforderlich. Der Spritzbindemittelgehalt liegt bei diesen Spritzbetonsystemen innerhalb einer Bandbreite von 300 bis 400 kg/m³ Spritzbeton [85].

IV.5.1.4 NSDI-F und NSDI-E

Als Bindemittel werden bei den Nassspritzverfahren mit Dichtstromförderung Portland- oder Tunnelzemente verwendet, die Anwendung von Spritzbindemitteln ist bei diesen Verfahren zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich. Zur Erreichung der nach [106] geforderten Festigkeit des Jungen Spritzbetons müssen alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger dem Nassmischgut beigemischt werden. Der Bindemittelgehalt liegt innerhalb einer Bandbreite von 330 bis 450 kg/m³ Spritzbeton [85].

IV.5.1.5 NSDU-F und NSDU-E

Hinsichtlich des Bindemittels gelten für die Dünnstromförderung sinngemäß die Aussagen im Punkt IV.5.1.4. Der Bindemittelgehalt liegt jedoch unter den Werten für das Dichtstromverfahren und bewegt sich innerhalb einer Bandbreite von 270 bis 400 kg/m³ Spritzbeton [85].

IV.5.2 Frühfestigkeit

IV.5.2.1 Allgemeines

Unter der Frühfestigkeit versteht man die Festigkeit des Spritzbetons im Alter bis 24 Stunden (Definitionen und Druckfestigkeitsverläufe sind im Punkt IV.2.1.2 der gegenständlichen Arbeit dargestellt). Eine entsprechende Festigkeitsentwicklung in den ersten Minuten nach dem Spritzbetonauftrag muss mit den unterschiedlichen Spritzbetonverfahren erreicht werden, um

- den Sicherheitsanspruch der Vortriebsmannschaft bei den Ausbruchsarbeiten zu erfüllen,

- einen wirtschaftlichen Spritzbetonauftrag über Kopf zu gewährleisten,
- starke Staub- und Rückprallentwicklungen durch zu hohe Frühfestigkeiten zu verhindern
- bei oberflächennahen Tunneln ein rasches Tragvermögen der Spritzbetonschale zu ermöglichen und
- auch unter ungünstigen Vortriebsbedingungen, wie z.B. bei großem Wasserandrang, bei oberflächennahen Tunneln oder bei Vortrieben in Lockergestein, ansprechende Vortriebsleistungen zu erzielen.

IV.5.2.2 TM-F und TM-E

Bei den Spritzbetonverfahren mit ofentrockenem Mischgut werden generell Frühfestigkeiten im Bereich J2 bis J3 erreicht [81], [141]. Sind ungünstige Vortriebsbedingungen bereits vorab bekannt (z.B. prognostizierter höherer Wasserandrang in einem bestimmten Vortriebsbereich), dann kann das Spritzbindemittel SBM-T auch auf die Frühfestigkeitsklasse J3 eingestellt werden.

In der Abbildung 57 sind die charakteristischen Verläufe der Frühfestigkeitsentwicklung von Trockenspritzbeton mit ofentrockenem und erdfeuchtem Mischgut graphisch einander gegenübergestellt.

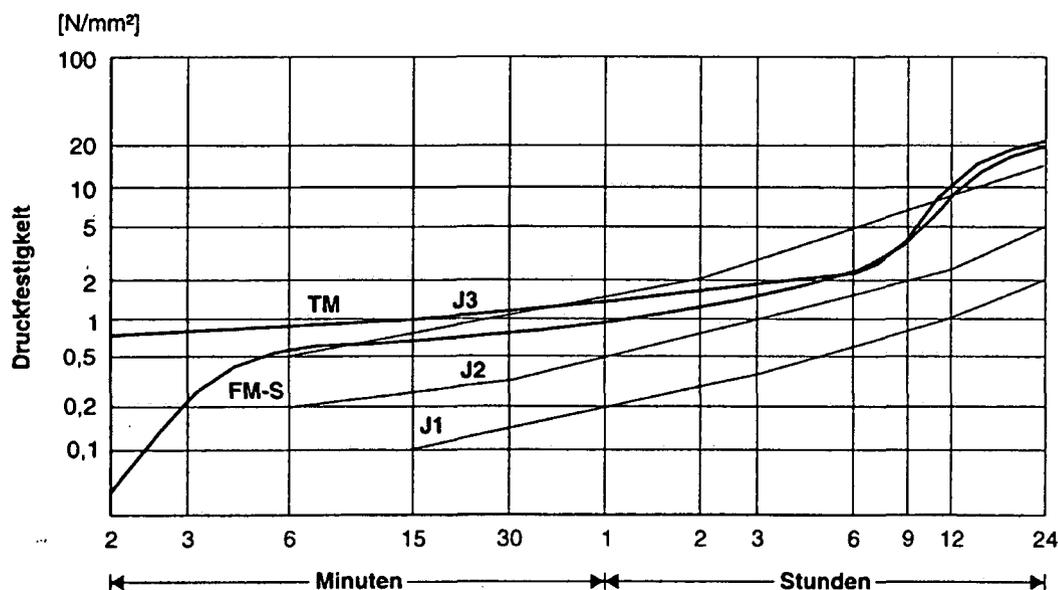


Abbildung 57: Charakteristische Kurve der Frühfestigkeitsentwicklung von Trockenspritzbeton mit ofentrockenem und erdfeuchtem Mischgut [52]

Bei der Verwendung von SBM-T zeigt sich nach einem extrem raschen Festigkeitsanstieg auf ca. 1 N/mm² nach 2 bis 6 Minuten Reaktionszeit eine Ruhepause, die bis zu 6 Stunden andauern kann. Erst danach kommt es wieder zu einem deutlichen Anstieg in der Festigkeitsentwicklung.

Die erzielbaren Frühfestigkeiten erlauben bei diesem Verfahren schnell und effektiv auf unvorhersehbare Ereignisse, wie z.B. hohen Wasserandrang oder nachbrechendes Gebirge, zu reagieren und auch über Kopf dicke Spritzbetonschichten aufzutragen.

Bedingt durch zu hohe Frühfestigkeiten besteht aber andererseits auch die Gefahr von Spritzschatten und erhöhtem Rückprall.

IV.5.2.3 FMS-F und FMS-E

Die Frühfestigkeitsentwicklung des Spritzbetons mit Feuchtmischgut liegt im Bereich der Kurven J2 und J3 der österreichischen Richtlinie für Spritzbeton [100]. Durch die Produktion des Mischgutes vor Ort kann die Frühfestigkeitsentwicklung durch Veränderung der Mischgutzusammensetzung auch auf die unterschiedlichen Anforderungen aus Geologie und Baubetrieb abgestimmt werden.

In der Abbildung 57 zeigt sich, dass sich bei der Verwendung von SBM-FT in den ersten Minuten eine stetige Zunahme der Festigkeit von 0,05 auf 0,5 N/mm² nach 6 Minuten ergibt. Für den Zeitraum zwischen 6 Minuten und 6 Stunden nach dem Spritzbetonauftrag erhöht sich die Druckfestigkeit nur langsam, danach kommt es – in Analogie zur Festigkeitsentwicklung bei der Verwendung von ofentrockenem Mischgut – wieder zu einer deutlichen Festigkeitszunahme.

Bei den Spritzbetonsystemen FMS-F und FMS-E ist der Spritzbetonauftrag über Kopf gut möglich. Durch die nahezu „ideale“ Festigkeitsentwicklung ist auch der Auftrag von größeren Schichtdicken in einem Arbeitsgang möglich:

Bei starkem Wasserandrang kann bei Verwendung von SBM-FT zusätzlich ein alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger zugegeben werden, um den Frühfestigkeitsbereich J3 zu erreichen [118]. Für ungünstige Vortriebsbedingungen kann das Bindemittel auch allein für das Erreichen des Bereiches J3 eingestellt werden.

IV.5.2.4 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Verglichen mit den Trockenspritzverfahren entwickeln sich die Frühfestigkeiten bei den Nassspritzverfahren – unabhängig von einer Förderung des Nassmischgutes im Dicht- oder Dünnstrom – in den ersten Minuten deutlich langsamer und gehen (auch bei Verwendung von alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern) über den Bereich J₂ nicht hinaus. In der Abbildung 58 ist der charakteristische Verlauf der Festigkeitsentwicklung von Nassmischgut mit alkalifreier (EB-AF) und alkalihaltiger (EB-AH; wird in der gegenständlichen Arbeit nicht berücksichtigt) Erstarrungsbeschleunigung dargestellt.

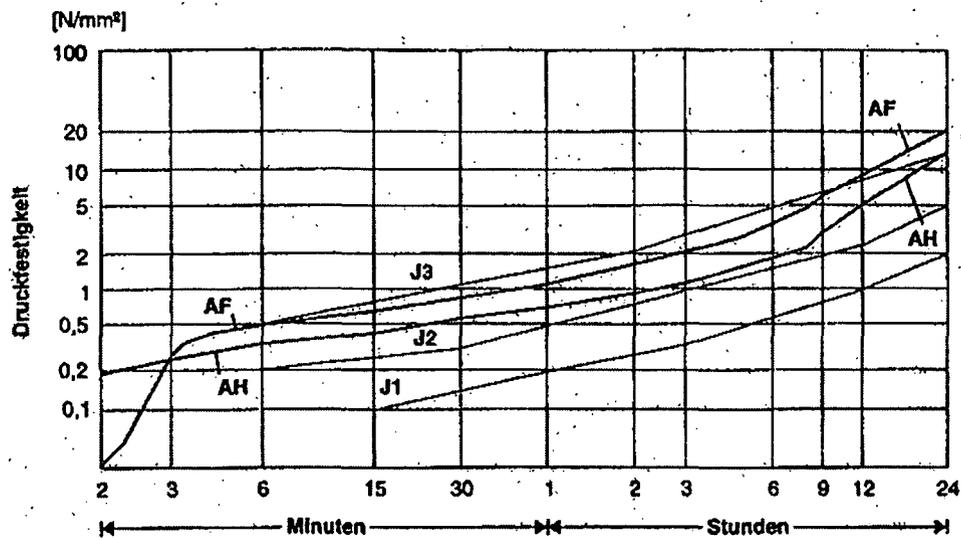


Abbildung 58: Charakteristische Kurve der Frühfestigkeitsentwicklung von Nassspritzbeton mit alkalihaltiger (EB-AH) und alkalifreier (EB-AF) Erstarrungsbeschleunigung [52]

In den ersten 6 Minuten erhöht sich die Druckfestigkeit auf ca. 0,5 N/mm², dann kommt es zu einem stetigen Anstieg der Druckfestigkeiten auf ca. 20 N/mm² nach 24 Stunden.

Durch die langsamere Festigkeitsentwicklung und die geringeren Aufprallgeschwindigkeiten des Spritzbetons treten bei den Nassspritzverfahren geringere Rückprallwerte und eine geringere Staubentwicklung gegenüber den Trockenspritzverfahren auf. Bei starkem Wasserandrang nimmt der „Rückfall“ des Spritzbetons zu, d.h. es lösen sich (aufgrund der geringeren Haftung zwischen Felsoberfläche und Spritzbetonschale) verstärkt Spritzbetonreste vom Untergrund.

IV.5.3 Endfestigkeit

IV.5.3.1 Allgemeines

Für die Sicherheit des Ausbaus ist – neben einer schnellen und hohen Frühfestigkeit des jungen Spritzbetons – eine gute Endfestigkeit des Spritzbetons entscheidend. Durch höhere Druckfestigkeiten kann eine Reduzierung des Bewehrungsgehaltes der Spritzbetonschale und damit eine Reduktion der Spritzbetonschalendicke erreicht werden. Als Endfestigkeit des Spritzbetons wird die Druckfestigkeit nach 28 Tagen bezeichnet. Bei der Verwendung von Zusatzstoffen wie Flugasche oder Schlacke wird das Prüfalter aufgrund der Nachhärtung auf 56 oder 90 Tage für die Prüfung festgesetzt [52]. Die Endfestigkeit ist die Grundlage für die Einteilung des Spritzbetons in sogenannte Festigkeitsklassen (s. IV.2.1.3 / Tabelle 8).

In Abhängigkeit von der gewählten Verfahrenstechnik ergeben sich unterschiedliche Druckfestigkeiten (Endfestigkeiten) des Spritzbetons. In der Abbildung 59 sind die Druckfestigkeiten nach 1 und nach 56 Tagen für unterschiedliche Spritzbetonverfahren dargestellt.

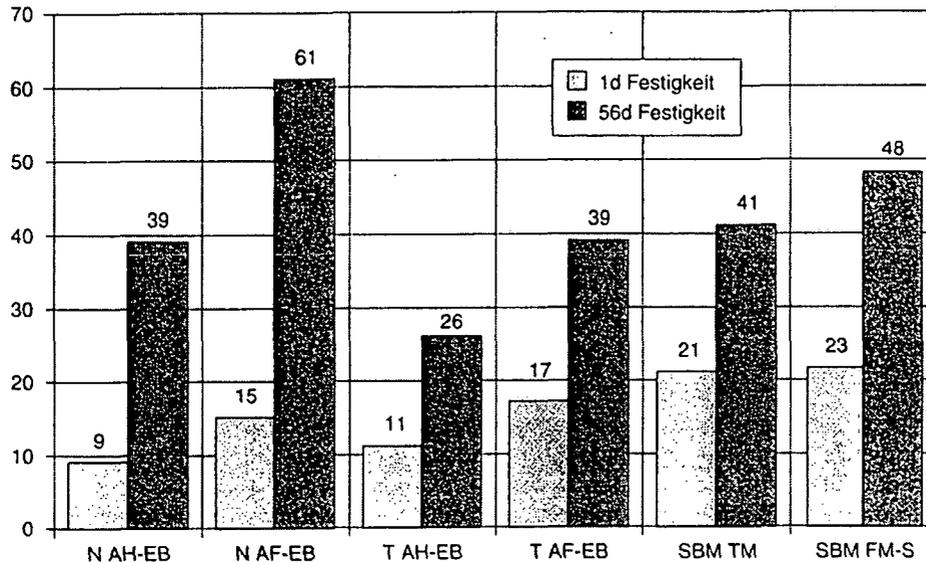


Abbildung 59: Druckfestigkeiten für unterschiedlich hergestellten Spritzbeton nach 1d bzw. 56d [52]

Bezeichnungen in der Abbildung 59:

- N AH-EB: Nassspritzverfahren mit alkalifreier Erstarrungsbeschleunigung
- SBM-TM: Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut und Spritzbindemittel
- SBM-FM-S: Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen und Spritzbindemittel

Beim Nassspritzverfahren erzielt man im Vergleich zum Trockenspritzverfahren geringere Festigkeiten nach dem ersten Tag (15 N/mm² gegenüber 21 bzw. 23 N/mm²). Die höheren Endfestigkeiten beim Nassspritzverfahren (61 N/mm² gegenüber 41 bzw. 48 N/mm²) resultieren aus dem höheren Bindemittelgehalt im Nassmischgut gegenüber dem ofentrockenen oder erdfeuchten Mischgut.

IV.5.3.2 TM-F, TM-E, FMS-F und FMS-E

Bei den Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem und erdfeuchtem Mischgut werden die in der Richtlinie für Spritzbeton [106] geforderten Druckfestigkeiten für die höchste Spritzbetonfestigkeitsklasse SpB 40 erreicht. Neben der geforderten Endfestigkeit zeichnen sich die Trockenspritzverfahren – im Gegensatz zu den Nassspritzverfahren – auch durch hohe Frühfestigkeiten aus.

Für das Verhältnis von Bindemittelgehalt [kg] zu erreichbarer Endfestigkeit [N/mm²] nach 56 Tagen können für das Trockenspritzverfahren je nach Mischgut folgende Richtwerte angenommen werden [vgl. [52]:

- TM-F und TM-E: 8,5 kg Bindemittel pro N/mm² Druckfestigkeit nach 56 Tagen
- FMS-F und FMS-E: 7,7 kg Bindemittel pro N/mm² Druckfestigkeit nach 56 Tagen

IV.5.3.3 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Bei den Nassspritzverfahren – unabhängig von der Förderung des Nassmischgutes im Dicht- oder Dünnstrom – werden durch die Zugabe von alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern höhere Druck- bzw. Endfestigkeiten des Spritzbetons erzielt. Die Entwicklung der Frühfestigkeit erfolgt jedoch deutlich langsamer als bei den Trockenspritzverfahren.

Für das Verhältnis von Bindemittelgehalt [kg] zu erreichbarer Endfestigkeit [N/mm²] nach 56 Tagen kann für das Nassspritzverfahren ein Richtwert von 6,7 kg Bindemittel pro N/mm² angesetzt werden (vgl. [52]).

IV.5.4 Mischgut

IV.5.4.1 Allgemeines

Das für das jeweilige Spritzverfahren bereitgestellte Gemisch wird nach [106] als Mischgut bezeichnet. Als Ausgangsprodukt für Trocken- und Nassspritzbeton setzt es sich dabei aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Bindemittel (s. IV.5.1)
- Zusatzstoffe (s. IV.5.10 - Flugasche, Siliziumpulver, Gesteinsmehl)
- Gesteinskörnung (s. IV.5.7)
- Zusatzmittel (s. IV.5.9 – Erstarrungsbeschleuniger, Verflüssiger, Verzögerer)
- Anmachwasser (s. IV.5.8)

Im gegenständlichen Kapitel sollen nicht die jeweiligen Spritzbetonausgangsstoffe analysiert und bewertet werden, denn dafür sind für den Beurteilungsaspekt „Betontechnologie“ eigene, ausführliche Kapitel vorgesehen. Beim Beurteilungskriterium „Mischgut“ geht es vor allem darum, die Möglichkeiten der Anpassung der Mischgutrezepturen an unterschiedliche Anforderungen aus Baubetrieb, Geologie und Hydrologie zu beleuchten.

IV.5.4.2 TM-F und TM-E

Das ofentrockene Mischgut wird von der baustelleneigenen oder einer externen Betonmischanlage mit einer fertigen Rezeptur zur Baustelle geliefert und kann somit vor Ort nicht mehr flexibel an unterschiedliche Vortriebsverhältnisse angepasst werden. Der Düsenführer kann an der Spritzdüse lediglich den Wasser-Bindemittel-Wert durch eine unterschiedliche Zugabe von Wasser beeinflussen. Eine erforderliche, höhere Dosierung des

Bindemittels bei starken Wasserzutritten ist bei diesem Spritzbetonsystem daher am Spritzbetoneinbauort selbst nicht mehr möglich, sondern müsste bereits im Werk selbst erfolgen.

Ein wesentlicher Vorteil der Mischgutproduktion im Werk besteht allerdings darin, dass das Mischgut – bedingt durch eine qualitätsgesicherte und geprüfte Produktion in der Betonmischanlage – qualitativ hochwertig ist und zur Baustelle geliefert wird. Bei bereits bestehenden, geprüften Rezepturen ist somit auf der Baustelle keine Eignungsprüfung mehr erforderlich [48].

IV.5.4.3 FMS-F und FMS-E

Nachdem die Spritzbetonausgangsstoffe in der mobilen Mischanlage erst unmittelbar vor Ort gemischt werden, sind durch die elektronisch gesteuerte Dosierung von Bindemittel und Gesteinskörnung verschiedenste Mischgutrezepturen für Kalotte, Strosse und Sohle einstellbar. Damit ist eine wirtschaftliche Anpassung der Mischgutrezeptur an unterschiedlichste geologische Rand- und Vortriebsbedingungen schnell und einfach realisierbar. Die Mischgutrezeptur kann somit flexibel an unterschiedliche Vortriebsverhältnisse angepasst werden.

IV.5.4.4 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Bei den Nassspritzverfahren (Dicht- oder Dünnstromförderung) wird durch die Herstellung des Nassmischgutes in der baustelleneigenen oder externen Betonmischanlage eine hohe Qualität gewährleistet. Konstante Frischbetontemperaturen, die Gleichmäßigkeit der Konsistenz des Betons und eine gleichbleibende Kornverteilung, sowie die Möglichkeit die Eigenfeuchte der Zuschläge zu messen, werden gewährleistet [72]. Die Anforderungen an das Mischgut sind beim Nassspritzverfahren jedoch höher als beim Trockenspritzverfahren, nachdem das Mischgut vor Ort auf jeden Fall pumpfähig sein muss und die Verarbeitungszeit begrenzt ist. Das Nassmischgut muss daher einen gewissen Zement- und Mehlkorngehalt und eine bestimmte Konsistenz aufweisen. Bei der Dünnstromförderung von Nassmischgut ist eine eher dünnflüssige Konsistenz erforderlich.

Der Antransport des Nassmischgutes von der Mischanlage zum Einbauort kann nur - unter Zugabe von Verflüssigern und/oder Verzögerern - mit teuren Fahr- oder Nachmischern erfolgen, um eine wirtschaftliche Verarbeitung zu gewährleisten. Mit einer modernen Betonmischanlage können zwar Betonrezepturen für unterschiedlichste Vortriebsbedingungen hergestellt werden, eine unmittelbare, flexible Anpassung der Mischgutrezeptur direkt am Spritzbetoneinbauort ist allerdings nicht möglich.

IV.5.5 Verarbeitungstemperatur

IV.5.5.1 TM-F, TM-E, FMS-F und FMS-E

Für die Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem und erdfeuchtem Mischgut sind in der österreichischen Richtlinie für Spritzbeton folgende Verarbeitungstemperaturen vorgeschrieben (s. [106] / Punkt 5.1.1 / Tabelle 5/3):

	TM	FMS	TM	FMS
Verarbeitungstemperatur	max. °C		min. °C	
Spritzbindemittel	+ 50		keine Anforderungen	
Gesteinskörnung	+ 40		+ 5	
Zugabewasser	+ 60		keine Anforderungen	
Mischgut	+ 40	+30	+ 5	

Tabelle 20: Verarbeitungstemperatur für Trocken- und Feuchtmischgut [106]

Der günstige Temperaturbereich für das ofentrockene Mischgut liegt nach [106] innerhalb einer Bandbreite von + 13°C bis + 25°C. Unter +13 °C liegende Temperaturen beeinflussen die Frühfestigkeit und über +25 °C liegende verkürzen die Verarbeitungszeit des Mischgutes.

Bei der Verwendung von erdfeuchten Zuschlägen können noch folgende Maßnahmen zur Annäherung an die günstige Verarbeitungstemperatur getroffen werden (s. [106] / Punkt 5.1.2):

- Bei tiefen Temperaturen: Heizung, Abdeckung bzw. geschlossene Lagerung der Zuschläge, Heizung des Zugabe- bzw. Anmachwassers.
- Bei hohen Temperaturen: Berieselung der Fraktionen GK 4/8 bzw. GK 4/11, Abdeckung bzw. geschlossene Lagerung der Zuschläge, in besonderen Fällen Kühlung der Ausgangsstoffe.

IV.5.5.2 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Für das Nassmischgut gelten die Hinweise für das Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen (s. Punkt IV.5.5.1).

Bei Frischbetontemperaturen über +20 °C kann die Vorhydratation des Bindemittels zu einem starken Ansteifen des Pumpbetons und zu ungünstigen Erstarrungsverhalten führen [106].

IV.5.6 Verarbeitungszeit

IV.5.6.1 Allgemeines

Unter der Verarbeitungszeit wird die Zeit zwischen dem Zusammenführen von erdfeuchtem Gesteinskörnung und Zement bzw. Spritzbindemittel SBM-FT und dem Austritt aus der Düse oder die Zeit zur Herstellung des Nassmischgutes bis zum Auftrag des Spritzbetons verstanden.

IV.5.6.2 TM-F und TM-E

Nachdem das ofentrockene Mischgut bereits fertig gemischt mit TM-Mobilen zum Spritzbetoneinbauort transportiert wird, ist eine Zusammenführung von Bindemittel und Gesteinskörnung vor Ort nicht mehr erforderlich. Entsprechend der im Punkt IV.5.6.1 eingeführten Definition ist daher grundsätzlich keine Verarbeitungszeit beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut, sondern lediglich die Förderzeit von der Ausblasöffnung der Dosierblasschnecke bis zur Spritzdüse (abhängig von Förderdruck und Schlauchlänge) zu berücksichtigen. In der Regel wird die „Verarbeitungszeit“ (aufgrund geringer Schlauchlängen) im Bereich von wenigen Sekunden liegen.

IV.5.6.3 FMS-F und FMS-E

Die Verarbeitungszeit beim Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen liegt innerhalb einer Bandbreite von 1 bis 3 Minuten [40]. Sie umfasst dabei den Zeitanteil der Transportzeit vom Zusammenmischen der Gesteinskörnung mit Bindemittel bis zum Einfülltrichter der Spritzmaschine, der Verweildauer des Mischgutes im Gesteinskörnungstrichter und der Förderzeit (abhängig von Förderdruck und Schlauchlänge) des Mischgutes von der Ausblasöffnung der Spritzmaschine bis zur Spritzdüse. Diese geringe Verarbeitungszeit des Mischgutes erfordert eine genau abgestimmte Verfahrenstechnik, wesentlicher Parameter ist die sogenannte Kontaktzeit, die das Spritzbindemittel ohne Einbußen beim Erstarren mit dem naturfeuchten Gesteinskörnung „überstehen“ muss.

IV.5.6.4 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Die Verarbeitungszeit darf in der Regel 1,5 Stunden nicht überschreiten [106]. Eine Verlängerung ist durch die Verwendung von Verzögerern oder Langzeitverzögerern möglich.

IV.5.7 Wasser-Bindemittel-Wert

IV.5.7.1 Allgemeines

Der Wasser-Bindemittel-Wert gibt das Masse-Verhältnis aus Gesamtwasser (Eigenfeuchte der Zuschläge, Zugabewasser einschließlich Vorbenetzung und Wassergehalt der Zusatzstoffe und Zusatzmittel) und Bindemittel an.

Für Spritzbeton mit konstruktiven Aufgaben (SpB II und SpB III) soll der Wasser-Bindemittel-Wert gemäß [106] (s. Tabelle 5/2) $\leq 0,5$ sein, um die Anforderungen an die Frühfestigkeit (Bereich J2 bis J3) erzielen zu können. Grundsätzlich ist ein möglichst niedriger Wasser-Bindemittelwert bis zur Erreichung der Verdichtbarkeit anzustreben, um eine entsprechende Endfestigkeit (nimmt mit zunehmendem W/B-Wert ab) und Dichtigkeit des Spritzbetons zu erhalten.

IV.5.7.2 TM-F und TM-E

Beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut ist der Wasser-Bindemittel-Wert durch die vom Düsenführer gesteuerte Wasserzugabe an der Düse manuell veränderbar. Ein gleichmäßig tiefer W/B-Wert ist vom Düsenführer einzuhalten, wenn ein gleichmäßiger Materialstrom an der Düse ankommt. Wird vom Düsenführer ein zu geringer Wasser-Bindemittel-Wert gewählt, erhöht sich die Rückprallmenge.

Bei einem zu hohen W/B-Wert hingegen „sackt“ der Spritzbeton an der Auftragsfläche ab, die Qualität wird dadurch negativ beeinflusst. Schwierigkeiten bei der manuellen Einstellung der Wasserzugabe an der Düse können durch Entmischungen bei der Lagerung des Mischgutes auftreten (s. IV.4.2.1). Fein- bzw. Grobmaterialanhäufungen im Förderstrom führen in diesem Fall zu unerwünschten Schwankungen des Wasser-Bindemittel-Wertes.

IV.5.7.3 FMS-F und FMS-E

Bei diesen Spritzbetonsystemen ist der Wasser-Bindemittel-Wert ebenfalls vom Düsenführer durch die manuell gesteuerte Wasserzugabe beeinflussbar. Dadurch kann es zu den bereits im Punkt IV.5.7.2 angeführten Problemen kommen (Rückprall, Qualität). Entmischungstendenzen des Mischgutes sind bei dieser Verfahrenstechnik nicht zu befürchten.

IV.5.7.4 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Bei den Nassspritzverfahren erfolgt – im Gegensatz zu den Trockenspritzverfahren - die Wasserzugabe bereits in der Betonmischanlage und ist durch den Düsenführer daher nicht mehr vor Ort beeinflussbar. Es ist dadurch ein gleichmäßiger W/B-Wert erzielbar, wenn nicht Wasser am Mischfahrzeug zugegeben wird um die Konsistenz nachzustellen.

IV.5.8 Zugabewasser

Das Zugabewasser darf keine Stoffe beinhalten, die die Festigkeitsentwicklung und die Dauerhaftigkeit des Spritzbetons negativ beeinflussen. Genaue Grenzwerte sind nach prEN 1008:1997 und in der Richtlinie für Spritzbeton (s. [106] / Anhang 1) angeführt. Trinkwasser ist grundsätzlich für die Spritzbetonherstellung geeignet. Das Kühlen (z.B. Zugabe von geschrotetem Eis) oder das Erhitzen des Wassers (bis 60°C) ist zulässig, die Unbedenklichkeit im Hinblick auf die Betongüte ist nachzuweisen. [52]

IV.5.9 Zusatzmittel

IV.5.9.1 Allgemeines

Zusatzmittel sind mehlfeine Zusätze, Suspensionen oder Flüssigkeiten die beim Herstellen der Betonmischung getrennt zugegeben werden dürfen, um bestimmte Betoneigenschaften – wie z.B. eine hohe Frühfestigkeit, geringe Rückprallwerte oder eine Reduktion der Staubeentwicklung – zu erzielen. Im Wesentlichen werden als Zusatzmittel für den Spritzbeton Erstarrungsbeschleuniger, Verflüssiger (Fließmittel) und Verzögerer eingesetzt.

IV.5.9.2 TM-F, TM-E, FMS-F und FMS-E

Bei den Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem bzw. erdfeuchtem Mischgut ist die Verwendung von Zusatzmitteln aufgrund der sehr raschen Reaktionszeit der Spritzbindemittel SBM-T und SBM-FT und der damit erzielbaren hohen Früh- und Endfestigkeiten des Spritzbetons grundsätzlich nicht erforderlich. Nur in Sonderfällen (z.B. bei extremen Bergwasserzutritten) kann dem Spritzbindemittel ein Erstarrungsbeschleuniger zudosiert werden.

IV.5.9.3 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Unabhängig von der Spritzbetonförderung im Dicht- oder Dünnstrom kann die Zugabe von Zusatzmitteln zum Nassmischgut zur Verbesserung der Spritzbetoneigenschaften erforderlich sein. Dabei ist insbesondere zu beachten, dass die Zusatzmittelzugabe gleichmäßig in den Förderstrom (beim Dichtstromverfahren synchron zur Kolbenpumpe, beim Dünnstromverfahren synchron zur Rotorspritzmaschine) erfolgt.

Zu den gebräuchlichsten Zusatzmitteln beim Nassspritzverfahren werden alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger zur Erhöhung der Frühfestigkeit gezählt, sie wirken weder ätzend noch reizend und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zur Arbeitssicherheit. Zusätzlich müssen oftmals Verflüssiger verwendet werden, um die Pumpbarkeit des Nassmischgutes bei einem geringen Wasser-Bindemittel-Wert gewährleisten zu können. Zur Verlängerung

der Verarbeitungszeit des Nassmischgutes kann die Zugabe von Verzögerern erforderlich sein.

Die Wirksamkeit der Betonzusatzmittel und ihre Verträglichkeit untereinander (bei der Verwendung mehrerer Zusatzmittel) sind in einer Eignungs- und Güteprüfung nachzuweisen.

- **Alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger (EB):** werden in Verbindung mit Portland- oder Tunnelzementen verwendet, wenn bestimmte Anforderungen an die Frühfestigkeit des Spritzbetons gestellt werden. Es sind dabei flüssige EB (Anforderungen s. [106] / Tabelle 4/4) zu bevorzugen, da der Festigkeitsverlust im späteren Alter und eine leichtere Dosierung sowie Durchmischung mit dem Mischgut möglich sind. Der Festigkeitsverlust ist auch bei Überdosierung des EB niedriger als 10 % [52].

Durch eine unterschiedliche Zudosierung von EB können am Spritzbetoneinbauort „flexible Mischgutrezepturen“ erzeugt werden, d.h. das Nassmischgut kann auch begrenzt an unterschiedliche Vortriebsverhältnisse (z.B. durch die Erhöhung der EB-Zugabe bei starkem Wasserandrang) angepasst werden.

Die Dosierungshöhen sind so niedrig wie möglich zu halten - in [106] wird für flüssige EB und für Spritzbeton J1 und J2 eine Bandbreite von 5,0 bis 7,0 Masse-% vom Bindemittel angegeben.

- **Verflüssiger:** Sie bewirken so eine vollkommene Feinverteilung des Zements und dadurch eine Verminderung der Reibung zwischen den Festteilen, aus der wiederum eine bessere Verarbeitbarkeit des Betons folgt [85]. Mit Hilfe von Verflüssigern soll das Nassmischgut eine pumpfähige Konsistenz bei geringem Wasser-Bindemittel-Wert erhalten. Verflüssiger verbessern somit die Verarbeitbarkeit des Betons, reduzieren den Wasseranspruch, Erhöhen die Festigkeit und Dichtigkeit und führen zu einer besseren Frostbeständigkeit.
- **Verzögerer:** Die zulässige Verarbeitungszeit des Nassmischgutes beträgt 1,5 Stunden (s. IV.5.6.4) und hängt von mehreren Faktoren, wie z.B. Luft-, Mischguttemperatur und Zementtyp, ab. Durch die Zugabe von Verzögerern kann die Verarbeitungszeit auf bis zu 72 Stunden verlängert werden. Bei der gleichzeitigen Verwendung von EB und Verzögerern müssen die beiden Zusatzmittel speziell aufeinander abgestimmt werden, um eine ausreichende Frühfestigkeit zu erzielen.

IV.5.10 Zusatzstoffe

Zusatzstoffe sind Suspensionen oder pulverförmige meist hydraulisch aktive Zusätze (z.B. Flugasche, Hüttensand), die beim Herstellen der Betonmischung getrennt zugegeben werden dürfen und bestimmte Spritzbetoneigenschaften, wie z.B. die Verarbeitbarkeit, die Klebrigkeit, die Staubentwicklung, den Rückprall, die Endfestigkeit (an der Festigkeitsentwicklung in den ersten Stunden und Tagen sind langsam reagierende Zusatzstoffe nicht beteiligt) und die Dichtigkeit des Spritzbetongefüges verbessern (vgl. [106], [52]).

Die Zusatzstoffe müssen den Anforderungen der Richtlinie für Spritzbeton entsprechen (s. [106] / Punkt 4.2) und sind als eigene Komponente zu dosieren und mit den anderen Ausgangsstoffen homogen zu vermischen. Der Gesamtanteil an Zuzahl- und Zusatzstoffen darf dabei max. 35 % des Bindemittels betragen (ausgenommen Microsilica und Bentonit).

Die ÖNORM B 4710-1 [33] unterscheidet dabei zwei Arten von Zusatzstoffen:

- **Typ I:** nahezu inaktive Zusatzstoffe (z.B. Bentonit, Gesteinsmehl)
- **Typ II:** puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe (z.B. Flugasche, Silicastaub und aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe – AHWZ).

Folgende Zusatzstoffe finden bei der Spritzbetonerzeugung Verwendung:

- **Flugasche** (s. ÖNORM B 3309 und EN 450): wird in Österreich bevorzugt eingesetzt und erhöht die Klebrigkeit (Dosierung des Erstarrungsbeschleunigers kann reduziert werden), die Endfestigkeit und die Dichtigkeit, beeinflusst jedoch nicht die Abbindezeit und die Frühfestigkeit. Außerdem wird die Sulfatbeständigkeit erhöht und der Rückprall und die Staubemission reduziert.
- **Microsilica** (s. prEN 13253:1998): Die Zugabe von Microsilica dient der Erhöhung der Klebrigkeit und der Druckfestigkeit, verbessert die Wasserdichtigkeit, die Haft- und Zugfestigkeit und führt zu einer erhöhten Sulfat-, Frost- und Tausalzbeständigkeit. Als Nachteile ist erhöhtes Fröhschwinden anzuführen.
- **Bentonit:** wird als Rückprallminderer eingesetzt, reduziert gleichzeitig die Staubentwicklung und verbessert die Standzeit der Förderschläuche (geringerer Verschleiß). Es zeigte sich nach [58], dass durch die Zugabe von Bentonit im Umfang von 2 bis 4 Masse-% des Bindemittels keine wesentliche Beeinträchtigung bezüglich Erstarren und Festigkeitsentwicklung erfolgte.
- **Gesteinsmehl** (s. prEN 12620:2000): wird dem Zement oder dem Mischgut zugemahlen, um die Verarbeitbarkeit des Spritzbetons zu verbessern. Durch die damit verbundene Erhöhung des Feinteilgehaltes des Mischgutes wird einerseits der Rückprall

vermindert und andererseits die Klebrigkeit des Spritzbetons erhöht. Benetzungsprobleme – vor allem bei den Spritzbetonsystemen TM-F und TM-E – sind möglich.

Für die Dosierung von Zusatzstoffen (z.B. Flugasche) können nach [106] (s. Tabelle 5/2) folgende Richtwerte angenommen werden:

- Trockenspritzverfahren (ofentrocken und erdfeucht): 30 bis 50 kg/m³ Spritzbeton
- Nassspritzverfahren (Dicht- und Dünnstrom): 50 bis 80 kg/m³ Spritzbeton

IV.5.11 Gesteinskörnung

IV.5.11.1 Allgemeines

Für Spritzbeton mit konstruktiven Aufgaben - SpB II und SpB III – sollte der Gesteinskörnung der Verwendungsklasse I gemäß ÖNORM B 3304 (Rund- oder Kantkorn) entsprechen und aus getrennten Korngruppen (z.B. für 0/8 aus 0/4 und 4/8) zusammengesetzt sein [52]. Die Aufteilung der Korngruppen hat für sämtliche Spritzbetonsysteme so zu erfolgen, dass die Einhaltung des Regelbereiches der Gesamtsieblinie gemäß [106] / Tabelle 4/3 gewährleistet ist.

Das Größtkorn sollte für Spritzbeton im Tunnelbau - unabhängig vom gewählten Spritzbetonverfahren - mit 8 mm (max. 11mm) begrenzt werden. Dadurch soll eine Reduktion des Rückpralls gewährleistet sein. Es ist dabei zu beachten, dass bei Korngruppen über 8 mm sowohl der erforderliche Luftbedarf zur Materialförderung als auch der erforderliche Schlauchdurchmesser ansteigen. Als Faustformel gilt, dass das Größtkorn kleiner als ein Drittel des Schlauchdurchmessers sein soll, um auch bei Überkorn Verstopfungen in der Förderleitung zu vermeiden [72].

Für die Mischgutherstellung ist sowohl die Verwendung von natürlichen als auch von gebrochenen Zuschlägen zulässig, wobei die Auswahl der Zuschläge so zu erfolgen hat, dass die Festigkeit der Zuschläge die Einhaltung der vorgegebenen Spritzbetonfestigkeit ermöglicht.

IV.5.11.2 TM-F und TM-E

Beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut dürfen nur Zuschläge mit einer maximalen Eigenfeuchte von 0,2 Masse-% verwendet werden. Eine größere Gesteinskörnungsfeuchte würde eine Vorreaktion des Spritz-Bindemittels bewirken und damit zu Qualitätseinbußen führen [40]. Es müssen daher bei diesem Spritzbetonverfahren

„geschlossene“ Systeme verwendet werden, insbesondere die Feuchte der Förderluft im Förderschlauch ist gering zu halten (z.B. durch den Einbau eines Wasserabscheiders).

IV.5.11.3 FMS-F und FMS-E

Die österreichische Richtlinie für Spritzbeton [106] gibt für die Gesteinskörnungseigenfeuchte beim Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen einen Regelbereich von 2 bis 4 Masse-% Eigenfeuchte vor.

Dieser Regelbereich ist empirisch festgelegt, wobei Abweichungen nach oben oder unten zu folgenden Phänomenen führen können:

- Gesteinskörnungseigenfeuchten von mehr als 5 Masse-% führen zu einer starken Klebrigkeit des Mischgutes. Daraus resultieren eine schlechte Förderbarkeit des Mischgutes, schwer lösbare Ablagerungen in den Spritzmaschinen und Spritzschläuchen, sowie eine unverhältnismäßige Steigerung der Produktionskosten [96].
- Gesteinskörnungsfeuchten von weniger als 2 Masse-% führen wiederum zu einer erhöhten Staubentwicklung an den Übergabestellen vom Dosierorgan in den Mischer und vom Mischer in die Spritzmaschine. Außerdem verschlechtert sich für diesen Fall die Benetzung des Mischgutes, womit zwangsläufig eine Erhöhung des Rückpralls und der Staubentwicklung einhergeht.

IV.5.11.4 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Die Gesteinskörnungseigenfeuchte wird für die Nassspritzverfahren – unabhängig von Dicht- oder Dünnstromförderung – mit einem Wert von 8,0 Masse-% begrenzt. Spezielle Maßnahmen in Bezug auf die Eigenfeuchte, wie z.B. erforderliche Trocknungsanlagen beim Trockenspritzverfahren, sind nicht zu treffen. In der Mischanlage wird entsprechend der gemessenen Eigenfeuchte der Gesteinskörnung das Zugabewasser gleichmäßig zudosiert.

IV.5.12 Zusammenfassung

Die Zielerträge hinsichtlich der Betontechnologie für die in diesem Kapitel angeführten Beurteilungskriterien sind übersichtlich in einer Zielertragsmatrix dargestellt. Diese Zielertragsmatrix bildet in weiterer Folge die Grundlage zur Bewertung der Verfahren und ist in der Tabelle 21 dargestellt.

Beurteilungskriterien	TM - F	TM - E	FMS - F	FMS - E	NSDI - F	NSDI - E	NSDU - F	NSDU - E
Bindemittel	SBM-T Reaktionszeit unter 1 min - keine Verwendung von EB oder Zusatzmitteln erforderlich - Bindemittelgehalt 300 - 400 kg/m ³		SBM-FT Reaktionszeit 2 - 7 Minuten - keine Verwendung von EB oder Zusatzmitteln erforderlich - Bindemittelgehalt 300 - 400 kg/m ³		Portland- oder Tunnelzemente (Einsatz von SBM nicht möglich) - Verwendung von EB oder Zusatzmitteln erforderlich - Bindemittelgehalt 330 - 450 kg/m ³		Portland- oder Tunnelzemente (Einsatz von SBM nicht möglich) - Verwendung von EB oder Zusatzmitteln erforderlich - Bindemittelgehalt 270 - 400 kg/m ³	
Endfestigkeit	Druckfestigkeiten für höchste Spritzbetonklasse erreicht (unter Berücksichtigung hoher Frühfestigkeiten) 8,5 kg Bindemittel pro 1 N/mm ² Druckfestigkeit nach 56 Tagen		Druckfestigkeiten für höchste Spritzbetonklasse erreicht (unter Berücksichtigung hoher Frühfestigkeiten) 7,7 kg Bindemittel pro 1 N/mm ² Druckfestigkeit nach 56 Tagen		Durch Zugabe von Erstarrungsbeschleunigern werden Druckfestigkeiten für die höchste Spritzbetonklasse überschritten (allerdings geringere Frühfestigkeiten als bei den Trockenspritzverfahren) - Verlust an Endfestigkeit durch die Zugabe von EB kann bis zu 10 % betragen - 6,7 kg Bindemittel pro 1 N/mm ² Druckfestigkeit nach 56 Tagen			
Frühfestigkeit	Höchste Frühfestigkeit (Bereich J2 bis J3) in den ersten Minuten - Druckfestigkeit von ca. 1 N/mm ² nach 6 min - Wasserandrang, nachbrechendes Gebirge und über Kopf aufgetragene dicke Schichten sehr gut beherrschbar - bedingt durch hohe Frühfestigkeit Spritzschatten und erhöhter Rückprall		Ideale Festigkeitsentwicklung (J2-J3) in den ersten Minuten - Druckfestigkeit von ca. 0,5 N/mm ² nach 6 min - Erhöhung der Frühfestigkeit durch Zugabe von EB-AF noch möglich - Wasserandrang, nachbrechendes Gebirge und über Kopf aufgetragene dicke Schichten gut beherrschbar		Festigkeitsentwicklung deutlich langsamer in den ersten Minuten (max. J2) - Druckfestigkeit von ca. 0,5 N/mm ² nach 6 Minuten durch Zugabe von EB-AF - Geringere Rückprallwerte und geringere Staubeentwicklung - Probleme bei starkem Wasserandrang - erhöhter „Rückfall“			
Mischgutrezeptur	Mischgutrezeptur kann nicht flexibel an die Vortriebsverhältnisse angepasst werden - Mischgut wird im Werk geprüft und qualitätsgesichert geliefert		Verschiedene Mischgutrezepturen für die Vortriebsorte Kalotte, Strosse und Sohle baubetrieblich und wirtschaftlich möglich - flexible Anpassung an die Vortriebsverhältnisse möglich		Die Anforderungen an das Mischgut sind beim Nassspritzverfahren höher als bei den Trockenspritzverfahren, flexible Anpassung an Vortriebsverhältnisse durch die Dosierung EB bedingt möglich - Mischgut für Dünnstromförderung von sehr dünnflüssiger Konsistenz erforderlich - pumpfähiges Nassgemisch nur durch gewissen Zement- und Mehlkorngemalt und die Zugabe von Fließmittel und/oder Verzögerern machbar			
Verarbeitungstemperatur	Günstiger Temperaturbereich für das Mischgut von + 13°C bis + 25°C - T < 13°C - Frühfestigkeitsverlust T > 25°C - verkürzte Verarbeitungszeit		Siehe TM-F und TM-E - zusätzlich: - bei tiefen Temperaturen: Heizung, geschlossene Gesteinskörnungslagerung - bei hohen Temperaturen: Gesteinskörnungsberieselung, Kühlung		Siehe FMS-F und FMS-E: Bei Frischbetontemperaturen über + 20°C kann die Vorhydratation des Bindemittels zu einem starken Ansteifen des Pumpbetons und ungünstigen Erstarrungsverhalten führen.			
Verarbeitungszeit	Wenige Sekunden		1 - 3 Minuten		bis 90 min möglich - Verlängerung durch Zugabe von (Langzeit)Verzögerern möglich			
Wasser-Bindemittel-Wert	durch Düsenführer beeinflussbar - großer Einfluss auf Rückprall und Qualität, Schwankungen durch allfällige Entmischung bei der Mischgutlagerung möglich		durch Düsenführer beeinflussbar - großer Einfluss auf Rückprall und Qualität		durch Düsenführer nicht beeinflussbar - Wasserszugabe bereits in der Mischanlage - aber Zugabe an der Betonpumpe erlaubt, gleichmäßiger W/B-Wert			
Zusatzmittel (Beschleuniger, Verzögerer, Verflüssiger)	Nicht unbedingt erforderlich - ausreichende Früh- und Endfestigkeit (nur in Sonderfällen Zugabe von EB erforderlich)				Zugabe von EB-AF erforderlich - Dosierung ca. 5 - 7 % vom Bindemittel „flexible Mischgutrezeptur“ EB-Zugabe synchron mit Kolbenpumpe Verzögerer und Verflüssiger eventuell erforderlich		Einsatz von EB-AF erforderlich - Dosierung ca. 5 - 7 % vom Bindemittel „flexible Mischgutrezeptur“ EB-Zugabe synchron mit Rotorspritzmaschine Verzögerer und Verflüssiger eventuell erforderlich	
Zusatzstoffe	Zugabe von 30 - 50 kg/m ³ Spritzbeton zur Verbesserung von Spritzbetoneigenschaften				Zugabe von 50 - 80 kg/m ³ Spritzbeton zur Verbesserung von Spritzbetoneigenschaften			
Gesteinskörnung	Korngröße 0 - 8 mm Eigenfeuchte < 0,2 M-% (sonst: Vorreaktion von SBM-T und Qualitätseinbußen)		Korngröße 0 - 8 mm Eigenfeuchte 2 M-% < W < 5 M-% (sonst: Ablagerungen, schlechtere Förderbarkeit)		Korngröße 0 - 8 mm W ≤ 8 M-% - In der Mischanlage wird nach Messung der Gesteinskörnungseigenfeuchte Zugabewasser zudosiert.			

Tabelle 21: Zielertragsmatrix - Betontechnologie

IV.6 Arbeitssicherheit, Umwelt- und Gesundheitsschutz

Hinsichtlich der Arbeitssicherheit und des Umwelt- und Gesundheitsschutzes werden für die einzelnen Spritzbetonsysteme die Arbeitsplatzbedingungen im unmittelbaren Vortriebsbereich, die Belastungen des Düsenführers durch Staub und Rückprall, das Eluatverhalten des Spritzbetons und die Möglichkeiten der Datenerfassung und des Qualitätsmanagements im Produktionsprozess analysiert.

Die einzelnen Beurteilungskriterien werden übersichtlich in der Zielertragsmatrix „Arbeitssicherheit, Umwelt- und Gesundheitsschutz“ (s. Tabelle 24) dargestellt.

IV.6.1 Arbeitsplatzbedingungen – Belastungen des Düsenführers

IV.6.1.1 Allgemeines

Die Arbeitsplatzbedingungen im unmittelbaren Vortriebsbereich stellen ein wesentliches Beurteilungskriterium bei der Auswahl eines Spritzbetonverfahrens dar. Unter dem Begriff „Arbeitsplatzbedingungen“ werden in der gegenständlichen Arbeit sämtliche Einflüsse (z.B. Rückprall, Staub, Lärm) auf die Vortriebsmannschaft – insbesondere den Düsenführer – subsummiert, die beim Spritzbetonauftrag im Vortriebsbereich auftreten können.

In der Tabelle 22 werden beispielhaft Gefährdungs- und Risikopotentiale beim Spritzbetonauftrag für die Bereiche Spritzbetonförderleitung, Spritzdüse und Spritzmaschine dargestellt. Nach [85] wird unter dem Gefährdungsgrad das Risikopotential für das körperliche Wohlbefinden der Mineure im unmittelbaren Vortriebsbereich verstanden.

Bereich	Gefährdung / Belastung	Ursache	Gefährdungsgrad
Leitung	„Verirrte“ Schlauchenden und Kupplungen	Ausblasen der Leitungen, ohne diese zu fixieren	Geringe bis schwere Gefährdung
	Ausgeschossene „Stopfer“	Ausblasen von Stopfern	
	Platzen von Schlauch- und Leitungsverbindungen	Öffnen der Kupplungen unter Druck	Geringe Gefährdung
Spritzdüse	Staub	Pneumatische Förderung von (ofentrockenem) Mischgut	Geringe bis schwere Gefährdung im Umkreis von ca. 10 m um die Spritzdüse
	Lärm	Expandierende Förderluft an der Spritzdüse	Geringe Gefährdung im Umkreis von ca. 10 m um die Spritzdüse
	Rückprall	Rückprallendes Material	Leichte Gefährdung im Umkreis von ca. 10 m um die Spritzdüse
	Herabfallendes Gestein	Geologie - manueller Spritzbetonauftrag vor Ort	Schwere Gefährdung
	Sturz vom Gerüst bzw. aus der Ladeschaufel	Ungesicherter Standort bei manueller Düsenführung	Geringe bis schwere Gefährdung
Maschine	Staub	Beschickung am Einfülltrichter, Auspuff der Rotorkammer, Reinigung der Spritzmaschine mit Druckluft	Leichte Gefährdung, ständig bis dauernd im Umkreis von ca. 10 m um die Spritzmaschine
	Lärm	Abblasen der Druckluft aus den Rotorkammern am Auspuff	Geringe Gefährdung

Tabelle 22: Spezifische Unfallgefahren bei Spritzbetonarbeiten (nach [85], [114])

Nachdem moderne Spritzbetonsysteme ausschließlich Tunnel- oder Portlandzemente in Verbindung mit alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern (Nassspritzverfahren) bzw. Spritzbindemittel (Trockenspritzverfahren) verwenden, ist die Gefahr von Verätzungen der Vortriebsmannschaft durch Staub, Aerosole und platzende Schlauchförderleitungen nicht mehr gegeben (vgl. [100]).

IV.6.1.2 TM-F und TM-E

Beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut ist – bedingt durch die zumeist manuelle Düsenführung im ungesicherten Ausbruchsbereich (Gefährdung durch herabfallendes Gestein aus der Firste), durch die hohen Rückprallfaktoren und die hohe Staubentwicklung an der Spritzdüse – mit den schlechtesten Arbeitsplatzbedingungen für den (oder die) Düsenführer und die Vortriebsmannschaft vor Ort auszugehen. Durch den Einsatz von ferngesteuerten Spritzarmen kann die Arbeitssicherheit für den Düsenführer allerdings erhöht werden.

Die „TM-Mobile“ fahren unmittelbar zum Spritzbetoneinbauort, damit sind zwar kurze Förderleitungslängen und eine hohe Flexibilität des Verfahrens gewährleistet, allerdings ist damit auch der Maschinist zur Bedienung der Dosierblasschnecke – neben dem (oder den) Düsenführer(n) – ähnlich schlechten Arbeitsplatzbedingungen vor Ort ausgesetzt.

IV.6.1.3 FMS-F und FMS-E

Durch die Verwendung von erdfeuchter Gesteinskörnung werden gegenüber dem Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut geringere Rückprallwerte und eine geringere Staubentwicklung an der Düse erzielt. Der Maschinist, der die mobile Mischanlage bedient, befindet sich zwar im Einflussbereich der Maschine aber in sicherer Entfernung vom Spritzbetoneinbauort. Bei manueller Düsenführung ist allerdings auch von unsicheren Arbeitsplatzbedingungen für den (oder die) Düsenführer auszugehen.

IV.6.1.4 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Bei den Nassspritzverfahren werden – sowohl bei Dicht- als auch Dünnstromförderung des Nassmischgutes – aufgrund der hohen Spritzbetonförderleistungen von bis zu 30 m³ pro Stunde und Düse Spritzbetonmanipulatoren eingesetzt. Damit befindet sich der Düsenführer nicht mehr im unmittelbaren Gefahrenbereich des ungesicherten Ausbruchs, sondern bedient aus sicherer Entfernung mittels Fernbedienung den Spritzarm. Die Arbeitsplatzbedingungen für den Düsenführer und die Vortriebsmannschaft werden aus diesem Grund, aber auch unter Berücksichtigung der niedrigen Rückprallwerte und der geringen Staubemission, als gut bewertet.

IV.6.2 Elution

Unter dem Begriff „Elution“ (lateinisch „eludere“: „auswaschen“, „ausspülen“) wird das Herauslösen von adsorbierten Stoffen aus festen oder mit Flüssigkeit getränkten Adsorptionsmitteln verstanden. Aufgrund der Elution können durch die spezifische Zusammensetzung des Spritzbetons bestimmte Stoffgruppen ausgelaugt werden, die die Umwelt negativ beeinflussen können. Durch den Kontakt von Gebirgswässern mit der Spritzbetonschale kommt es beispielsweise zu einer Elution von Calciumhydroxid, welches mit der Zeit zu Calciumcarbonat ausfällt. Diese Kalkablagerungen führen zu Versinterungen in den Drainageleitungen und damit zu kostenintensiven Wartungsarbeiten. Versuche haben gezeigt, dass mit zunehmendem Alter und der Ausbildung einer dichten Zementsteinmatrix die Elution von Spritzbeton abnimmt. Die Auslaugung erfolgt dann nur noch an der Oberfläche und in den oberflächennahen Bereichen. So ist z.B. bei 56 Tage alten Spritzbetonproben bereits eine Abnahme der Elution bis zu 25 % gegenüber 7 Tage alten Proben bemerkbar [137].

Folgende Parameter haben einen wesentlichen Einfluss auf die Auslaugbarkeit von Spritzbeton (vgl. [72], [137]):

- **Gesteinskörnung:** Kalkhaltige Zuschläge zeigen z.B. beim Angriff von aggressiven Bergwässern eine deutlich höhere Elution von Calcium.
- **Zement und Zusatzstoffe:** Um eine Verminderung des Frachtaustrages bei Auslaugung von Spritzbeton zu erzielen, muss danach getrachtet werden, die Eluierbarkeit des Betones zu verbessern bzw. zu reduzieren und auch geeignete Zusatzmittel für die Herstellung des Spritzbetons zu verwenden.
- **Spritz-Bindemittel:** Durch die Verwendung von Spritzbindemittel kann z.B. die Calcium – Eluatmenge (ohne weitere zusätzliche Maßnahmen) reduziert werden.
- **Zusatzmittel:** Die Zugabe von alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern zum Zement führt zu einer deutlichen Beeinflussung der Eluatkonzentration.
- **Verarbeitung des Spritzbetons:** Das Auslaugverhalten wird auch die Art der Verarbeitung des Spritzbetons ebenfalls beeinflusst, so führen z.B. zu große Düsenabstände zur Auftragsfläche, eine unzureichende Genauigkeit der Beschleunigerdosierung oder speziell beim Trockenspritzverfahren eine wesentlich erhöhte Zugabewassermenge durch den Düsenführer das Auslaugverhalten negativ.

Für sämtliche – in der gegenständlichen Arbeit - analysierte Spritzbetonsysteme wird der Einfluss der Elutionen auf die Umwelt und das Drainagesystem als gering beurteilt (vgl. [72]).

IV.6.3 Qualitätsmanagement – Datenerfassung

IV.6.3.1 Allgemeines

Hinsichtlich der Qualitätsmanagementmaßnahmen vor und bei der Ausführung der Spritzbetonarbeiten sind die Bestimmungen der österreichischen Richtlinie für Spritzbeton (s. [106] / Tabelle 13/1 und 13/2) zu beachten. Neben diesen Maßnahmen muss man sich aber darüber klar sein, dass Spritzbetonqualität nicht herbeigeprüft werden kann, sondern letztendlich auf der Baustelle erzeugt werden muss [65]. Entscheidend für die Qualität des Spritzbetons sind dabei einerseits fachlich (in Theorie und Praxis) gut ausgebildete Mineure und Düsenführer, sowie andererseits eine sorgfältige, den organisatorischen Randbedingungen und den Besonderheiten des Verfahrens angepasste Bauablaufplanung. Für das Beurteilungskriterium „Qualitätsmanagement und Datenerfassung“ werden sowohl verfahrensspezifische Maßnahmen zur Sicherstellung einer hohen Spritzbetonqualität angeführt, als auch Möglichkeiten einer EDV gestützten Datenerfassung beim Spritzbetonauftrag analysiert.

IV.6.3.2 TM-F und TM-E

Durch die Herstellung in einer baustelleneigenen oder externen Betonmischanlage ist von einer exakt definierten Rezeptur des ofentrockenen Mischgutes auszugehen. Güteüberwachte Trockengemische unterliegen dabei einer strengen Eigen- und Fremdüberwachung in Bezug auf Eigenfeuchte, Zementgehalt und Einhaltung einer geforderten Sieblinie. Nachdem also vom Materialtransport des Trockenmischgutes bis zur Spritzdüse eine Kette von qualitätsgesicherten Schritten gewährleistet ist, können Qualitätsschwankungen einerseits durch fehlerhaftes Aufbringen des Spritzbetons und andererseits durch oftmaligen Materialumschlag (Entmischung!) entstehen.

Beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut hat der Düsenführer bedeutenden Einfluss auf die Spritzbetonqualität durch

- die individuelle Wahl der Wasserdosierung an der Düse,
- den gewählten Düsenabstand zur Spritzfläche,
- den gewählten Düsenwinkel zur Spritzfläche und
- die in einem Arbeitsgang aufgetragene Schichtdicke.

Daher ist gerade bei den Trockenspritzverfahren auf eine entsprechende fachliche Qualifikation des Düsenführers großer Wert zu legen.

Die Datenerfassung erfolgt im Vortrieb durch eine eher ungenaue Spritzbetonmengenmessung an der Dosierblasschnecke. Neben einer einfachen Bedienung der Dosierblasschnecke ist auch eine gute EDV-gestützte Datenerfassung möglich,

allerdings können durch Entmischungen (s. IV.4.2.1) des Trockenmischgutes Fehler in der Mengemessung auftreten.

IV.6.3.3 FMS-F und FMS-E

Das Trockenspritzverfahren mit erdfeuchtem Mischgut ermöglicht durch die Herstellung des Spritzbetons vor Ort eine gleichmäßig hohe und jederzeit – mit den unterschiedlichsten Rezepturen – abrufbare Spritzbetonqualität. Bei der Mischanlage vor Ort kann jeder Spritzvorgang getrennt nach Zeit und Menge (Mischverhältnis, Kies- und Spritzbindemittelverbrauch, Mischzeiten) aufgezeichnet werden. Durch diese Kontrolle, die auch am Steuerstand auf Monitoren mitverfolgt werden kann, werden Störungen – z.B. durch eine falsche Dosierung des Spritzbindemittels – schnell erkannt. Eingebaute Füllstandsmelder der jeweiligen Silos und der Spritzbetonmaschinen vereinfachen die Bedienung der Spritzanlage.

Durch Sprengerschütterungen im Vortrieb können allerdings in der Anlage Fehler bei der Datenerfassung auftreten. Außerdem können bei diesem Spritzbetonsystem Qualitätseinbußen durch schwankende Gesteinskörnungsfeuchten und eine mangelnde Qualifikation des Düsenführers auftreten. Regelmäßige Kalibrierungen der Mischanlage sind daher erforderlich.

IV.6.3.4 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Das Nassmischgut wird in einer baustelleneigenen bzw. externen Betonmischanlage qualitätsüberwacht hergestellt und mit Fahrmischern zum Einbauort transportiert. Nachdem der Spritzbetonauftrag – aufgrund der hohen Förderleistungen von bis zu 30 m³ pro Stunde und Düse – mit einem Spritzmanipulator erfolgen muss und der Düsenführer keinen Einfluss auf die Wasserzugabe an der Spritzdüse nehmen kann, ist eine hohe und homogene Spritzbetonqualität gewährleistet.

Die Aufzeichnung der Daten während des Spritzvorganges erfolgt bedienungsfreundlich direkt am Spritzmobil [144]. Erfolgt eine Zudosierung mit flüssigem EB, dann wird die Dosierung dem Förderstrom des Nassmischgutes synchron angepasst. Voraussetzungen für eine ordentliche Datenerfassung sind allerdings:

- Keine zusätzliche Wasserzugabe am Fahrmischer,
- eine regelmäßige Kalibrierung der Anzeige der Spritzanlage und
- ein gleichmäßiger Füllgrad der Pumpenzylinder (abhängig von der Konsistenz).

Der Spritzbeton im Nassspritzverfahren ist ein hochwertiger Qualitätsbeton. Seine Rohdichte entspricht in etwa dem des verdichteten Ausgangsbetons. Die Eigenschaften des gespritzten Betons sind bezogen auf den E – Modul, Kriechen und Schwinden, Wasserundurchlässigkeit usw. ähnlich dem des Konstruktionsbetons [72].

IV.6.4 Staub

IV.6.4.1 Allgemeines

Nach [88] ist Staub die disperse Verteilung fester Stoffe in Luft, entstanden durch Zerteilung, Kondensation, chemische Reaktion oder Aufwirbelung. Staub gehört zusammen mit Rauch und Nebel zu den Aerosolen und ist grundsätzlich lungengängig.

Die unterschiedliche Staubentwicklung an der Spritzdüse bzw. im unmittelbaren Vortriebs- und Sicherungsbereich muss bei einer Bewertung der Spritzbetonverfahren berücksichtigt werden. Die Staubentwicklung beeinflusst dabei im Wesentlichen die Vortriebsleistung (z.B. verursachen Beeinträchtigungen beim Spritzbetonauftrag durch schlechte Sicht eine schlechtere Spritzbetonqualität und geringere Spritzleistungen) und die Gesundheit der Vortriebsmannschaft (z.B. Lungenkrankheiten). Gesundheitliche Belastungen für die Vortriebsmannschaft treten im Tunnelbau durch Sprenggase, die oft unzureichende Versorgung mit Frischluft, durch Lärm, durch ätzende Substanzen, schlechte Lichtverhältnisse und durch hohe Deselemissionen auf.

Besonders hohe Staubkonzentrationen herrschen dabei im Arbeitsbereich des Düsenführers vor, wobei die **Intensität der Staubentwicklung beim Spritzbetonauftrag** von folgenden Parametern beeinflusst wird (vgl. [142], [132], [133], [52]):

- Verfahrenstechnik (Trocken- oder Nassspritzverfahren)
- Förderleitung (räumlicher Verlauf)
- Förderleistung
- Förderdruck
- Art und Zustand der Spritzdüse
- Abstand und Winkel der Spritzdüse zur Auftragsfläche
- Art der Spritzbetonauftragsfläche (Fels, Lockergestein oder Spritzbetonschichte)
- Ort der Spritzbetonauftragsfläche (Überkopf, Strosse, Sohle oder Einspritzen von Bauteilen z.B. Gitterbögen)
- Geschicklichkeit des Düsenführers
- Mischgutrezeptur (Art, Zusammensetzung und Temperatur der Ausgangsstoffe)
- Festigkeitsentwicklung des Bindemittels
- Benetzungswassermenge

- **Bewetterungssituation** (Art der Bewetterung, Abstand des Luttenendes zur Ortsbrust, Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel, Positionierung der Baugeräte in der Tunnelröhre, Tunnelquerschnitt)

Als Richtwerte für die maximale Staubkonzentration am Arbeitsplatz – für den Düsenführer bzw. Vortriebsmannschaft ist das der unmittelbare Vortriebsbereich - werden die MAK-Werte (**Maximale Arbeitsplatz-Konzentration**) angegeben. Nach [88] ist der MAK-Wert [in mg/m³ Luft] die höchstzulässige Konzentration eines Arbeitsstoffes (z.B. Gas, Dampf oder Schwebstoff) in der Luft am Arbeitsplatz, die nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnis auch bei wiederholter und langfristiger, in der Regel täglich achtstündiger Exposition, jedoch bei Einhaltung einer durchschnittlichen Wochenarbeitszeit von 40 Stunden im Allgemeinen die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigen und diese nicht unangemessen belästigt. In der Tabelle 23 sind einige MAK-Werte angegeben.

MAK – Wert [mg/m³]	Bezugskonzentration	Bewertungszeitraum
15,00	Gesamtstaub ^[1]	Tagesmittelwert
30,00		Stundenmittelwert ^[3]
6,00	Feinstaub ^[2]	Tagesmittelwert
12,00		Stundenmittelwert ^[3]
4,00	Quarzh. Feinstaub	
0,15	Quarz	

Tabelle 23: Staubgrenzwerte nach MAK-Werte-Liste (nach [88])

mit:

^[1] gesamter einatembarer Staubanteil

^[2] Alveolarstaub und wieder ausgeatmeter Staub, Quarzgehalt < 1M%

^[3] dieser Kurzzeitwert darf zweimal am Arbeitstag, nicht jedoch aufeinanderfolgend erreicht werden, sofern der Tagesmittelwert von 15 mg/m³ (Gesamtstaub) bzw. 6 mg/m³ (Feinstaub) nicht überschritten wird.

Die Messung der Staubentwicklung vor Ort kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen:

- **Elektrooptische Messverfahren:** Dabei werden optische Messverfahren (Streulichtmessgeräte) eingesetzt, die eine kontinuierliche Staubaufzeichnung und eine direkte Anzeige der Messwerte erlauben.
- **Gravimetrische Staubmessgeräte:** Bei der gravimetrischen Messung wird die belastete Luft mit konstanter Geschwindigkeit von 1 bis 2 m/s durch einen Filter angesaugt. Dabei kann der Gesamtstaub und der Feinstaub getrennt voneinander ermittelt werden.

Zur Bestimmung der Staubentwicklung ist der Einfluss des Messstandpunktes wesentlich, d.h. die Strömungsverhältnisse im Tunnel sind zu beachten.

Die Auswertung von umfangreichen Staubmessungen auf verschiedenen Tunnelbaustellen mittels elektrooptischen Feinstaubmessgeräten ergibt für die unterschiedlichen Spritzbetonverfahren folgende Situation (s. Abbildung 60):

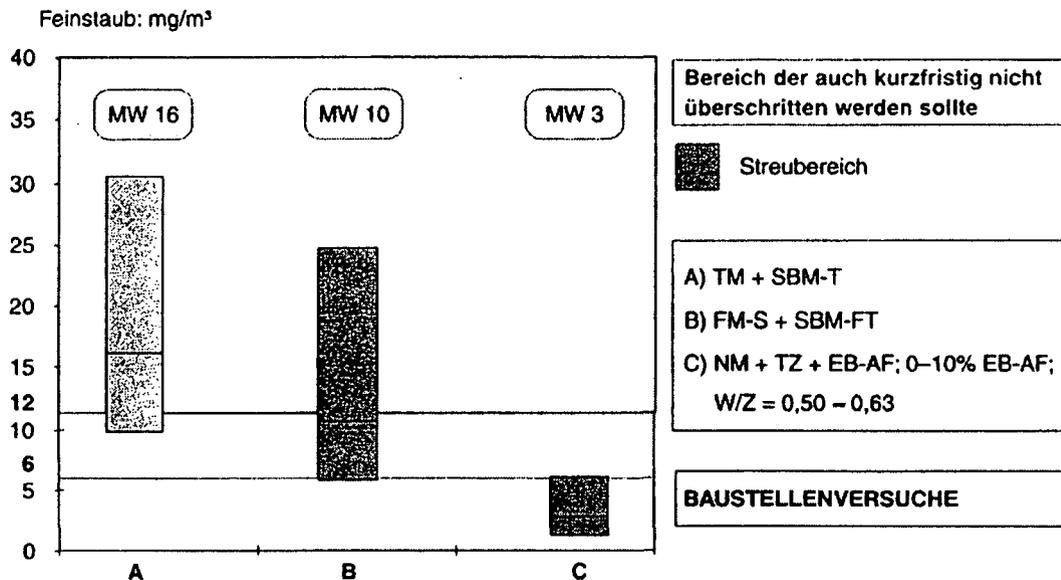


Abbildung 60: Bereiche der minimalen und maximalen Feinstaubkonzentrationen, gemessen < 6 m vor der Ortsbrust beim Applizieren von Spritzbeton (MW = Mittelwert der Feinstaubkonzentration) [52]

Nachdem die österreichische Richtlinie für Spritzbeton eine maximale Feinstaubkonzentration von 6 mg/m³ als Tagesmittelwert erlaubt (eine kurzfristige Überschreitung des vorgeschriebenen Höchstwertes um den zweifachen Wert ist möglich), zeigt sich:

- Beim Nassspritzverfahren (NM + TZ + EB-AF) können die vorgeschriebenen MAK-Werte eingehalten werden.
- Beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut (TM + SBM-T) muss die Staubentwicklung durch Vorbefeuchtungsmaßnahmen, durch den Einsatz von Vorbenetzungsdüsen (z.B. Pfeuffer-Düse) oder durch die Zugabe von Staubminderern verbessert werden. Beim Tunnel „Südumfahrung Landeck“ konnte durch die o.a. Maßnahmen ein Wert von 2,66 mg/m³ Feinstaub als Schichtmittelwert eingehalten werden, während des Spritzvorganges wurde ein Wert von 7,8 mg/m³ gemessen. [58]
- Beim Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen (FM-S + SBM-FT) treten niedrigere Staubkonzentrationen als beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut auf.

IV.6.4.2 TM-F und TM-E

Beim Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut ist die Staubentwicklung durch die Verwendung eines geschlossenen Systems an der Spritzmaschine selbst gering.

An der Spritzdüse – also im unmittelbaren Arbeitsbereich des Düsenführers - treten allerdings die höchsten Staubbelastungen auf (s. Abbildung 60). Messungen bei Spritzbetonarbeiten im Tunnelbau zeigen, dass die Grenzwerte für den lungengängigen Feinstaub oftmals überschritten werden [142].

Durch den Einbau von sogenannten Vorbenetzungsdüsen (s. IV.3.12.2) ca. 2,0 m nach der Dosierblasschnecke in den Förderschlauch, durch eine Reduktion der Förderleistungen auf max. 6 m³ Spritzbeton pro Stunde und durch eine gute Düsenreinigung nach jedem Spritzvorgang und eine entsprechende Düsenwartung können Staubreduktionen um bis zu 50 % erreicht werden.

IV.6.4.3 FMS-F und FMS-E

Beim Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen tritt eine Staubentwicklung sowohl an der Spritzmaschine als auch an der Spritzdüse auf.

- Im Bereich der Rotorspritzmaschine werden Staubemissionen durch Luftaustritte verursacht, die aus Undichtigkeiten an den Rotorscheiben (s. Abbildung 17) resultieren.
- Durch die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung ist die Belastung an der Düse geringer als beim Trockenspritzverfahren mit TM.
- Die Feinstaubkonzentration steigt neben einer Erhöhung der Förderleistung auch mit einer Zunahme der Förderleitungslänge. Daher sollte der „Mobile Mischanlage“ möglichst nahe beim Spritzbetoneinbauort sein, um die Leitungslängen kurz und geradlinig zu halten.

Bei den Spritzbetonsystemen FMS-F und FMS-E liegt die Staubbelastung im Vortriebsbereich um ca. 35 % unter den Werten für das Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut [40].

IV.6.4.4 NSDI-F, NSDI-E, NSDU-F und NSDU-E

Bei den Nassspritzverfahren kommt es – unabhängig von einer Förderung des Nassmischgutes im Dicht- oder Dünnstrom – zu keiner Staubemission an der Spritzmaschine (Betonpumpe, Spritzmobil).

An der Spritzdüse selbst treten geringe Staubentwicklungen auf, die durch eine Minimierung der Luftmenge bei der Förderung erzielt werden können. Nachdem beim Nassspritzverfahren generell Spritzbetonmanipulatoren eingesetzt werden, muss sich der Düsenführer nicht im Bereich der Spritzbetonsicherung aufhalten und ist damit nicht der unmittelbaren Staubbelastung im Düsenbereich ausgesetzt.

Die Nassspritzverfahren zeichnen sich durch die geringsten Staubemissionen gegenüber allen anderen Spritzbetonsystemen aus (ca. 80 % geringere Staubemission als bei den Verfahren TM-F und TM-E).

IV.6.5 Zusammenfassung

Die Zielerträge hinsichtlich Arbeitssicherheit, Umwelt- und Gesundheitsschutz für die in diesem Kapitel angeführten Beurteilungskriterien sind übersichtlich in einer Zielertragsmatrix dargestellt. Diese Zielertragsmatrix bildet in weiterer Folge die Grundlage zur Bewertung der Verfahren und ist in der Tabelle 24 dargestellt.

Beurteilungskriterien	TM – F	TM – E	FMS - F	FMS - E	NSDI – F	NSDI – E	NSDU – F	NSDU - E
Arbeitsplatzbedingungen – Belastung des Düsenführers	Schlechteste Arbeitsplatzbedingungen durch hohen Rückprall und starke Staubentwicklung – Durch manuelle Düsenführung Gefahr für den Düsenführer im ungesicherten Ausbruchsbereich (z.B. herabfallendes Gestein) – Verbesserung durch Einsatz eines Spritzmanipulators möglich – Ungünstige Arbeitsbedingungen für den Maschinisten an der Dosierblasschnecke – Keine Gefahr von Verätzungen der Vortriebsmannschaft durch Verwendung von Spritz-Bindemittel (kein EB)		Schlechte Arbeitsplatzbedingungen, allerdings Verbesserungen gegenüber dem TM durch geringeren Rückprall und geringere Staubentwicklung – Durch manuelle Düsenführung Gefahr für den Düsenführer im ungesicherten Ausbruchsbereich (z.B. herabfallendes Gestein) – Keine Gefahr von Verätzungen der Vortriebsmannschaft durch Verwendung von Spritzbindemittel (kein EB)		Sehr gute Arbeitsplatzbedingungen durch den Einsatz eines Spritzbetonmanipulators – Geringer Rückprall und geringe Staubentwicklung – Keine Gefahr von Verätzungen der Vortriebsmannschaft durch die Verwendung von alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern			
Elution Spritzbetonschale	Gering							
Qualitätsmanagement und Datenerfassung	Durch die Wahl der Wasserdosierung an der Spritzdüse, die Wahl des Düsenabstandes und des Düsenwinkels zur Spritzfläche wird die Qualität des Spritzbetons durch den Düsenführer stark beeinflusst – entsprechende fachliche Qualifikation berücksichtigen. – Exakt definierte Rezeptur des Spritzbetons – hohe Qualität des Spritzbetons hinsichtlich Ausgangsstoffe, Dichtigkeit, Festigkeit und Eluatverhalten – Qualitätsschwankungen nur durch fehlerhaftes Aufbringen und oftmalige Umschlagsvorgänge – Relativ ungenaue Mengenerfassung an der Dosierblasschnecke – einfache Bedienung mit EDV-Erfassung, Probleme durch Entmischungen des TM		Gleichmäßig hohe Qualität, immer abrufbar – Qualitätsschwankungen nur durch fehlerhaftes Aufbringen bzw. Schwankungen der Eigenfeuchte des Mischgutes – Jeder Spritzvorgang kann nach Zeit und Menge automatisch aufgezeichnet werden. – Bedienungsfreundlich, allerdings Probleme mit der Datenerfassung im Sprengbetrieb		Hohe gleichmäßige Spritzbetonqualität. – Laufende Qualitätssicherung für die geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften. – Mischgutzrezeptur ist vom Düsenführer nicht mehr beeinflussbar. – Aufzeichnung von Daten des Spritzvorgangs bzw. automatisches Spritzen ist mit modernen Spritzmobilen möglich – bedienungsfreundliche EDV-Erfassung			
Staubbelastung Düse und Maschinenbereich	Sehr hoch – Staubkapselung der Maschine, hohe Staubbelastung im Düsenbereich – Grenzwerte für lungengängigen Feinstaub oftmals überschritten – zusätzliche Maßnahmen erforderlich (Vorbenezungsdüse, Staubquellen in einem geschlossenen System) – Mittelwert Feinstaubkonzentration: 16 mg/m³		Zufriedenstellend – Staubbelastung an Spritzmaschine und Spritzdüse, „Mobile Mischanlage“ möglichst nahe am Spritzbetoneinbauort – ca. 35 % geringere Staubbelastung als beim TM (durch Eigenfeuchte des Mischgutes) – Mittelwert Feinstaubkonzentration: 10 mg/m³		Sehr gering – Keine Staubemission an der Spritzmaschine, geringe Emissionen an der Düse – ca. 80 % geringere Staubbelastung als beim TM – Mittelwert Feinstaubkonzentration: 3 mg/m³			

Tabelle 24: Zielertragsmatrix Arbeitssicherheit, Umwelt- und Gesundheitsschutz

Die Sicherung des Hohlraumrandes bzw. der Ortsbrust mit Spritzbeton liegt immer am kritischen Weg (s. Abbildung 61), die Spritzbetonarbeiten bestimmen somit wesentlich die Gesamtdauer eines Abschlages und damit die erzielbaren Vortriebsleistungen in den jeweiligen Vortriebsklassen.

In der gegenständlichen Arbeit wird davon ausgegangen, dass durch die Anwendung unterschiedlicher Spritzbetonverfahrenstechniken bei einem Tunnelbauprojekt die übrigen Arbeitsvorgänge eines Abschlages nicht beeinflusst werden.

Durch eine Änderung der Spritzbetonverfahrentechnik (z.B. die Umstellung von Trockenspritz- auf Nassspritzverfahren) verändern sich innerhalb eines Abschlages lediglich die Zeitdauern für das Auftragen des Spritzbetons (z.B. wegen der unterschiedlichen Förderleistungen und/oder dem geringeren Rückprall), nicht aber die – vom Spritzvorgang unabhängigen - Zeitdauern für die übrigen Vortriebstätigkeiten (z.B. das Bohren und Laden der Sprenglöcher, das Schüttern oder den Einbau von Baustahlgitter und Tunnelbögen). Die eventuell aus einer Veränderung der Spritzbetonverfahrenstechnik resultierenden unterschiedlichen Rüstzeiten für die jeweiligen Spritzbetonausrüstungen werden den Zeitdauern für den Spritzbetonauftrag zugezählt und beeinflussen damit nicht die übrigen Vortriebstätigkeiten.

V.1.2 Berechnungsformeln

Die Ermittlung der Spritzleistung, der Abschlagsdauer bzw. der Vortriebsleistung für den Aufbau von Musterkalkulationen für die einzelnen Spritzbetonsysteme erfolgt mit Hilfe der nachstehenden Formeln.

V.1.2.1 Spritzleistung

Nach der Richtlinie für Spritzbeton [147] wird zur Ermittlung der Spritzleistung die gesamte Spritzbetonmenge, die in einer gestoppten Zeit (Spritzzeit) die Düse verlässt, durch Wägung erfasst. Damit ergibt sich:

$$\text{Spritzleistung [kg/h]} = \frac{\text{Masse Spritzbeton [kg]}}{\text{Spritzzeit [h]}}$$

Unter Einbeziehung der Dichte ρ [kg/m³] des „losen“ Mischgutes für die Spritzbetonherstellung errechnet sich die Spritzleistung in [m³-lose/h] mit:

$$\text{Spritzleistung [m}^3\text{-lose/h]} = \frac{\text{Masse Spritzbeton [kg]}}{\text{Spritzzeit [h]} \cdot \rho \text{ [kg / m}^3\text{]}} = \frac{\text{Spritzbetonkubatur[m}^3\text{ - lose]}}{\text{Spritzzeit [h]}}$$

V.1.2.2 Abschlagsdauer

Die Zeitdauer für einen Abschlag (ein in einem Zyklus geschaffener Teil des Hohlraums) ermittelt sich mit der nachfolgenden Formel:

$$\text{Abschlagsdauer [h]} = \text{Konstanter Zeitanteil [h]} + \frac{\text{Spritzbetonkubatur[m}^3 \text{ - lose]}}{\text{Spritzleistung[m}^3 \text{ - lose/h]}}$$

Unter dem konstanten Zeitanteil wird die Summe der Zeitdauern für sämtliche kritische Vortriebstätigkeiten (exkl. der Spritzbetonsicherung) während eines Abschlages verstanden. Folgende Zeitdauern werden dabei berücksichtigt und sind in einem Eingabeformular der Musterkalkulation in Minuten anzugeben:

- Einrichten des Bohrwagens
- Bohren der Sprenglöcher
- Anker
- Spieße
- Verzugsbleche
- Laden und Sprengen
- Lüften
- Schüttern, Ablauten
- Geologische Aufnahme
- Baustahlgitter
- Tunnelbogen

Die kritischen Zeitdauern für den Spritzbetonauftrag zur Ortsbrust- bzw. Hohlraumrandsicherung werden in diesem konstanten Zeitanteil nicht berücksichtigt, sondern gehen als Quotient von Spritzbetonkubatur (Laibung und Ortsbrust) und der Spritzleistung in die Formel ein.

V.1.2.3 Vortriebsleistung

Die Vortriebsleistung errechnet sich – unter Berücksichtigung von Pkt. V.1.2.1 und V.1.2.2 - wie folgt:

$$\text{Vortriebsleistung [m/AT]} = \frac{24 \text{ [h/AT]}}{\text{Abschlagsdauer [h]}} * \text{Abschlagslänge [m]}$$

Die Vortriebsleistung wird nach Eingabe sämtlicher kritischer Zeitdauern für jede ausgeschriebene Vortriebsklasse ermittelt und in einer Vortriebsklassenmatrix dargestellt. Für die Dimensionierung der Baustelleneinrichtung (z.B. Größe des Vorratssilos für die

Bindemittellagerung) und die Personal- und Gerätedisposition werden jene Vortriebsklassen mit der höchsten und der niedrigsten Vortriebsleistung herangezogen.

V.1.3 Berechnungsbeispiel

Bei einem zyklischen Tunnelvortrieb wird in einem 100 m langen Abschnitt die Vortriebsklasse X/Y in standfestem Gebirge (Gebirgsverhaltenstyp 1) aufgeföhren.

Unter einem Gebirgsverhaltenstyp versteht die ÖNORM B 2203-1 [149] ein Gebirge mit gleichartigem Verhalten in Bezug auf Ausbruch des Gesamtquerschnittes, auf zeitliche und räumliche Verformung und auf Versagensform, ohne Berücksichtigung von Stütz- und Sondermaßnahmen.

Für die Vortriebsklasse X/Y ergeben sich aus der Kalkulation des Unternehmers für die Spritzbetonverfahrenstechniken „Variante A“ bzw. „Variante B“ folgende kritische Zeitdauern für einen Abschlag mit einer Abschlagslänge von 2,20 m (s. Tabelle 25):

Nr.	Vortriebstätigkeit	Variante A	Variante B
1	Bohren	45 min	45 min
2	Ankern	15 min	15 min
3	Laden	15 min	15 min
4	Sprengen	15 min	15 min
5	Schüttern	75 min	75 min
6	Baustahlgitter	15 min	15 min
7	Spritzbeton	90 min	120 min
8	Abschlagsdauer	270 min	300 min

Tabelle 25: Beispielhafte Ermittlung der Zeitdauern für einen Abschlag unter Berücksichtigung unterschiedlicher Spritzbetonverfahrenstechniken (Variante A und B)

In der Vortriebsklasse sind unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Rückpralls und dem einzukalkulierendem (für beide Spritzbetonverfahrenstechniken gleichem) Übermaß und Überprofils für die Spritzbetonverfahrenstechnik „Variante A“ für einen Abschlag 15 m³-lose Spritzbeton und für die „Variante B“ 16 m³-lose Spritzbeton erforderlich.

Damit ergeben sich folgende Zeitdauern für den Spritzbetonauftrag eines Abschlages (s. Tabelle 25):

- Variante A: Förderleistung 10 m³-lose/h $\Rightarrow 15 \text{ m}^3\text{-lose} / 10 \text{ m}^3\text{-lose/h} = 90 \text{ min}$
- Variante B: Förderleistung 8 m³-lose/h $\Rightarrow 16 \text{ m}^3\text{-lose} / 8 \text{ m}^3\text{-lose/h} = 120 \text{ min}$

Aus den o.a. Zeitdauern für den Spritzbetonauftrag ermitteln sich die Vortriebsleistungen für die jeweilige Spritzbetonverfahrenstechnik in der Vortriebsklasse X/Y wie folgt:

Variante A:

- Abschläge pro AT: $1440 \text{ min/AT} / 270 \text{ min pro Abschlag} = 5,33 \text{ Abs./ AT}$
- Vortriebsleistung: $5,33 \text{ Abschläge pro AT} * 2,20 \text{ m/Abschlag} = 11,73 \text{ m/AT}$
- Vortriebsdauer: $100 \text{ m Vortriebsklasse X/Y} / 11,73 \text{ m/AT} = 8,53 \text{ AT}$

Variante B:

- Abschläge pro AT: $1440 \text{ min/AT} / 300 \text{ min pro Abschlag} = 4,80 \text{ Abs./AT pro}$
- Vortriebsleistung: $4,80 \text{ Abschläge pro AT} * 2,20 \text{ m/Abschlag} = 10,56 \text{ m/AT}$
- Vortriebsdauer: $100 \text{ m Vortriebsklasse X/Y} / 10,56 \text{ m/AT} = 9,47 \text{ AT}$

Durch die Wahl unterschiedlicher Spritzbetonverfahrenstechniken werden lediglich die kritischen Zeitauern für den Spritzbetonauftrag beeinflusst, die Zeitauern für die übrigen zeitkritischen Vortriebstätigkeiten werden dadurch nicht verändert (s. Tabelle 25). In diesem Berechnungsbeispiel zeigt sich auch die Auswirkung der unterschiedlichen Spritzbetonverfahrenstechniken auf die Vortriebsdauer (Differenz der Vortriebsdauer von 0,94 Arbeitstagen für einen 100 m langen Abschnitt in der Vortriebsklasse X/Y) und damit auf die Vergütung der zeitgebundenen Baustellengemeinkosten, die in der Musterkalkulation ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

V.1.4 Aufbau der Musterkalkulation

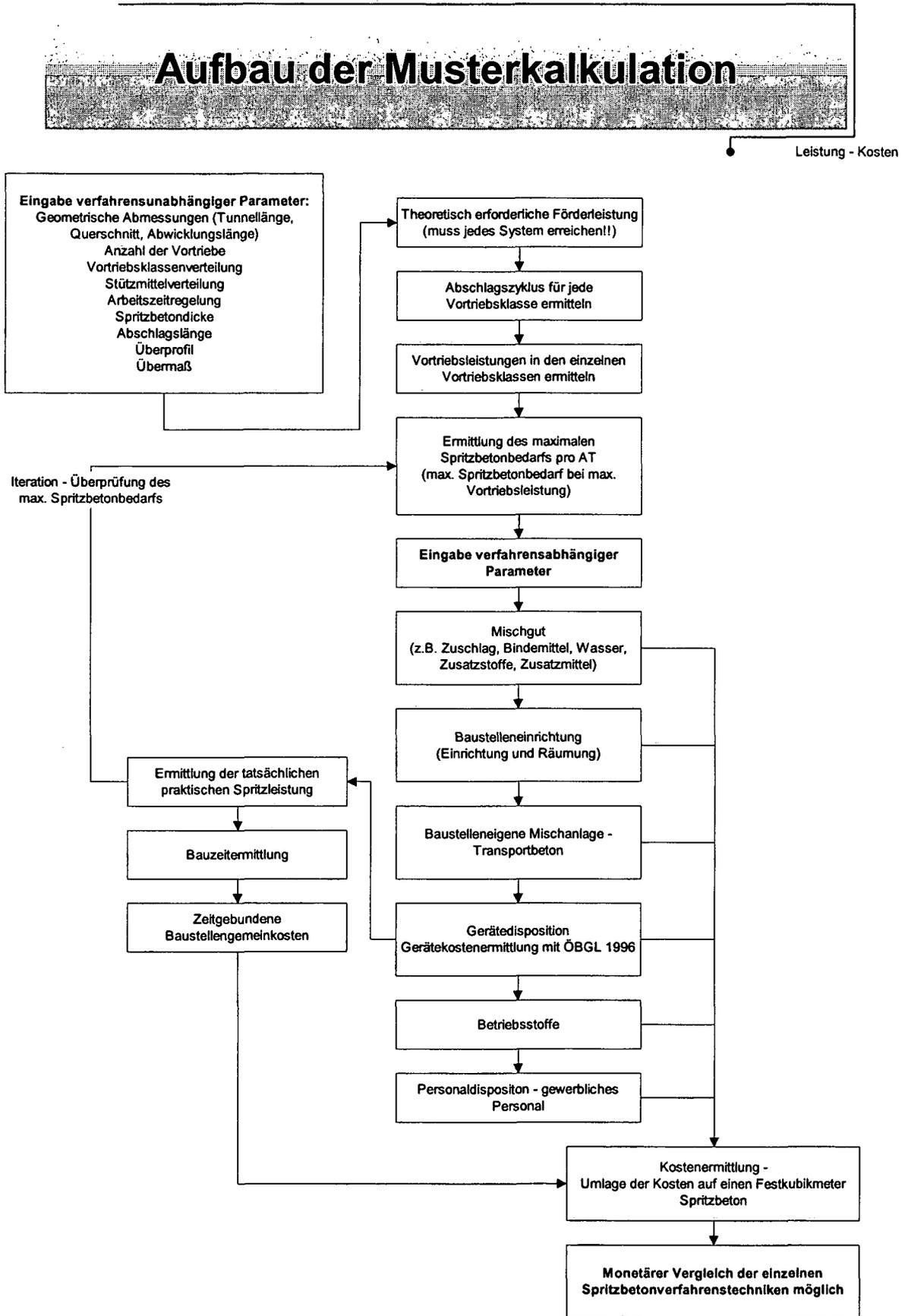


Abbildung 62: Flussdiagramm – Aufbau der Musterkalkulation

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 des Zeitbedarfes für Bohren, Laden, Schüttern) für jede Vortriebsklasse zu ermitteln und in entsprechende Tabellen einzutragen. Für die überschlägige Ermittlung der Abschlagszyklen und den zugehörigen Vortriebsleistungen in den einzelnen Vortriebsklassen ist in einem ersten Schritt eine erforderliche, 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 Gesteinskörnung 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. 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. Abbildung 62 – „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 **Losekubikmeter Spritzbeton** umgelegt. Die Musterkalkulation dient zum ausschließlich monetären Vergleich der Spritzbetonsysteme, für eine ganzheitliche Beurteilung und Bewertung wird im Kapitel VI die Methode der Nutzwertanalyse herangezogen. Damit können auch nicht monetär messbare Einflussparameter in den Entscheidungsfindungsprozess einbezogen werden.

V.2 Kalkulationsprogramm

Das Programm zur Kostenkalkulation der unterschiedlichen Spritzbetonsysteme basiert auf dem Tabellenkalkulationsprogramm „Excel“. Der grundsätzliche Aufbau der Musterkalkulation ist bereits im Punkt V.1 beschrieben worden, das gegenständliche Kapitel stellt daher eine Art „Handbuch“ zur effizienten Nutzung der einzelnen Tabellen dar. Hinsichtlich des Ablaufes bei der Bearbeitung sind die einzelnen Tabellen vom Anwender in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung zu bearbeiten. Dabei ist einerseits zu beachten, dass sämtliche Eintragungen nur in „weißen“ Feldern erfolgen dürfen und andererseits ausschließlich dimensionslose Zahlenwerte eingegeben werden dürfen, die entsprechenden Einheiten (z.B. m³/h) werden vom Programm automatisch hinzugefügt.

V.2.1 Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“

Im Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“ sind zunächst die wesentlichen Vortriebsklassen in der Kalotte (insgesamt 20 unterschiedliche Vortriebsklassen können eingetragen werden), die zugehörigen geometrischen Randbedingungen (z.B. Abwicklungslinien, Abschlagslänge) und die zeitkritischen Arbeitsvorgänge für einen Abschlagszyklus einzugeben. Außerdem ist vom Anwender eine für jedes Spritzbetonsystem unbedingt erforderliche Spritzbetonförderleistung in [m³-fest/h] anzugeben. Diese erforderliche Spritzbetonförderleistung dient in einem ersten Schritt als Grundlage für eine theoretische Bauzeitermittlung (s. Abbildung 63).

Zykluszeiten in der Kalotte - Zeitbedarf je Vortriebsklasse unabhängig vom gewählten Spritzbetonverfahren (s. Spalte 13)
 Zahleneingaben durch den Anwender dürfen nur in den weißen Feldern und dimensionslos (d.h. nur Wert, keine Einheit) erfolgen!!!

Nr.	VTKL	1 Abschlagslänge [m]	2 Bohrwagen einrichten [min]	3 Bohren Sprenglöcher [min]	4 Laden und Sprengen	5 Lüften [min]	6 Schüttern, Ablauten [min]	7 Geologische Aufnahme [min]	8 Bögen [min]	9 Glitter [min]	10 Anker [min]	11 Spiesse [min]	12 Verzugsbleiche [min]	13 (Bist12) Zeitbedarf je Abschlag [min]
1.	2/0,40	3,25	10	98	56	15	134	10	0	0	28	0	0	347
2.	2/0,65	3,25	10	98	56	15	134	10	0	15	28	0	0	362
3.	3/0,69	2,40	15	72	41	15	99	15	0	0	21	0	0	278
4.	3/0,99	2,40	15	72	41	15	99	15	0	0	28	0	0	283
5.	3/1,40	2,40	15	72	41	15	99	15	0	15	35	0	0	307
6.	4/2,32	1,80	15	60	30	15	72	15	0	43	34	0	0	284
7.	4/3,12	1,80	15	60	30	15	72	15	0	43	71	0	0	321
8.	4/4,26	1,80	15	60	30	15	72	15	15	43	77	12	0	354
9.	5/2,45	1,40	15	32	22	15	52	15	15	15	68	0	0	247
10.	5/5,87	1,40	15	32	22	15	52	15	28	15	72	0	0	284
11.	5/8,54	1,40	15	32	20	15	48	15	28	18	81	39	0	309
12.	6/8,84	1,10	20	24	12	15	113	20	34	47	84	0	0	349
13.	6/8,51	1,10	20	24	12	15	113	20	34	47	78	0	0	371
14.	6/11,60	1,10	20	18	12	15	113	20	34	47	88	18	0	383
15.	7/8,90	0,90	20	15	10	15	125	20	45	50	95	24	0	419
16.	7/12,25	0,90	20	15	10	15	125	20	45	50	110	32	15	457
17.	8/10,8	0,70	0	0	0	0	220	25	50	55	110	40	18	518
18.	8/16,7	0,70	0	0	0	0	240	25	50	55	125	42	20	557
19.	9/18,9	0,50	0	0	0	0	260	25	55	65	125	45	22	597
20.	9/22,4	0,50	0	0	0	0	280	25	55	65	135	48	24	632

Zykluszeiten in der Kalotte - Zeitbedarf je Vortriebsklasse unter Berücksichtigung der Spritzbetonsicherung (s. Spalte 25)
 Zahleneingaben durch den Anwender dürfen nur in den weißen Feldern und dimensionslos (d.h. nur Wert, keine Einheit) erfolgen!!!

Eingabe der unbedingt erforderlichen Spritzbetonförderleistung [m³-fest/h]: 8,00 m³-fest/h

? Umrechnungsfaktor m³-fest/h auf m³-loose pro Stunde: 1 m³-loose = 1 m³-fest / (1-Rückprall (%))
 ? Diese Leistung muss von jedem Spritzbetonverfahren erbracht werden!!!

Nr.	VTKL	14 Ausbruchsquerchnitt theoretisch A ₀ [m²]	15 Abwicklungs-länge A _u [m]	16 VTKL-Länge l _i [m]	17 (=16:1) Anzahl der Abschläge je VTKL n _a [1]	18 Spritzbeton-dicke Laibung d _l [m]	19 Überprofil d _p [m]	20 Geologisch bedingter Mehrausbruch d _g [1]	21 Spritzbeton-dicke Ortbetust d _o [m]	22 SpB-Kubatur theoretisch pro VTKL SpB _{th2} [m³-fest]	23 SpB-Kubatur theoretisch pro Abschlag SpB _{th2} [m³-fest]	24 Zeitbedarf Spritzbeton pro Abschlag [min]	25 (=24*13) Gesamte Zykluszeit pro Abschlag [min]	26 Abschläge pro Arbeitstag [1]	27 (=27*26) SpB-Kubatur theoretisch pro AT [m³/AT]	28 (=28*1) Vortriebsleistung [m/AT]	29 (=17*24) Gesamt-spritzdauer je VTKL [AT]	30 (=16:27) Vortriebsdauer je VTKL [AT]
1.	2/0,40	44,00	17,00	19,50	6	0,10	0,05	1,02	0,00	51	8,45	63	410	3,51	29,68	11,40	0,26	1,71
2.	2/0,65	44,00	17,00	13,00	4	0,10	0,05	1,02	0,00	34	8,45	63	425	3,39	28,61	11,00	0,18	1,18
3.	3/0,69	44,50	17,20	276,00	115	0,10	0,05	1,03	0,00	733	8,38	48	326	4,42	28,19	10,81	3,82	26,02
4.	3/0,99	44,50	17,20	1.020,00	425	0,15	0,05	1,03	0,00	3.614	8,50	64	347	4,15	35,31	9,97	18,82	102,35
5.	3/1,40	44,50	17,20	506,00	211	0,15	0,10	1,05	0,00	2.285	10,84	81	388	3,71	40,19	8,90	11,90	56,85
6.	4/2,32	45,00	17,40	531,00	295	0,15	0,10	1,06	0,00	2.448	8,30	62	346	4,16	34,52	7,49	12,75	70,93
7.	4/3,12	45,00	17,40	34,20	19	0,15	0,10	1,06	0,00	158	8,30	62	383	3,76	31,19	6,78	0,82	5,06
8.	4/4,26	45,00	17,40	484,20	289	0,25	0,10	1,08	0,00	3.185	11,84	89	443	3,25	38,50	5,85	16,59	82,72
9.	5/2,45	45,50	17,80	144,20	103	0,15	0,15	1,10	0,00	1.117	10,84	81	328	4,39	47,55	6,14	5,82	23,48
10.	5/5,87	45,50	17,80	88,80	62	0,25	0,15	1,10	0,00	672	10,84	81	345	4,17	45,21	5,84	3,50	14,87
11.	5/8,54	45,50	17,80	68,60	49	0,25	0,15	1,11	0,05	680	13,47	101	410	3,51	47,29	4,92	3,44	13,96
12.	6/8,84	46,00	17,80	148,50	135	0,30	0,15	1,14	0,05	1.710	12,67	95	444	3,24	41,08	3,57	8,91	41,62
13.	6/8,51	46,00	17,80	15,40	14	0,30	0,20	1,14	0,05	193	13,78	103	474	3,04	41,84	3,34	1,00	4,61
14.	6/11,60	46,00	17,80	259,60	236	0,30	0,20	1,16	0,05	3.310	14,02	105	488	2,95	41,37	3,24	17,24	80,01
15.	7/8,90	46,50	18,00	54,90	61	0,35	0,20	1,20	0,10	993	16,27	122	541	2,66	43,31	2,40	5,17	22,92
16.	7/12,25	46,50	18,00	11,70	13	0,35	0,25	1,20	0,10	224	17,24	129	586	2,46	42,35	2,21	1,17	5,29
17.	8/10,8	47,00	18,00	77,70	111	0,35	0,25	1,22	0,10	1.680	14,96	112	630	2,29	34,18	1,90	8,65	48,58
18.	8/16,7	47,00	18,00	135,80	194	0,40	0,30	1,24	0,10	3.252	16,76	128	683	2,11	35,36	1,48	16,94	91,96
19.	9/18,9	47,50	18,20	80,00	120	0,40	0,30	1,26	0,15	2.040	17,00	128	725	1,99	33,79	0,99	10,83	60,38
20.	9/22,4	47,50	18,20	12,00	24	0,40	0,35	1,26	0,15	422	17,58	132	764	1,89	33,14	0,94	2,20	12,73
		Gesamtvortriebslänge [m]:			3.959,10			Spritzbetonkubatur [m³-fest]:		28.760,49			Dauer [AT]:		149,79			767,24

Abbildung 63: Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“

V.2.2 Tabellenblatt „Weitere Kalkulationsparameter“

In diesem Tabellenblatt werden zunächst Berechnungsergebnisse aus dem Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“ dargestellt, vom Anwender sind weitere Eingaben zu machen:

- Die Anzahl gleichzeitig aufgefahrener Kalottenvortriebe,
- die Gesamtspritzbetonkubatur für Strosse, Sohle u.a. Vortriebsorte [in m³-fest],
- die Gesamtbetonkubatur für eine Ortbetoninnenschale [in m³-fest],
- die erforderliche Dauer der Bevorratung von Mischgut bzw. Spritzbetonausgangsstoffen aufgrund von Zulieferungsproblemen durch z.B. Wochenend- oder Nachtfahrverboten [in Arbeitstagen],
- die Gesamtanzahl an Arbeitstagen pro Monat,
- die Angabe der zeitgebundene Baustellengemeinkosten [in €/Monat] und
- die Eingabe des mittleren Bergwasserandrages [in l/s] über die Vortriebslänge.

Das Tabellenblatt „Weitere Kalkulationsparameter“ mit den o.a. Eingangsparametern ist in der Abbildung 64 dargestellt.

Nr.	Kalkulationsparameter		
	Beschreibung	Wert	Quelle
1.	Gesamtvortriebslänge	3.959,10 m	Tab. „Bauzeitermittlung“ (Spalte 16)
2.	Gesamtspritzbetonkubatur in der Kalotte	28.760,49 m ³ -fest	Tab. „Bauzeitermittlung“ (Spalte 22)
3.	Maximaler Spritzbetonbedarf pro Abschlag	17,58 m ³ -fest	Tab. „Bauzeitermittlung“ (Spalte 23)
4.	Anzahl "n" gleichzeitig aufgefahrener Kalottenvortriebe	1	Zahleneingabe erforderlich (Nicht "Null" eingeben!)
5.	Mittlerer Spritzbetonbedarf pro AT für "n=1" Vortriebe	37,63 m ³ -fest/AT	Tab. „Bauzeitermittlung“ (Spalte 27)
6.	Maximaler Spritzbetonbedarf pro AT für "n=1" Vortriebe	47,55 m ³ -fest/AT	Tab. „Bauzeitermittlung“ (Spalte 27)
7.	Max. Spritzbetonbedarf pro AT für "n" gleichzeitige Vortriebe (s. Zeile 4)	47,55 m ³ -fest/AT	Zeile 4 * Zeile 5
8.	Gesamtmenge Spritzbeton für Strosse, Sohle u.a. Vortriebsorte	12.500,00 m ³ -fest	Zahleneingabe erforderlich!
9.	Gesamtmenge Beton für die Ortbetoninnenschale	40.000,00 m ³ -fest	Zahleneingabe erforderlich!
10.	Gesamtbetonkubatur (Spritzbeton und Ortbetoninnenschale)	81.260,49 m ³ -fest	Zeile 2 + Zeile 7 + Zeile 8
11.	Erforderliche Dauer der Bevorratung von Mischgut bzw. Spritzbetonausgangsstoffen (z.B. keine Zulieferung wegen Wochenendfahrverbot möglich)	2,00 AT	Zahleneingabe erforderlich (Nicht "Null" eingeben!)
12.	Maximal erforderliche Vorratsmenge an Mischgut bzw. SpB-Ausgangsstoffen	95,10 m ³ -fest	Zeile 8 * Zeile 10
13.	Gesamtvortriebsdauer [AT] bei "n=1" Vortriebe	767,24 AT	Tab. „Bauzeitermittlung“ (Spalte 29)
14.	Gesamtvortriebsdauer [AT] für "n" gleichzeitige Vortriebe (s. Zeile 4)	767,24 AT	Zeile 12 / Zeile 4
15.	Arbeitstage pro Monat	30,00 AT/Mo	Zahleneingabe erforderlich!
16.	Gesamtvortriebsdauer [Monate] für "n=1" Vortriebe	25,57 Mo	Zeile 12 / Zeile 14
17.	Gesamtvortriebsdauer [Monate] für "n" gleichzeitige Vortriebe (s. Zeile 4)	25,57 Mo	Zeile 13 / Zeile 14
18.	Zeitgebundene Baustellengemeinkosten [€/Mo]	200.000 €/Mo	Zahleneingabe erforderlich!
19.	Durchschnittliche Bergwasserzutritte über die Vortriebslänge: Wenn kein Bergwasserzutritt, dann den Wert 1,00 eingeben! Bergwasserzutritte 0 bis 5 l/s: Wert zwischen 1,00 und 1,17 eingeben! Bergwasserzutritte 5 bis 15 l/s: Wert zwischen 1,17 und 1,33 eingeben! Bergwasserzutritte 15 bis 30 l/s: Wert zwischen 1,33 und 1,67 eingeben! Bergwasserzutritte 30 bis 60 l/s: Wert zwischen 1,67 und 2,33 eingeben! Bergwasserzutritte über 60 l/s: Wert zwischen 2,33 und 3,33 eingeben!	1,00	Zahleneingabe erforderlich!

Abbildung 64: Tabellenblatt „Weitere Kalkulationsparameter“

V.2.3 Tabellenblatt „Mischgutrezeptur“

Für die Kostenermittlung des Mischgutes [in €/m³-lose] sind im Tabellenblatt „Mischgutrezeptur“ mögliche Bandbreiten für den Bindemittel- bzw. Gesteinskörnungsgehalt und den Wasser-Bindemittelwert eines Kubikmeters Spritzbeton angegeben. Außerdem können vom Anwender noch zusätzlich erforderliche Zusatzmittel und Zusatzstoffe eingegeben werden. Das Tabellenblatt zur Kostenermittlung der Mischgutrezeptur ist in der Abbildung 65 dargestellt.

Spritzbetonausgangsstoffe		TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1.	Bindemittel											
	Bandbreite Bindemittelgehalt	300 - 400 kg/m³			300 - 400 kg/m³		330 - 450 kg/m³			270 - 350 kg/m³		
	Gewählt:	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	380,00 kg/m³	380,00 kg/m³	350,00 kg/m³	350,00 kg/m³	350,00 kg/m³	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³
	Einheitspreis Bindemittel		90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t		90,00 €/t	90,00 €/t		90,00 €/t	90,00 €/t
	Einheitspreis pro m³-SpB		30,60 €/m³	30,60 €/m³	34,20 €/m³	34,20 €/m³		31,50 €/m³	31,50 €/m³		30,60 €/m³	30,60 €/m³
2.	Gesteinskörnung											
	Bandbreite Gesteinskörnungsgehalt	1.800 - 2000 kg/m³			1.800 - 2.000 kg/m³		1.700 - 2.000 kg/m³			1.700 - 2.000 kg/m³		
	Gewählt:	1.900,00 kg/m³	1.900,00 kg/m³	1.900,00 kg/m³	1.880,00 kg/m³	1.880,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³
	Einheitspreis Zuschlag		30,00 €/t	11,00 €/t	30,00 €/t	11,00 €/t		30,00 €/t	11,00 €/t		30,00 €/t	11,00 €/t
	Einheitspreis pro m³-SpB		57,00 €/m³	20,90 €/m³	56,40 €/m³	20,68 €/m³		53,10 €/m³	19,47 €/m³		53,10 €/m³	19,47 €/m³
3.	Wasser											
	Wasser-Bindemittel-Wert	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50
	Wassergehalt	153,00 kg/m³	153,00 kg/m³	153,00 kg/m³	171,00 kg/m³	171,00 kg/m³	157,50 kg/m³	157,50 kg/m³	157,50 kg/m³	170,00 kg/m³	170,00 kg/m³	170,00 kg/m³
	Einheitspreis Wasser		0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t		0,50 €/t	0,50 €/t		0,50 €/t	0,50 €/t
	Einheitspreis pro m³-SpB		0,08 €/m³	0,08 €/m³	0,09 €/m³	0,09 €/m³		0,08 €/m³	0,08 €/m³		0,09 €/m³	0,09 €/m³
4.	Zusatzstoffe											
	Bandbreite Zusatzstoffgehalt	30 - 50 kg/m³			30 - 50 kg/m³		50 - 80 kg/m³			50 - 80 kg/m³		
	Zusatzstoff 1 (z.B. Flugasche)											
	Gewählt:	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	60,00 kg/m³	60,00 kg/m³	60,00 kg/m³	60,00 kg/m³	60,00 kg/m³	60,00 kg/m³
	Einheitspreis Zusatzstoff 1		0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t		58,00 €/t	58,00 €/t		58,00 €/t	58,00 €/t
	Einheitspreis (1) pro m³-SpB		0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³		3,48 €/m³	3,48 €/m³		3,48 €/m³	3,48 €/m³
	Zusatzstoff 2 (z.B. Bentonit)											
	Gewählt:	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³
	Einheitspreis Zusatzstoff 2		0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t		0,00 €/t	0,00 €/t		0,00 €/t	0,00 €/t
	Einheitspreis (2) pro m³-SpB		0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³		0,00 €/m³	0,00 €/m³		0,00 €/m³	0,00 €/m³
	Einheitspreis (1+2) pro m³-SpB		0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³		3,48 €/m³	3,48 €/m³		3,48 €/m³	3,48 €/m³
5.	Zusatzmittel											
	Zusatzmittel 1 (z.B. EB-AF)											
	Dosierung (%-Satz Bindemittel):	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	6,00 %	6,00 %	6,00 %	6,00 %	6,00 %	6,00 %
	Zusatzmittel 1	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	21,00 kg/m³	21,00 kg/m³	21,00 kg/m³	20,40 kg/m³	20,40 kg/m³	20,40 kg/m³
	Einheitspreis Zusatzmittel 1	0,00 €/kg	0,00 €/kg	0,00 €/kg	0,00 €/kg	0,00 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg
	Einheitspreis (1) pro m³-SpB	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	16,80 €/m³	16,80 €/m³	16,80 €/m³	16,32 €/m³	16,32 €/m³	16,32 €/m³
	Zusatzmittel 2 (z.B. Fließmittel)											
	Dosierung (%-Satz Bindemittel):	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	1,10 %	1,10 %	1,10 %	1,10 %	1,10 %	1,10 %
	Zusatzmittel 2	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	3,85 kg/m³	3,85 kg/m³	3,85 kg/m³	3,74 kg/m³	3,74 kg/m³	3,74 kg/m³
	Einheitspreis Zusatzmittel 2	0,00 €/kg	0,00 €/kg	0,00 €/kg	0,00 €/kg	0,00 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg
Einheitspreis (2) pro m³-SpB	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	3,08 €/m³	3,08 €/m³	3,08 €/m³	2,99 €/m³	2,99 €/m³	2,99 €/m³	
	Einheitspreis (1+2) pro m³-SpB	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	19,88 €/m³	19,88 €/m³	19,88 €/m³	19,31 €/m³	19,31 €/m³	19,31 €/m³	
6.	Mischgutkosten											
	Mischgutkosten ohne Zusatzmittel**	92,00 €/m³	87,68 €/m³	51,58 €/m³	90,69 €/m³	54,97 €/m³	95,00 €/m³	88,16 €/m³	54,53 €/m³	95,00 €/m³	87,27 €/m³	53,64 €/m³
	Mischgutkosten mit Zusatzmittel	92,00 €/m³	87,68 €/m³	51,58 €/m³	90,69 €/m³	54,97 €/m³	114,88 €/m³	108,04 €/m³	74,41 €/m³	114,31 €/m³	106,58 €/m³	72,95 €/m³

**Zusatzmittel werden zum Teil an der Düse zugegeben, d.h. sie müssen auch bei den Verfahren mit Fremdversorgung kostenmäßig erfasst werden

Abbildung 65: Tabellenblatt „Mischgutrezeptur“ [Angaben in m³-fest]

Vom Anwender können somit für jedes einzelne Spritzbetonsystem entweder die voreingestellten Mischgutzusammensetzungen übernommen werden oder eigenständig abgeändert werden (dabei sind für jeden Spritzbetonausgangsstoff mögliche Bandbreiten angegeben). Folgende Eingabeparameter zur Ermittlung der Mischgutzusammensetzungen sind im Tabellenblatt „Mischgutzusammensetzung“ erforderlich:

- Bindemittel: Bindemittelgehalt [kg/m^3] und zugehöriger Einheitspreis [$\text{€}/\text{m}^3$].
- Gesteinskörnung: Gesteinskörnungsgehalt [kg/m^3] und zugehöriger Einheitspreis [$\text{€}/\text{m}^3$].
- Wasser-Bindemittelwert
- Zusatzstoffe: Zusatzstoffgehalt [kg/m^3] und zugehöriger Einheitspreis [$\text{€}/\text{m}^3$].
- Zusatzmittel: Zudosierung als Prozentsatz vom Bindemittelgehalt und zugehöriger Einheitspreis [$\text{€}/\text{m}^3$]

Der in der Tabelle an die jeweilige Verfahrensbezeichnung angehängte Klammerausdruck (+) oder (-) gibt an, ob bei einem Spritzbetonsystem die Aufbereitung der Gesteinskörnung auf der Baustelle selbst erfolgt (z.B. TM-E (+) – Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut und baustelleneigener Gesteinskörnungsaufbereitung) oder ob der Gesteinskörnung extern zugekauft wird (z.B. TM-E (-) – Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut und externer Gesteinskörnungsaufbereitung).

V.2.4 Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“

Die Baustelleneinrichtung stellt ein wesentliches Beurteilungskriterium bei der Entscheidungsfindung für ein Spritzbetonsystem dar. In der Kostenkalkulation werden daher folgende Beurteilungskriterien monetär bewertet:

- Zunächst werden die theoretischen **Gesamtspritzbetonkubaturen** in der Kalotte bzw. in der Strosse, der Sohle u.a. Vortriebsorten in [$\text{m}^3\text{-fest}$] angegeben. Außerdem wird im Tabellenblatt die erforderliche Betonkubatur für die Ortbetoninnenschale angeführt. Die jeweiligen Betonkubaturen dienen in weiterer Folge als Umlageträger für Kosten der Baustelleneinrichtung (z.B. einmalige Kosten für die Errichtung einer eigenen Betonmischanlage oder einer baustelleneigenen Gesteinskörnungsaufbereitung).
- Im Tabellenblatt ist für jedes Spritzbetonsystem eine Bandbreite für den **Rückprallfaktor** angegeben. Vom Anwender muss ein entsprechender Wert in Prozent [%] ausgewählt werden, die Einflüsse der Bergwasserzutritte (vgl. IV.3.11) auf den Rückprall werden durch einen zusätzlichen Multiplikator berücksichtigt. Für den Rückprall in der Strosse kann der Rückprallfaktor abgemindert werden, nachdem in diesem Vortriebsbereich kein Spritzbetonauftrag über Kopf erfolgt.

- Für die Lagerung des **Bindemittels** werden – auf Basis des maximal erforderlichen Spritzbetonbedarfs pro Arbeitstag, der erforderlichen Bevorratung an Spritzbetonausgangsstoffen und der vorab eingegebenen Mischgutrezeptur - die Kosten für die Lagerung einer Tonne Bindemittel ermittelt. Anschließend werden diese Kosten in [€/t] auf den entsprechend erforderlichen Lagerungsbedarf hochgerechnet. Die einmaligen Kosten für den Auf- und Abbau der Silos werden auf die Spritzbetonkubatur in der Kalotte umgelegt.
- Für die Lagerung der **Gesteinskörnungen** wird eine analoge Berechnungsmethode zur Kostenermittlung der Bindemittellagerung gewählt.
- Die Kosten für die **Gesteinskörnungstrocknung** bei den Trockenspritzverfahren mit Eigenversorgung und eigener Gesteinskörnungsaufbereitung (TM-E (+)) werden mit Hilfe eines Richtwertes für den Energieverbrauch von 8 kWh/t ermittelt. Dieser Wert kann jedoch vom Anwender den jeweils vorliegenden Baustellenrandbedingungen angepasst werden.
- Für die Kostenermittlung einer **baustelleneigenen Gesteinskörnungsaufbereitung** bzw. einer **baustelleneigenen Betonmischanlage** sollte die erforderliche Betonkubatur auf der Baustelle mehr als 30.000 fm³ betragen (s. auch IV.2.4.1). Ist dieses Kriterium erfüllt (d.h. die Gesamtbetonkubatur ist größer als 30.000 fm³), dann erscheint in der entsprechenden Spalte im Tabellenblatt automatisch der Hinweis „Erfüllt“. Bei weniger als 30.000 fm³ Beton erscheint der Hinweis „Nicht erfüllt“, d.h. dem Anwender wird die Unwirtschaftlichkeit einer solchen Variante bereits in dieser Phase dargestellt.

Es werden in der Kostenkalkulation der Baustelleneinrichtung sowohl die Errichtung, der Betrieb und der Abbau der Anlagen (einmalige und zeitgebundene Kosten der Baustelleneinrichtung) berücksichtigt. Die monatlichen Kosten werden aber – nachdem die Anlagen sowohl zur Spritzbetonerzeugung als auch zur Ortbetonerzeugung verwendet werden können – anteilig auf die Gesamtbetonkubatur [in m³-fest] umgelegt. Bei den einmaligen Kosten für den Auf- und Abbau der Anlagen erfolgt ebenfalls eine Umlage auf die Gesamtbetonkubatur (= Spritzbeton in der Kalotte, Strosse, Sohle u.a. Vortriebsorten + Kubatur der Ortbetoninnenschale).

In der Abbildung 66 ist ein Auszug aus dem Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“ dargestellt.

Baustelleneinrichtung	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)	
1. Spritzbeton Kalotte												
Bandbreite für den Rückprallfaktor	25 bis 45 %			15 bis 30 %			5 bis 20 %			11 bis 15 %		
Gewählt: Rückprallfaktor	30,00 %	30,00 %	30,00 %	20,00 %	20,00 %	13,00 %	13,00 %	13,00 %	12,00 %	12,00 %	12,00 %	
Bergwasserandrang Faktor f _w	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Berücksichtigung des Rückpralls in der Kalotte: lose = 1 m ³ -fest/(1-(Rückprall [%]) ² fbw))	1,43	1,43	1,43	1,25	1,25	1,15	1,15	1,15	1,14	1,14	1,14	
Gesamtspritzbetonkubatur Kalotte												
Festkubikmeter SpB-Kalotte	28.760 m ³											
Losekubikmeter SpB-Kalotte*	41.086 m ³	41.086 m ³	41.086 m ³	35.951 m ³	35.951 m ³	33.058 m ³	33.058 m ³	33.058 m ³	32.682 m ³	32.682 m ³	32.682 m ³	
Maximal erforderliche Vorratsmenge an Mischgut- bzw. Spritzbetonausgangsstoffen	95 m ³		95 m ³	95 m ³		95 m ³	95 m ³					
Spritzbeton - Kalotte [m ³ -lose]*	136 m ³	136 m ³	136 m ³	119 m ³	119 m ³		109 m ³	109 m ³		108 m ³	108 m ³	
* Losekubikmeter SpB ist eine wesentliche Bemessungsgrundlage für die Kosten der Baustelleneinrichtung												
2. Spritzbeton Strosse, Sohle u.a. Vortriebsorte												
Gesamtspritzbetonkubatur [m ³ -fest]	12.500 m ³											
Abminderung des Rückprallfaktors in der Kalotte (kein Spritzbetonauftrag Überkopf)	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	
Berücksichtigung des Rückpralls in der Strosse	1,27	1,27	1,27	1,16	1,16	1,10	1,10	1,10	1,09	1,09	1,09	
Spritzbeton - Strosse, Sohle [m ³ -lose]	15.823 m ³	15.823 m ³	15.823 m ³	14.535 m ³	14.535 m ³	13.751 m ³	13.751 m ³	13.751 m ³	13.646 m ³	13.646 m ³	13.646 m ³	
3. OrtbetonInnenschale												
Gesamtbetonmenge [m ³ -fest]	40.000 m ³											
Verdichtungsmaß [m ³ -lose zu m ³ -fest]	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Ortbeton für Innenschale [m ³ -lose]	41.200 m ³											
4. Gesamtmenge (Kalotte + Strosse + OrtbetonInnenschale)												
	98.109 m ³	98.109 m ³	98.109 m ³	91.685 m ³	91.685 m ³	88.009 m ³	88.009 m ³	88.009 m ³	87.529 m ³	87.529 m ³	87.529 m ³	
5. Bindemittellagerung												
Bindemittelgehalt lt. Mischgutrezeptur	340,00 kg/m ³	340,00 kg/m ³	340,00 kg/m ³	380,00 kg/m ³	380,00 kg/m ³	350,00 kg/m ³	350,00 kg/m ³	350,00 kg/m ³	340,00 kg/m ³	340,00 kg/m ³	340,00 kg/m ³	
Max. Materialbevorratung (SpB m ³ -lose)	136 m ³	136 m ³	136 m ³	119 m ³	119 m ³		109 m ³	109 m ³		108 m ³	108 m ³	
Max. erford. Bindemittelbevorratung [t]	46 t	46 t	46 t	45 t	45 t		38 t	38 t		37 t	37 t	
Bindemittelsilo 150 t (ÖBGL 1301-0150)												
Erforderliche Anzahl "x" an 150 t - Bindemittelsilos	1,00 Stk		1,00 Stk	1,00 Stk		1,00 Stk	1,00 Stk					
AV und Reparaturentgelt pro Monat (für 1 Silo)	934 €/Mo		934 €/Mo	934 €/Mo		934 €/Mo	934 €/Mo					
AV und Reparaturentgelt pro Monat (für "x" Silo)	934 €/Mo		934 €/Mo	934 €/Mo		934 €/Mo	934 €/Mo					
AV und Rep. pro Monat und Tonne	6,23 €/Mo&t		6,23 €/Mo&t	6,23 €/Mo&t		6,23 €/Mo&t	6,23 €/Mo&t					
Monatliche Kosten für Bindemittellagerung	288 €/Mo	288 €/Mo	288 €/Mo	281 €/Mo	281 €/Mo		238 €/Mo	238 €/Mo		229 €/Mo	229 €/Mo	
Einmalige Kosten (Auf- und Abbau für 1 Silo)	3.000 €	3.000 €	3.000 €	3.000 €	3.000 €		3.000 €	3.000 €		3.000 €	3.000 €	
Einmalige Kosten (Auf- und Abbau für "x" Silos)	3.000 €	3.000 €	3.000 €	3.000 €	3.000 €		3.000 €	3.000 €		3.000 €	3.000 €	
Umlage einmalige Kosten auf m ³ -SpB-Kalotte	0,07 €/m ³	0,07 €/m ³	0,07 €/m ³	0,08 €/m ³	0,08 €/m ³		0,09 €/m ³	0,09 €/m ³		0,09 €/m ³	0,09 €/m ³	

Abbildung 66: Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“

V.2.5 Tabellenblatt „Spritzbetongeräte“

Bei der Kostenkalkulation der Spritzbetongeräte werden ausschließlich jene Geräte berücksichtigt, die unmittelbar am Spritzbetonauftrag in der Kalotte beteiligt sind. In Abhängigkeit von der Spritzbetonförderleistung wird auf der Grundlage einer vorgeschlagenen Gerätedisposition automatisch die erforderliche Anzahl an Spritzbetongeräten gewählt. Die Kostenansätze der Geräte werden der Österreichischen Baugeräteliste (ÖBGL – Fassung 1996) entnommen. Die in der Baugeräteliste angeführten Sätze für Abschreibung und Verzinsung werden dabei vorab auf 50 % herabgesetzt, das Reparaturentgelt wird auf 70 % abgemindert. Diese Abminderungsfaktoren können vom Anwender aber entsprechend angepasst werden, die Kosten für die Betriebsmittel Diesel und Strom können ebenfalls individuell eingestellt werden.

Der Einsatzfaktor der Spritzbetongeräte bildet die Grundlage zur Ermittlung der Betriebsstoffkosten und errechnet sich als Quotient aus dem mittleren Zeitaufwand für die Spritzbetonsicherung in der Kalotte [in h/Mo] und der in der ÖBGL vorgegebenen monatlichen Arbeitszeit von 172 pro Monat. Damit ergibt sich beispielsweise der Einsatzfaktor in der Abbildung 67 zu 0,82 ($=141,12 \text{ h/Mo} / 172 \text{ h/Mo}$). Im Programm werden die monatlichen und stündlichen Gerätekosten ermittelt, bei der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung werden diese Gerätekosten auf die Spritzleistung umgelegt. In der Abbildung 67 ist ein Auszug aus dem Tabellenblatt „Spritzbetongeräte“ dargestellt.

V.2.6 Tabellenblatt „Vortriebspersonal“

Nach Lauffer [56] muss für eine Vergleichsrechnung der Verfahren allerdings die gesamte Vortriebsmannschaft auf den Spritzbeton umgelegt werden und zwar unabhängig davon, wie viele Mineure tatsächlich mit der Verarbeitung des Spritzbetons beschäftigt sind. Diese Vorgangsweise wird in der Musterkalkulation auch umgesetzt. In der gegenständlichen Arbeit wird allerdings eine zusätzliche Unterteilung in „produktive“ und „unproduktive“ Löhne vorgenommen.

- *„Produktiver Lohn“*: Diese Lohnkosten hängen direkt mit dem Spritzbetonauftrag zusammen, dazu zählen z.B. der Düsenführerlohn oder der Lohn für den Maschinisten an der mobilen Mischanlage.
- *„Unproduktiver Lohn“*: Unproduktive Lohnkosten fallen beispielsweise bei Nebenarbeiten im Vortrieb (z.B. Lutte nachhängen) an und können nicht den Spritzbetonarbeiten unmittelbar zugeordnet werden.

In der Abbildung 68 ist die Zuordnung der Vortriebsmannschaft zu produktiven und unproduktiven Tätigkeiten übersichtlich in einer Matrix dargestellt, vom Anwender sind die Mittelohnkosten und der Mannschaftsstand eines Vortriebsdrittels anzugeben.

Eingangsparameter	Wert	Quelle
Unbedingt erforderliche Spritzbetonförderleistung:	8,00 m³-fest/h	s. Tab. "Zykluszeiten, Grundlagen"
Maximal erforderlicher Spritzbetonbedarf pro Abschlag:	17,58 m³-fest	s. Tab. "Weitere Kalkulationsparameter"
Spritzbetonbedarf pro Abschlag bei TM-F und TM-E (Rückprall!)	25,11 m³-lose	
Spritzbetonbedarf pro Abschlag bei FMS-F und FMS-E (Rückprall!)	21,97 m³-lose	
Spritzbetonbedarf pro Abschlag bei NSDI-F und NSDI-E (Rückprall!)	20,20 m³-lose	
Spritzbetonbedarf pro Abschlag bei NSDU-F und NSDU-E (Rückprall!)	19,97 m³-lose	
Durchschnittlicher Spritzbetonbedarf pro Arbeitstag	37,63 m³-fest	s. Tab. "Weitere Kalkulationsparameter"
Zeitaufwand SpB-Sicherung pro AT (=max. SpB-Bedarf / Leistung)	4,70 h/AT	
Zeitaufwand SpB-Sicherung pro Monat	141,12 h/AT	
Einsatzfaktor (=Zeitaufwand SpB-Sicherung/Monat / 172 h/Mo)	0,82	
Abminderungsfaktoren für ÖBGL 1996:		
Abminderungsfaktor Abschreibung	0,50	
Abminderungsfaktor Verzinsung	0,70	
Betriebsmittel Diesel	0,65 €/l	
Mittlerer Dieserverbrauch	0,15 l/kWh	
Betriebsmittel Strom	0,22 €/kWh	

Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut (TM-F und TM-E)

Nr.	Anzahl	Gerätebezeichnung	ÖBGL-Nr.	AV/Gerät [€/Mo]	REP/Gerät [€/Mo]	Abgem. AV+REP [€/Mo]	Motorleistung [kW]	Einsatzfaktor [1]	Betriebsmittel [€/h]	Betriebsmittel [€/Mo]	Gerätekosten [€/Mo]
1.	2	Spritzbomber (2 x 10 m³)		4.600,00	5.500,00	12.300,00	320	0,82	25,60	4.402,94	16.702,94
2.	2	Schraubenkompressor	6113-0130	960,00	862,00	2.166,80	182	0,82	32,85	5.650,44	7.817,24
3.	2	Druckluftbehälter	6124-0030	48,00	26,00	84,40					84,40
4.	1	Bagger + Hebebühne	3145-0130	3.680,00	3.520,00	4.304,00	65	0,82	5,20	894,35	5.198,35
Gerätekosten pro Monat											29.802,92 €/Mo
Gerätekosten pro Stunde											173,27 €/h

Trockenspritzverfahren mit erdfuchtem Mischgut (FMS-F und FMS-E)

Nr.	Anzahl	Gerätebezeichnung	ÖBGL-Nr.	AV/Gerät [€/Mo]	REP/Gerät [€/Mo]	Abgem. AV+REP [€/Mo]	Motorleistung [kW]	Einsatzfaktor [1]	Betriebsmittel [€/h]	Betriebsmittel [€/Mo]	Gerätekosten [€/Mo]
1.	1	Mixomat		6.100,00	4.100,00	5.920,00	50	0,82	9,03	1.552,32	7.472,32
2.	2	Trockenspritzmaschine		2.910,00	3.490,00	7.798,00	24	0,82	4,33	745,11	8.541,11
3.	2	Schraubenkompressor	6113-0130	960,00	862,00	2.166,80	182	0,82	32,85	5.650,44	7.817,24
4.	2	Druckluftbehälter	6124-0050	80,00	42,00	138,80					138,80
5.	1	Bagger + Hebebühne	3145-0130	3.680,00	3.520,00	4.304,00	65	0,82	5,20	894,35	5.198,35
6.	1	Radlader (Befüllung Mixomat)	3301-0155	5.180,00	4.960,00	6.062,00	160	0,41	6,40	1.100,73	7.162,73
7.	1	Zementsilowagen (Befüllung)	2926-0500	2.360,00	2.000,00	2.580,00	155	0,82	12,40	2.132,67	4.712,67
Gerätekosten pro Monat											41.043,22 €/Mo
Gerätekosten pro Stunde											238,62 €/h

Nassspritzverfahren im Dichtstrom - Fremdversorgung

Nr.	Anzahl	Gerätebezeichnung	ÖBGL-Nr.	AV/Gerät [€/Mo]	REP/Gerät [€/Mo]	Abgem. AV+REP [€/Mo]	Motorleistung [kW]	Einsatzfaktor [1]	Betriebsmittel [€/h]	Betriebsmittel [€/Mo]	Gerätekosten [€/Mo]
1.	1	Spritzbetonmanipulator		8.000,00	9.500,00	10.650,00	127	0,82	22,92	3.942,89	14.592,89
2.	1	Schraubenkompressor	6113-0130	960,00	862,00	1.083,40	91	0,82	18,43	2.825,22	3.908,62
3.	1	Druckluftbehälter	6124-0050	80,00	42,00	69,40					69,40
4.	1	TSPM zur BE-Dosierung	2550-0003	290,00	350,00	390,00	5	0,82	0,90	155,23	545,23
Gerätekosten pro Monat											19.116,14 €/Mo
Gerätekosten pro Stunde											111,14 €/h

Abbildung 67: Tabellenblatt „Vortriebsgerät“

Vortriebsdrittel - Mannschaftsstand	6 Mann
Mittellohncosten	35,00 €/h

Tätigkeitsbeschreibung	Verfahren							
	TM-F	TM-E	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E	NSDU-F	NSDU-E
Spritzbetonbomber	2,0 Mann	2,0 Mann						
Maschinist Mixomat			1,0 Mann	1,0 Mann				
Radladerfahrer			0,5 Mann	0,5 Mann				
Maschinist Betonpumpe					1,0 Mann	1,0 Mann		
Maschinist Spritzmaschine							1,0 Mann	1,0 Mann
Fahrer Fahrmischer						3,4 Mann		3,3 Mann
Düsenführer	2,0 Mann	2,0 Mann	2,0 Mann	2,0 Mann	1,0 Mann	1,0 Mann	1,0 Mann	1,0 Mann
"Produktive Mineure"	4,0 Mann	4,0 Mann	3,5 Mann	3,5 Mann	2,0 Mann	5,4 Mann	2,0 Mann	5,3 Mann
"Produktiver SpB-Lohn"	140,00 €/h	140,00 €/h	122,50 €/h	122,50 €/h	70,00 €/h	187,85 €/h	70,00 €/h	186,51 €/h
"Unproduktive Mineure"	2,0 Mann	2,0 Mann	2,5 Mann	2,5 Mann	4,0 Mann	0,6 Mann	4,0 Mann	0,7 Mann
"Unproduktiver SpB-Lohn"	70,00 €/h	70,00 €/h	87,50 €/h	87,50 €/h	140,00 €/h	22,15 €/h	140,00 €/h	23,49 €/h

Abbildung 68: Tabellenblatt „Vortriebspersonal“

V.2.7 Tabellenblatt „Wirtschaftlichkeitsvergleich“

Im abschließenden Tabellenblatt über den „Wirtschaftlichkeitsvergleich“ werden die insgesamt 8 (durch die zusätzliche Berücksichtigung von baustelleneigener Gesteinskörnungsaufbereitung und externem Gesteinskörnungszukauf werden eigentlich 11 unterschiedliche Systeme miteinander verglichen) analysierten Spritzbetonsysteme einander übersichtlich gegenübergestellt. Die Verfahren werden dabei – auf der Grundlage der Eingaben in den vorhergehenden Tabellenblättern - miteinander nach den nachfolgenden Gesichtspunkten verglichen.

- **Vortriebsdauer:** Die unterschiedlichen Vortriebsdauern resultieren aus den unterschiedlichen Spritzbetonförderleistungen jedes Verfahrens. Dadurch ergeben sich Verminderungen (bei Verkürzung der Vortriebsdauern durch höhere Spritzbetonförderleistungen) oder Erhöhungen (bei Verlängerung der Vortriebsdauer durch niedrige Spritzbetonförderleistungen) der zeitgebundenen Baustellengemeinkosten, die für einen gesamtwirtschaftlichen Vergleich auf die Spritzbetonkosten umgelegt werden müssen.
- **Mischgutkosten** (s. Tabellenblatt „Mischgutrezepturen - V.2.3)
- **Baustelleneinrichtungskosten** (Materiallagerung, -aufbereitung, -herstellung – s. V.2.4)
- **Vortriebsgeräte** (s. V.2.5)
- **Vortriebspersonal** (s. V.2.6)
- **Sonstige Kosten:** Darunter werden z.B. Verschleißkosten für das Spritzgerät, die Spritzdüsen und Förderschläuche, die Kosten für den Wasserbedarf für die Reinigung der Geräte und die Kosten für eine eventuell erforderliche Gesteinskörnungsbeheizung verstanden (s. auch [150]). Die sonstigen Kosten können vom Anwender individuell verändert werden.

Schlussendlich werden für die einzelnen Verfahrenstechniken in der Kalkulation sowohl die Gesamtkosten je Losekubikmeter Spritzbeton, als auch die Gesamtkosten der Spritzbetonerzeugung ermittelt. Das Tabellenblatt „Wirtschaftlichkeitsvergleich“ ist auszugsweise in der Abbildung 69 dargestellt.

Wirtschaftlichkeit - Oberfläche Gesamtkosten	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)	
1. Grundlagen - Bauzeit / SpB-Leistung												
Spritzbetonkubatur Kalotte [m³-fest]	28.760 m³	28.760 m³	28.760 m³	28.760 m³	28.760 m³	28.760 m³	28.760 m³	28.760 m³	28.760 m³	28.760 m³	28.760 m³	
Rückprallfaktor	30,00 %	30,00 %	30,00 %	20,00 %	20,00 %	13,00 %	13,00 %	13,00 %	12,00 %	12,00 %	12,00 %	
Bergwasserandrang Faktor flow	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Berücksichtigung des Rückpralls in der Kalotte: lose = 1 m³-fest / (1 - (Rückprall [%] * flow))	1,43	1,43	1,43	1,25	1,25	1,15	1,15	1,15	1,14	1,14	1,14	
Spritzbetonkubatur Kalotte [m³-loose]	41.086 m³	41.086 m³	41.086 m³	35.951 m³	35.951 m³	33.058 m³	33.058 m³	33.058 m³	32.682 m³	32.682 m³	32.682 m³	
Theoretische erforderliche Förderleistung [m³-fest/h]	8,00 m³/h	8,00 m³/h	8,00 m³/h	8,00 m³/h	8,00 m³/h	8,00 m³/h	8,00 m³/h	8,00 m³/h	8,00 m³/h	8,00 m³/h	8,00 m³/h	
Theoretische Gesamtfortriebsdauer [AT]	767,24 AT	767,24 AT	767,24 AT	767,24 AT	767,24 AT	767,24 AT	767,24 AT	767,24 AT	767,24 AT	767,24 AT	767,24 AT	
Theoretische Gesamtspritzdauer [AT]	149,79 AT	149,79 AT	149,79 AT	149,79 AT	149,79 AT	149,79 AT	149,79 AT	149,79 AT	149,79 AT	149,79 AT	149,79 AT	
Theoretische Gesamtspritzdauer [h]	3.595,06 h	3.595,06 h	3.595,06 h	3.595,06 h	3.595,06 h	3.595,06 h	3.595,06 h	3.595,06 h	3.595,06 h	3.595,06 h	3.595,06 h	
Theoretische Förderleistung [m³-loose/h]	11,43 m³/h	11,43 m³/h	11,43 m³/h	10,00 m³/h	10,00 m³/h	9,20 m³/h	9,20 m³/h	9,20 m³/h	9,09 m³/h	9,09 m³/h	9,09 m³/h	
Praktische Förderleistung												
Bandbreite [m-loose/h]	5,5 bis 8,0 m³/h und Düse			5,5 bis 9,0 m³/h und Düse			5 bis 25 m³/h und Düse			5 bis 20 m³/h und Düse		
Erforderliche Düsenanzahl	2,00 Stk	2,00 Stk	2,00 Stk	2,00 Stk	2,00 Stk	1,00 Stk	1,00 Stk	1,00 Stk	1,00 Stk	1,00 Stk	1,00 Stk	
Gewicht:	14,00 m³/h	14,00 m³/h	14,00 m³/h	14,00 m³/h	14,00 m³/h	18,00 m³/h	18,00 m³/h	18,00 m³/h	16,00 m³/h	16,00 m³/h	16,00 m³/h	
Berücksichtigung Versorgungsunterbrechungen												
Bandbreite [l]	Bandbreite 0,90 bis 1,00			Bandbreite 0,95 bis 1,00			Bandbreite 0,80 bis 1,00			Bandbreite 0,80 bis 1,00		
Gewicht:	0,95	0,90	0,90	0,95	0,95	0,90	0,95	0,95	0,90	0,90	0,95	
Praktische Förderleistung [m³-loose/h]	13,30 m³/h	12,60 m³/h	12,60 m³/h	13,30 m³/h	13,30 m³/h	16,20 m³/h	17,10 m³/h	17,10 m³/h	14,40 m³/h	15,20 m³/h	15,20 m³/h	
Tatsächliche Gesamtspritzdauer [h]	3.089,20 h	3.280,83 h	3.280,83 h	2.703,05 h	2.703,05 h	2.040,62 h	1.933,22 h	1.933,22 h	2.269,81 h	2.150,16 h	2.150,16 h	
Tatsächliche Gesamtspritzdauer [AT]	126,72 AT	135,87 AT	135,87 AT	112,63 AT	112,63 AT	85,03 AT	80,55 AT	80,55 AT	94,57 AT	89,59 AT	89,59 AT	
Tatsächliche Gesamtfortriebsdauer [AT]	746,16 AT	753,31 AT	753,31 AT	730,07 AT	730,07 AT	702,47 AT	697,99 AT	697,99 AT	712,01 AT	707,03 AT	707,03 AT	
Tatsächliche Gesamtfortriebsdauer [Mo]	24,87 Mo	25,11 Mo	25,11 Mo	24,34 Mo	24,34 Mo	23,42 Mo	23,27 Mo	23,27 Mo	23,73 Mo	23,57 Mo	23,57 Mo	
Verminderung / Erhöhung der zeitgebundenen Bet.gemeinkosten durch Verkürzung / Verlängerung der Gesamtspritzdauer [AT]	-21,08 AT	-13,93 AT	-13,93 AT	-37,17 AT	-37,17 AT	-64,77 AT	-69,24 AT	-69,24 AT	-55,23 AT	-60,20 AT	-60,20 AT	
2. Mischgutkosten												
	92,00 €/m³	87,68 €/m³	51,58 €/m³	90,69 €/m³	54,97 €/m³	114,85 €/m³	108,04 €/m³	74,41 €/m³	114,31 €/m³	108,58 €/m³	72,95 €/m³	
3. Baustelleneinrichtungskosten												
Bindemittelagerung												
Monatliche Kosten für Bindemittelagerung	287,63 €/Mo	287,63 €/Mo	287,63 €/Mo	281,29 €/Mo	281,29 €/Mo	238,23 €/Mo	238,23 €/Mo	238,23 €/Mo	228,80 €/Mo	228,80 €/Mo	228,80 €/Mo	
Gesamtkosten über Fortriebsdauer	7.153,96 €	7.222,51 €	7.222,51 €	6.845,28 €	6.845,28 €	5.542,85 €	5.542,85 €	5.542,85 €	5.392,24 €	5.392,24 €	5.392,24 €	
Umlage auf m³-Spritzbeton Kalotte	0,17 €/m³	0,18 €/m³	0,18 €/m³	0,19 €/m³	0,19 €/m³	0,17 €/m³	0,17 €/m³	0,17 €/m³	0,16 €/m³	0,16 €/m³	0,16 €/m³	
Umlage der einmaligen Kosten auf m³-SpB	0,07 €/m³	0,07 €/m³	0,07 €/m³	0,08 €/m³	0,08 €/m³	0,08 €/m³	0,09 €/m³	0,09 €/m³	0,09 €/m³	0,09 €/m³	0,09 €/m³	
Kosten für Bindemittelagerung	0,25 €/m³	0,25 €/m³	0,25 €/m³	0,27 €/m³	0,27 €/m³	0,26 €/m³	0,26 €/m³	0,26 €/m³	0,26 €/m³	0,26 €/m³	0,26 €/m³	
Gesteinskörnungslagerung												
Monatliche Kosten für Lagerung	894,62 €/Mo	894,62 €/Mo	894,62 €/Mo	774,55 €/Mo	774,55 €/Mo	670,56 €/Mo	670,56 €/Mo	670,56 €/Mo	662,94 €/Mo	662,94 €/Mo	662,94 €/Mo	
Gesamtkosten über Fortriebsdauer	22.250,84 €	22.464,08 €	22.464,08 €	18.849,14 €	18.849,14 €	15.601,43 €	15.601,43 €	15.601,43 €	15.623,89 €	15.623,89 €	15.623,89 €	
Umlage auf m³-Spritzbeton Kalotte	0,54 €/m³	0,55 €/m³	0,55 €/m³	0,52 €/m³	0,52 €/m³	0,47 €/m³	0,47 €/m³	0,47 €/m³	0,48 €/m³	0,48 €/m³	0,48 €/m³	
Umlage der einmaligen Kosten auf m³-SpB	0,09 €/m³	0,09 €/m³	0,09 €/m³	0,10 €/m³	0,10 €/m³	0,11 €/m³	0,11 €/m³	0,11 €/m³	0,11 €/m³	0,11 €/m³	0,11 €/m³	
Kosten für Gesteinskörnungslagerung	0,63 €/m³	0,63 €/m³	0,63 €/m³	0,62 €/m³	0,62 €/m³	0,58 €/m³	0,58 €/m³	0,58 €/m³	0,59 €/m³	0,59 €/m³	0,59 €/m³	
Kosten für Gesteinskörnungstrocknung		3,04 €/m³	3,04 €/m³		2,26 €/m³							
Kosten für Gesteinskörnungsaufbereitung			6,31 €/m³		6,29 €/m³			5,99 €/m³			6,00 €/m³	
Betonmischenanlage												
Anteilige monatliche Kosten für Betonmischenanlage		10.740,39 €/Mo	10.740,39 €/Mo			9.848,07 €/Mo	9.848,07 €/Mo	9.848,07 €/Mo	9.800,46 €/Mo	9.800,46 €/Mo	9.800,46 €/Mo	
Gesamtkosten über Fortriebsdauer		269.694,69 €	269.694,69 €			229.129,52 €	229.129,52 €	229.129,52 €	230.974,75 €	230.974,75 €	230.974,75 €	
Umlage auf m³-Spritzbeton Kalotte		6,56 €/m³	6,56 €/m³			6,93 €/m³	6,93 €/m³	6,93 €/m³	7,07 €/m³	7,07 €/m³	7,07 €/m³	
Umlage der einmaligen Kosten auf m³-SpB		1,22 €/m³	1,22 €/m³			1,36 €/m³	1,36 €/m³	1,36 €/m³	1,37 €/m³	1,37 €/m³	1,37 €/m³	
Kosten für Betonmischenanlage		7,79 €/m³	7,79 €/m³			8,29 €/m³	8,29 €/m³	8,29 €/m³	8,44 €/m³	8,44 €/m³	8,44 €/m³	
Kosten für Baustelleneinrichtung	0,87 €/m³	11,71 €/m³	18,02 €/m³	0,90 €/m³	9,45 €/m³	9,13 €/m³	15,12 €/m³	15,12 €/m³	9,28 €/m³	15,28 €/m³	15,28 €/m³	

Abbildung 69: Tabellenblatt „Wirtschaftlichkeitsvergleich“

VI Bewertung der Einflussparameter

VI.1 Nutzwertanalyse

Nach Zangemeister [152] 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 der Abbildung 70. 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.

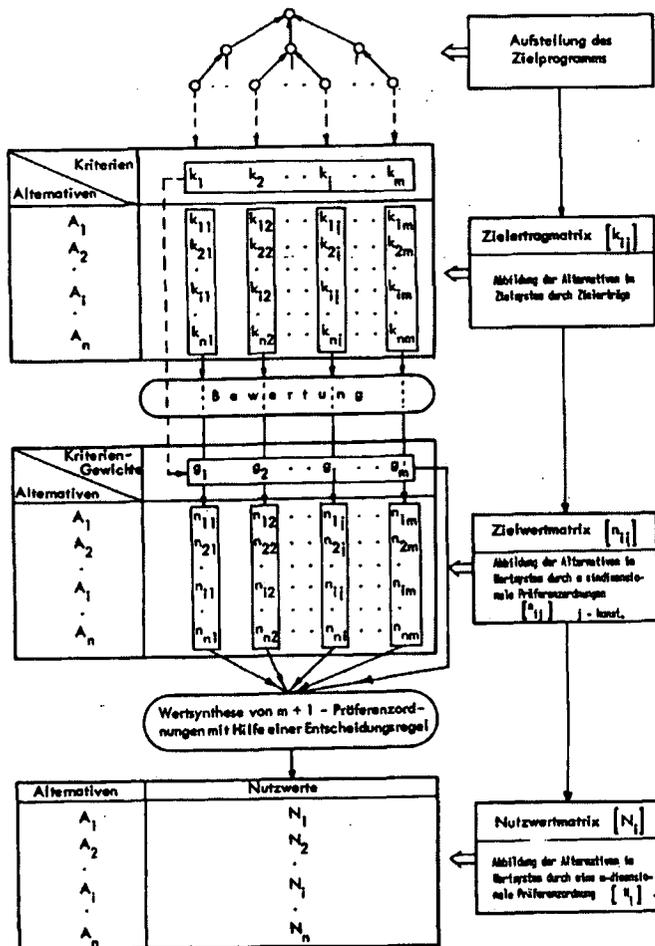


Abbildung 70: Schematische Darstellung des Ablaufes einer Nutzwertanalyse [152]

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.

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 26 – 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 soll anhand von ausgewählten Tunnelbauprojekten erfolgen) lässt sich in einfachster Form wie folgt darstellen:

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
		Summe	100

Tabelle 26: Zielprogramm der Beurteilungsaspekte

Mit der Bezeichnung „Stufe 1“ in der Tabelle 26 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 26 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

(vgl. Tabelle 17 bis Tabelle 24). 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 27 dargestellt. Der Zielertrag für das Beurteilungskriterium „Rückprall“ (in diesem Fall wird der Zielertrag als numerischer Wert beschrieben – für das Nassspritzverfahren im Dichtstrom wird beispielsweise ein numerischer Wert von 15 % eingesetzt) ergibt sich für das Trockenspritz- bzw. für das Nassspritzverfahren mit [151]:

Zielertrag	Spritzbetonverfahren		
	TM	FMS	NSDI
Rückprall	40 %	22 %	15 %

Tabelle 27: 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 27). Soll der Rückprall eines Spritzbetonsystems möglichst gering sein, dann wäre in einer Bewertung das Nassspritzverfahren im Dichtstrom als sehr gut geeignet - und somit besser als die übrigen beiden Verfahren TM und FMS - zu bewerten. Die Bewertung mit „Sehr gut“ entspricht in diesem Fall dem sogenannten Zielwert.

Die insgesamt 8 analysierten Spritzbetonsysteme werden zunächst in der sogenannten **Zielwertmatrix** hinsichtlich der Beurteilungsaspekte (z.B. Baubetrieb) und der untergeordneten **Beurteilungskriterien** (z.B. Rückprall) mit Hilfe eines **Punktesystems** bewertet. Als Bewertungsgrundlagen dienen dabei die Zielertragsmatrizen für die einzelnen Beurteilungsaspekte (s. Tabelle 17 bis Tabelle 24). Dem geeignetsten System wird dabei für ein bestimmtes Beurteilungskriterium das Punktemaximum von 24 Punkten zugeordnet, während das am schlechtesten geeignete System lediglich 3 Punkte erhält. Werden zwei oder mehrere Verfahren hinsichtlich eines Beurteilungskriteriums als gleichwertig beurteilt, dann erhalten sie auch die gleiche Punktezahl.

Damit erfolgt für die einzelnen Beurteilungsaspekte in diesem Schritt zunächst eine **kardinale Präferenzordnung** (vgl. [152]). Diese Präferenzordnung (bzw. die Punktebewertung der Spritzbetonsysteme für ein Beurteilungskriterium) wird vom Entscheidungshilfesystem vorgegeben und kann vom Anwender nicht beeinflusst werden.

Ein Ausscheidungs- oder K.O – Kriterium für ein Spritzbetonsystem (z.B. sind die Verfahren FMS-F und FMS-E aufgrund der Gerätegröße der mobilen Mischanlage nicht bei Ulmenstollenvortrieben einsetzbar) wird durch eine Punktebewertung des jeweiligen Beurteilungskriteriums mit „Null“ berücksichtigt. Ist bei einem Spritzbetonsystem durch die Baustellenrandbedingungen ein solches K.O. – Kriterium erfüllt, dann wird es keiner weiteren Nutzwertanalyse mehr unterzogen und als ungeeignet ausgeschieden.

Der Anwender des Entscheidungshilfesystems muss jedoch – unter Berücksichtigung der spezifischen Baustellenrandbedingungen - eine Gewichtung der Beurteilungskriterien hinsichtlich ihrer Bedeutung für ein konkretes Tunnelbauprojekt vornehmen. Dabei reichen die Beurteilungsmöglichkeiten eines Kriteriums von „Sehr wichtig“ bis „Unbedeutend“. Die vom Entscheidungshilfesystem vorgegebenen Punktebewertungen eines Beurteilungskriteriums werden nach der subjektiven Bewertung durch den Anwender mit „Sehr wichtig“ bis „Unbedeutend“ des Anwenders mit den nachfolgenden Faktoren multipliziert:

- „Sehr Wichtig“: Faktor 6,0
- „Wichtig“: Faktor 4,0
- „Geringe Bedeutung“: Faktor 2,0
- „Unbedeutend“: Faktor 0,0

Durch diese Art der subjektiven Beurteilung und der damit verbundenen Erhöhung oder Verminderung der Punktzahl kann die Gewichtung der Beurteilungskriterien innerhalb eines Beurteilungsaspektes verschoben und an spezifische Baustellenrandbedingungen angepasst werden. Wird vom Anwender ein bestimmtes Beurteilungskriterium (z.B. die baubetriebliche Flexibilität des Verfahrens) als „unbedeutend“ eingestuft, dann wird es in der weiteren Berechnung der Nutzwerte nicht mehr berücksichtigt.

In der Tabelle 28 errechnet sich beispielsweise durch die Bewertung des Beurteilungskriteriums „Rückprall“ als „Sehr Wichtig“, die endgültige Punktzahl für das Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut mit 18 (= 3 * 6,0).

Kriterium	Gewichtung	Spritzbetonverfahren - Punktebewertung		
		TM	FMS	NSDI
Rückprall		3 Punkte	9 Punkte	24 Punkte
	„Sehr Wichtig“	18 Punkte	54 Punkte	144 Punkte

Tabelle 28: Zeilenweiser Auszug aus der baubetrieblichen Zielwertmatrix für den Rückprall

Würde das Kriterium „Rückprall“ vom Anwender allerdings mit „Unbedeutend“ beurteilt werden, würden sich die Punktebewertungen der einzelnen Verfahren zu „0“ ergeben.

Die Summe der Punktezahlen der einzelnen Beurteilungskriterien innerhalb eines Beurteilungsaspektes ergibt schlussendlich eine Punktebewertung für jedes Spritzbetonsystem (z.B. eine Gesamtpunktzahl für das Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut mit 120 Punkten – s. Tabelle 29), wobei jenes System mit der höchsten Punktezahl am besten geeignet erscheint.

Mit Hilfe dieser Vorgangsweise können die einzelnen Spritzbetonsysteme für einen bestimmten Beurteilungsaspekt nach Rängen geordnet werden, d.h. für den Beurteilungsaspekt „Baubetrieb“ könnte sich folgende Rangordnung für drei unterschiedliche Spritzbetonsysteme ergeben (s. Tabelle 29):

Beurteilungsaspekt	Spritzbetonverfahren		
	TM	FMS	NSDI
Baubetrieb - Punktezahl	120 Punkte	110 Punkte	144 Punkte
Baubetrieb - Rangordnung	2	3	1

Tabelle 29: Punktezahl und Rangordnung für ein Beurteilungskriterium

Nachdem die einzelnen Beurteilungsaspekte aber über eine unterschiedliche Anzahl an Beurteilungskriterien verfügen (z.B. beinhaltet der Beurteilungsaspekt „Baubetrieb“ insgesamt 24 Beurteilungskriterien, während der Beurteilungsaspekt „Arbeitssicherheit“ nur 8 Beurteilungskriterien umfasst), würde sich bei der Bestimmung der Nutzwerte über die Summe der Punktezahlen je Beurteilungsaspekt eine verzerrte Reihung der Spritzbetonsysteme ergeben.

Damit könnte z.B. der Beurteilungsaspekt „Arbeitssicherheit“ – aufgrund seiner geringen Anzahl an Beurteilungskriterien - die Entscheidungsfindung für ein Spritzbetonsystem überhaupt nicht mehr beeinflussen und die vorab definierte Gewichtung der Beurteilungsaspekte im Zielprogramm (s. Tabelle 26) wäre bedeutungslos.

Daher wird, auf der Grundlage einer kardinalen Präferenzordnung der Beurteilungskriterien für die einzelnen Beurteilungsaspekte, nun in einem nächsten Schritt für jedes Spritzbetonsystem die **Reihung der Beurteilungsaspekte nach der Rangsummenregel** vorgenommen. Die zugeordneten Rangplätze der einzelnen Beurteilungsaspekte ergeben sich aus den Punktebewertung, d.h. dem Spritzbetonsystem mit der höchsten Punktezahl wird der erste Rang, dem System mit der niedrigsten Punktezahl der letzte Rang zugewiesen. Damit ergibt sich beispielsweise für ein fiktives Tunnelbauprojekt folgende Rangordnung dreier ausgewählter Spritzbetonsysteme (s. Tabelle 30):

Beurteilungsaspekt		Rangordnung Spritzbetonverfahren		
		TM	FMS	NSDI
Baubetrieb	Punkte	240	120	180
	Rang	1	3	2
Baustelleneinrichtung	Punkte	125	105	90
	Rang	1	2	3
Betontechnologie	Punkte	60	50	55
	Rang	1	3	2
Sicherheit- und Gesundheitsschutz	Punkte	10	15	30
	Rang	3	2	1
Wirtschaftlichkeit	Punkte	200	50	100
	Rang	2	3	1

Tabelle 30: Rangordnung der einzelnen Beurteilungsaspekte

Unter der Berücksichtigung des vorab definierten Zielprogramms (s. Tabelle 26) und der – aus der Punkteermittlung für jeden Beurteilungsaspekt - festgelegten Reihung von drei ausgewählten Spritzbetonsystemen ergibt sich nach Anwendung der Rangsummenregel folgender Nutzwert für die gewählten Spritzbetonsysteme (s. Tabelle 31).

Beurteilungsaspekt	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

Tabelle 31: Ordinale Zielwertmatrix der Beurteilungsaspekte - Nutzwertbestimmung

Die Rangsumme bzw. der Nutzwert ermittelt sich – unter Berücksichtigung der Gewichtung der entsprechenden Beurteilungsaspekte - für das Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut zu einem Wert von 170 ($=15 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 5 \cdot 3 + 60 \cdot 2$). Nach den Gesetzmäßigkeiten der Rangsummenregel stellt die **niedrigste Rangsumme jenes Verfahren mit dem höchsten Nutzwert dar**. Damit wäre in diesem Fall das Nassspritzverfahren im Dichtstrom den anderen beiden Verfahren vorzuziehen.

VI.2 Nutzwertermittlung

Die Nutzwertermittlung der einzelnen Spritzbetonsysteme erfolgt mit dem **Tabellenkalkulationsprogramm „Zielwertmatrizen“**, welches der gegenständlichen Arbeit im Anhang auf CD-Rom beiliegt. Damit soll unter Berücksichtigung der Musterkalkulation (s. Punkt V) und den übrigen Beurteilungsaspekten für ein konkretes Tunnelbauprojekt ein optimal geeignetes Spritzbetonverfahren im Tunnel- und Stollenbau ermittelt werden.

Die grundsätzliche Struktur des Tabellenkalkulationsprogramms und die prinzipielle Vorgangsweise bei der Nutzwertermittlung sind im Kapitel „Nutzwertanalyse“ (s. VI.1) beschrieben, die detaillierte Beschreibung der einzelnen Tabellenblätter erfolgt in den nachfolgenden Punkten VI.2.1 bis VI.2.7.

VI.2.1 Tabellenblatt „Zielprogramm“

Vom Anwender sind zunächst im Tabellenblatt „Zielprogramm“ die einzelnen Beurteilungsaspekte hinsichtlich ihrer Bedeutung für ein konkretes Tunnelbauprojekt zu gewichten.

Stufe	Nr.	Zielprogramm Beurteilungsaspekte	Gewichtung
1	1.	Baubetrieb	15
1	2.	Baustelleneinrichtung	10
1	3.	Betontechnologie	10
1	4.	Sicherheit- und Gesundheitsschutz	5
1	5.	Wirtschaftlichkeit	60
			100

Tabelle 32: Zielprogramm der Nutzwertanalyse

Dabei ist zu beachten, dass die Summe der Gewichtungen der einzelnen Beurteilungsaspekte immer den Wert 100 ergeben muss. Nachdem die Wirtschaftlichkeit eines Spritzbetonsystems einen sehr wesentlichen Beurteilungsaspekt bei der Auswahl eines Spritzbetonsystems darstellt, sollte dieser Faktor - aus der Sicht des Autors der gegenständlichen Arbeit - höher als die übrigen Beurteilungsaspekte gewichtet werden.

VI.2.2 Tabellenblatt „Baubetrieb“

Im Tabellenblatt „Baubetrieb“ sind vom Anwender zunächst die baubetrieblichen Beurteilungskriterien hinsichtlich des zeitkritischen Kalottenvortriebs zu gewichten.

Dabei sind die folgenden Fragestellungen hinsichtlich des Baubetriebs eines Tunnel- bzw. Stollenbauvorhabens vom Anwender durchzudenken und entsprechend zu gewichten:

- Erfolgt der Vortrieb in wechselhaftem, nachbrüchigem oder standfestem Gebirge?

- Ist ein Vortrieb mit Teilquerschnitten erforderlich oder kann der Tunnel im Vollquerschnitt aufgeföhren werden?
- Erfolgt der Tunnelvortrieb von einem oder mehreren Angriffspunkten aus?
- Ist ein Inselbetrieb oder ein Ulmenstollenvortrieb auf Grund baubetrieblicher oder geotechnischer Randbedingungen erforderlich?
- In welcher Größenordnung bewegen sich die Bergwasserzutritte?
- Wie groß ist der aufgeföhrene Tunnelquerschnitt?
- Ergeben sich aus den baubetrieblichen Randbedingungen hohe Anforderungen an die Fahrbahn im Tunnel (z.B. aufgrund hoher erforderliche Fahrgeschwindigkeiten im Tunnel)?
- Ist eine hohe Flexibilität des Spritzbetonsystems im Vortrieb erforderlich?
- Soll die Förderleitungslänge von der Spritzmaschine zur Spritzdüse möglichst gering sein und ist eine hohe Förderleistung des Spritzbetonsystems notwendig?
- Soll eine aufwändige Nachbearbeitung der Spritzbetonoberfläche möglichst vermieden werden?
- Soll ein möglichst geringer Personalbedarf beim Spritzbetonauftrag erzielt werden?
- Soll ein möglichst geringer Reinigungsaufwand der Spritzbetongeräte erreicht werden?
- Stellt sich die Problematik von Restmengen an Spritzbeton beim analysierten Spritzbetonsystem durch eine Vielzahl von geotechnisch oder baubetrieblich erforderlichen Unterbrechungen beim Spritzbetonauftrag?
- Besteht aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Arbeitssicherheit die Forderung nach einem geringen Rückprallfaktor?
- Ist eine geringe Störungsanfälligkeit des Spritzbetonsystems notwendig?
- Ist aus baubetrieblicher Sicht eine hohe Verfügbarkeit eines Spritzbetonsystems erforderlich?
- Soll der Verschleiß eines Spritzbetonsystems möglichst gering sein?
- Muss eine gute Wintertauglichkeit des Spritzbetonsystems aufgrund der Randbedingungen des Tunnel- bzw. Stollenbauvorhabens gewährleistet sein?

Das entsprechende Tabellenblatt „Baubetrieb“ ist in der Tabelle 33 dargestellt. Die Spritzbetonsysteme werden entsprechend der Gewichtung durch den Anwender durchgerechnet und schlussendlich ergibt sich für jedes der analysierten Spritzbetonsysteme eine Gesamtpunktzahl für den Beurteilungsaspekt „Baubetrieb“. Dem Verfahren mit der höchsten Punktzahl wird dabei der erste Rang zugewiesen, denn es erscheint unter Berücksichtigung der Randbedingungen aus baubetrieblicher Sicht am besten geeignet. Das Verfahren mit der niedrigsten Punktzahl sollte aus baubetrieblicher Sicht nicht zur Anwendung kommen.

Nr.	Beurteilungskriterien Baubetrieb	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1	Vortrieb in wechsellastigem Gebirge		24	24	24	21	21	12	15	15	15	18	18
		4,0	96	96	96	84	84	48	60	60	60	72	72
2	Vortrieb in standfestem Gebirge		15	15	15	18	18	24	24	24	21	21	21
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Vortrieb in nachbrüchigem Gebirge		24	24	24	21	21	12	15	15	15	18	18
		2,0	48	48	48	42	42	24	30	30	30	36	36
4	Vortrieb mit Teilquerschnitten		21	21	21	24	24	12	15	15	15	18	18
		4,0	84	84	84	96	96	48	60	60	60	72	72
5	Vortrieb mit mehreren Angriffspunkten		18	18	18	24	24	12	15	15	12	15	15
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Einsatz im Inselebetrieb		0	0	0	24	24	0	0	0	0	0	0
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Einsatz im Ulmenstollenvortrieb		24	24	24	0	0	9	12	12	9	12	12
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Vortrieb bei Bergwasserzutritten < 15 l/s		18	18	18	24	24	21	21	21	21	21	21
		4,0	72	72	72	96	96	84	84	84	84	84	84
9	Vortrieb bei Bergwasserzutritten > 15 l/s		24	21	21	24	24	9	15	15	9	15	15
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Einsatz bei Tunnelquerschnitten < 30 m²		24	24	24	21	21	12	12	12	15	15	15
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Einsatz bei Tunnelquerschnitten > 30 m²		15	15	15	18	18	24	24	24	21	21	21
		4,0	60	60	60	72	72	96	96	96	84	84	84
12	Guter Fahrbehrzustand im Tunnel		12	12	12	24	24	6	9	9	6	9	9
		4,0	48	48	48	96	96	24	36	36	24	36	36
13	Hohe Flexibilität im Vortrieb		21	21	21	24	24	9	12	12	12	15	15
		2,0	42	42	42	48	48	18	24	24	24	30	30
14	Geringe Förderleistungslänge SpB-Maschine zu Düse		24	24	24	18	18	21	21	21	21	21	21
		2,0	48	48	48	36	36	42	42	42	42	42	42
15	Hohe erforderliche Förderleistung		9	9	9	12	12	24	24	24	21	21	21
		6,0	54	54	54	72	72	144	144	144	126	126	126
16	Nachbearbeitung der SpB-Oberfläche		21	21	21	24	24	15	15	15	18	18	18
		4,0	84	84	84	96	96	60	60	60	72	72	72
17	Geringer Personalbedarf beim Spritzbetonauftrag		18	18	18	18	18	21	21	21	21	21	21
		4,0	72	72	72	72	72	84	84	84	84	84	84
18	Geringer Reinigungsaufwand der Spritzgeräte		24	24	24	21	21	18	15	15	15	12	12
		2,0	48	48	48	42	42	36	30	30	30	24	24
19	Keine Restmengenproblematik		24	24	24	21	21	12	12	12	12	12	12
		2,0	48	48	48	42	42	24	24	24	24	24	24
20	Geringe Rückprallwerte		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		6,0	18	18	18	54	54	144	144	144	126	126	126
21	Geringe Störungsanfälligkeit des Spritzsystems		24	24	24	24	24	18	21	21	18	21	21
		6,0	144	144	144	144	144	108	126	126	108	126	126
22	Hohe Verfügbarkeit von SpB im Vortrieb		24	24	24	24	24	18	21	21	18	21	21
		6,0	144	144	144	144	144	108	126	126	108	126	126
23	Verschleiß		21	21	21	15	15	18	18	18	18	18	18
		2,0	42	42	42	30	30	36	36	36	36	36	36
24	Gute Wintertauglichkeit		24	24	24	21	21	15	18	18	15	18	18
		2,0	48	48	48	42	42	30	36	36	30	36	36
Gesamtpunkteanzahl Baubetrieb*			1.200	1.200	1.200	1.308	1.308	1.156	1.242	1.242	1.152	1.236	1.236
Rangordnung			7	7	7	1	1	10	3	3	11	5	5

Tabelle 33: Zielwertmatrix Baubetrieb

VI.2.3 Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“

Die Beurteilungskriterien für die Baustelleneinrichtung sind vom Anwender im Tabellenblatt für die „Baustelleneinrichtung“ zu gewichten.

Dabei sind folgende Fragestellungen zu überlegen:

- Wo liegt die Baustelleneinrichtungsfläche für das konkrete Tunnelbauprojekt? Beträgt die Entfernung zum nächstgelegenen Transportbetonmischwerk mehr als 11 Kilometer?
- Bestehen nur geringe Anforderungen an die Lagerung der Spritzbetonausgangsstoffe bzw. an die Mischgutlagerung?
- Wie lange kann das Mischgut auf der Baustelle gelagert werden?
- Soll der erforderliche Energiebedarf für die Bewetterung des Tunnels möglichst gering sein?
- Ist ein geringer Druckluftbedarf für die Spritzbetongeräte im Vortrieb notwendig?
- Sind zahlreiche Mischguttransporte bzw. Materialumschläge auf der Baustelle erforderlich und sollen die damit verbundenen Probleme daher möglichst gering sein?
- Ist lediglich ein geringer Platzbedarf für die Baustelleneinrichtung vorgesehen?
- Ergibt sich aus den baubetrieblichen und geotechnischen Randbedingungen nur ein geringer Platzbedarf für die Spritzbetonausrüstung im Tunnel?

Analog zur vorab beschriebenen Vorgangsweise bei der Analyse des Beurteilungsaspekts „Baubetrieb“ (s. auch VI.2.2) werden auch für die Baustelleneinrichtung die einzelnen Spritzbetonsysteme durchgerechnet und Gesamtpunktezahlen ermittelt. Jenem Verfahren mit der höchsten Punktezahl wird dabei der erste Rang hinsichtlich des Beurteilungsaspekts „Baustelleneinrichtung“ zugewiesen.

Das Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“ ist in der Tabelle 34 dargestellt. Beispielhaft erreicht in dieser Tabelle – aufgrund der vom Anwender gewählten Gewichtungen jedes Beurteilungskriteriums - das Nassspritzverfahren im Dünnstrom (mit Fremdversorgung) 810 Punkte und wird damit auf den ersten Rang gesetzt, während das Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut lediglich das Punkteminimum von 636 Punkten erreicht und damit auf dem letzten und 11. Rang platziert wird.

Nr.	Beurteilungskriterien Baustelleneinrichtung	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
24	Projektstandort (Entfernung > 11 km vom Mischwerk)		21	24	24	24	24	18	24	24	18	24	24
		6,0	126	144	144	144	144	108	144	144	108	144	144
25	Geringe Anforderungen SpB-Ausgangsstofflagerung		24	15	15	21	21	24	15	18	24	15	18
		4,0	96	60	60	84	84	96	60	72	96	60	72
26	Geringe Anforderungen Mischgutlagerung		15	15	15	24	24	24	21	21	24	21	21
		2,0	30	30	30	48	48	48	42	42	48	42	42
27	Hohe Mischgutlagerungsdauer		24	24	24	21	21	9	15	15	9	15	15
		4,0	96	96	96	84	84	36	60	60	36	60	60
28	Geringe Anforderungen an die Bewetterung		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		2,0	6	6	6	18	18	48	48	48	42	42	42
29	Geringer Druckluftbedarf für SpB-Geräte		9	9	9	12	12	21	21	21	24	24	24
		6,0	54	54	54	72	72	126	126	126	144	144	144
30	Geringer Energiebedarf der SpB-Geräte		9	9	9	12	12	15	15	15	18	18	18
		6,0	54	54	54	72	72	90	90	90	108	108	108
31	Geringe Probleme bei Mischguttransport (-umschlag)		9	9	9	21	21	18	15	15	18	15	15
		4,0	36	36	36	84	84	72	60	60	72	60	60
32	Geringer Platzbedarf für Baustelleneinrichtung		21	15	18	24	21	24	15	12	24	15	12
		4,0	84	60	72	96	84	96	60	48	96	60	48
33	Geringer Platzbedarf im Tunnel		24	24	24	18	18	12	12	12	15	15	15
		4,0	96	96	96	72	72	48	48	48	60	60	60
Gesamtpunkteanzahl Baustelleneinrichtung			678	636	648	774	762	768	738	738	810	780	780
Rangordnung			9	11	10	4	6	5	7	7	1	2	2

Tabelle 34: Zielwertmatrix „Baustelleneinrichtung“

VI.2.4 Tabellenblatt „Betontechnologie“

Das Tabellenblatt „Betontechnologie“ ist in der Tabelle 35 dargestellt. Folgende Fragestellungen sind in der „Checkliste“ für die Betontechnologie abzuarbeiten:

- Sind besonders hohe Anforderungen an die Endfestigkeit des Spritzbetons gestellt?
- Ergeben sich aus den Randbedingungen des Vortriebes (z.B. hohe Bergwasserzutritte, nachbrüchiges Gebirge) hohe Anforderungen an die Frühfestigkeit?
- Ist eine flexible Anpassung der Mischgutzusammensetzung an die Vortriebsbedingungen erforderlich?
- Bestehen geringe Anforderungen an die Verarbeitungstemperatur des Mischgutes und resultieren aus den Vortriebsbedingungen zeitliche Beschränkungen bei der Verarbeitung des Mischgutes?
- Soll der Wasser-Bindemittel-Wert des Mischgutes vor Ort nicht verändert werden können?
- Soll die Zugabe von Zusatzmitteln (z.B. Erstarrungsbeschleuniger, Verzögerer) möglichst gering sein?
- Soll die Zugabe von Zusatzstoffen (z.B. Flugasche) möglichst gering sein?

Aus der Gesamtpunktzahl ergibt sich für den Beurteilungsaspekt „Betontechnologie“ ebenfalls eine entsprechende Rangordnung der Spritzbetonsysteme.

VI.2.5 Tabellenblatt „Arbeitssicherheit und Datenerfassung“

Für den Beurteilungsaspekt „Arbeitssicherheit“ und „Datenerfassung“ sind vom Anwender die folgenden Beurteilungskriterien zu analysieren und gewichten:

- Sollen die Belastungen (z.B. durch Staub, Lärm, Rückprall) für den Düsenführer minimal sein?
- Muss sich der Düsenführer beim Spritzbetonauftrag unmittelbar im Bereich der Spritzdüse aufhalten?
- Sollen hohe Frühfestigkeiten zur Vermeidung von Verbrüchen und hohem Rückfall erzielt werden?
- Werden generell Manipulatoren zur Erhöhung der Arbeitssicherheit eingesetzt?
- Ist eine gute Datenerfassung hinsichtlich Mischgutverbrauch und Förderleistung beim Spritzbetonauftrag erforderlich und soll eine nachträgliche Nutzung dieser Daten möglich sein?

Für den Beurteilungsaspekt „Arbeitssicherheit“ wird – analog zu den vorhergehenden Beurteilungsaspekten - ebenfalls eine Gesamtpunktzahl ermittelt und eine Rangordnung der Spritzbetonsysteme getroffen (s. Tabelle 36).

Nr.	Beurteilungskriterien Betontechnologie	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
34	Höchste Anforderungen an die Endfestigkeit		18	18	18	21	21	24	24	24	24	24	24
		4,0	72	72	72	84	84	96	96	96	96	96	96
35	Hohe erforderliche Frühfestigkeit		24	24	24	21	21	15	15	15	15	15	15
		4,0	96	96	96	84	84	60	60	60	60	60	60
36	Anpassung Mischgutrezeptur an Vortriebsbedingungen		3	3	3	24	24	15	18	18	15	18	18
		4,0	12	12	12	96	96	60	72	72	60	72	72
37	Geringe Anforderungen an Verarbeitungstemperatur		24	24	24	21	21	18	18	18	18	18	18
		2,0	48	48	48	42	42	36	36	36	36	36	36
38	Zeitliche Beschränkungen bei Mischgutverarbeitung		24	24	24	21	21	6	9	9	6	9	9
		2,0	48	48	48	42	42	12	18	18	12	18	18
39	Keine Beeinflussbarkeit des W/B Wertes vor Ort		6	6	6	9	9	24	24	24	24	24	24
		2,0	12	12	12	18	18	48	48	48	48	48	48
40	Geringe Zugabe von Zusatzmitteln		24	24	24	24	24	18	18	18	18	18	18
		2,0	48	48	48	48	48	36	36	36	36	36	36
41	Geringe Zugabe von Zusatzstoffen		24	24	24	24	24	18	18	18	18	18	18
		2,0	48	48	48	48	48	36	36	36	36	36	36
Gesamtpunkteanzahl Baustelleneinrichtung			384	384	384	462	462	384	402	402	384	402	402
Rangordnung			7	7	7	1	1	7	3	3	7	3	3

Tabelle 35: Zielwertmatrix „Betontechnologie“

Nr.	Beurteilungskriterien Arbeitssicherheit	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
42	Gute Arbeitsplatzbedingungen im Tunnel		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		6,0	18	18	18	54	54	144	144	144	126	126	126
43	Düsenführer direkt an der Düse		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		6,0	18	18	18	54	54	144	144	144	126	126	126
44	Geringe Elution des Spritzbetons		24	21	21	21	21	24	21	21	24	21	21
		2,0	48	42	42	42	42	48	42	42	48	42	42
45	Hohe Frühfestigkeiten zur Erhöhung Arbeitssicherheit		15	15	15	18	18	24	24	24	24	21	21
		4,0	60	60	60	72	72	96	96	96	96	84	84
46	Gute Datenerfassung beim Spritzbetonauftrag		18	18	18	15	15	24	24	24	24	24	24
		4,0	72	72	72	60	60	96	96	96	96	96	96
47	Genereller Einsatz von Manipulatoren erforderlich		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		6,0	18	18	18	54	54	144	144	144	126	126	126
48	Geringe Staubbelastung an der Spritzmaschine		18	18	18	12	12	24	24	24	21	21	21
		6,0	108	108	108	72	72	144	144	144	126	126	126
Gesamtpunkteanzahl Baustelleneinrichtung			234	228	228	336	336	672	666	666	618	600	600
Rangordnung			9	10	10	7	7	1	2	2	4	5	5

Tabelle 36: Zielwertmatrix „Arbeitssicherheit und Datenerfassung“

VI.2.6 Tabellenblatt „Wirtschaftlichkeit“

Die Rangordnung der Spritzbetonsysteme nach dem Beurteilungsaspekt „Wirtschaftlichkeit“ ergibt sich aus den Spritzbetongesamtkosten in Euro (s. Punkt V „Musterkalkulation“). Jenem Spritzbetonsystem mit den niedrigsten Gesamtkosten wird dabei der erste Rang zugewiesen, das Verfahren mit den höchsten Gesamtkosten erscheint hinsichtlich dieses Beurteilungsaspekts als ungeeignet und sollte bei einer analysierten Tunnel- bzw. Stollenbaustelle daher aus wirtschaftlichen Gründen nicht zum Einsatz kommen.

Der Aufbau und die prinzipielle Vorgangsweise bei der Kostenermittlung mittels der beigefügten Musterkalkulation ist im Punkt V bereits ausführlich beschrieben und wird daher in diesem Kapitel nicht näher beleuchtet.

VI.2.7 Tabellenblatt „Nutzwertermittlung“

Aufgrund des vorab definierten Zielprogramms (s. Tabelle 32) und den ermittelten Rangordnungen für sämtliche Beurteilungsaspekte erfolgt in einem abschließenden Rechengang die Ermittlung eines ganzheitlichen Nutzwertes für die Spritzbetonsysteme. Diese Nutzwertermittlung erfolgt mit Hilfe der Rangsummenregel entsprechend der Gewichtung der Beurteilungsaspekte im Zielprogramm (s. Tabelle 31). **Das Verfahren mit der niedrigsten Rangsumme verfügt dabei über den höchsten Nutzwert und stellt somit das optimal geeignete Spritzbetonsystem für das konkrete Tunnel- bzw. Stollenbauvorhaben dar.**

In der Tabelle 37 ist die abschließende Ermittlung der Nutzwerte für sämtliche Spritzbetonsysteme übersichtlich dargestellt. Für jeden Beurteilungsaspekt werden die erreichten Punktezahlen nochmals aufgelistet und die entsprechenden Rangordnungen angeführt. Die Gewichtung der Beurteilungsaspekte wird automatisch aus dem Tabellenblatt „Zielprogramm“ übernommen.

Nach der Rangsummenregel ergibt sich der höchste Nutzwert eines Spritzbetonsystems mit der niedrigsten Rangsumme. Beispielhaft ergibt sich in der Tabelle 37 für ein fiktives Tunnelbauprojekt die niedrigste Rangsumme beim System NSDI-E(+) mit 235 ($=15 \cdot 3 + 10 \cdot 7 + 10 \cdot 5 + 5 \cdot 2 + 60 \cdot 1$). Dieses Verfahren erscheint – auf Grund der kalkulativen Eingangsparameter und der gewählten Gewichtungen der einzelnen Beurteilungskriterien innerhalb der einzelnen Beurteilungsaspektes – am besten geeignet und sollte bei diesem beispielhaften Tunnelprojekt daher zum Einsatz kommen.

Ermittlung des Nutzwertes		Gewichtung s. Zielprogramm	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1.	Baubetrieb	15											
	Punktezahl		1.200	1.200	1.200	1.308	1.308	1.158	1.242	1.242	1.152	1.236	1.236
	Rangordnung		7	7	7	1	1	10	3	3	11	5	5
2.	Baustelleneinrichtung	10											
	Punktezahl		678	636	648	774	762	768	738	738	810	780	780
	Rangordnung		9	11	10	4	6	5	7	7	1	2	2
3.	Betontechnologie	10											
	Punktezahl		432	396	390	480	480	432	438	432	432	438	432
	Rangordnung		5	10	11	1	1	5	3	5	5	3	5
4.	Arbeitssicherheit - Gesundheitsschutz	5											
	Punktezahl		246	228	228	336	336	672	654	654	618	600	600
	Rangordnung		9	10	10	7	7	1	2	2	4	5	5
5.	Wirtschaftlichkeit	60											
	Punktezahl		5.438.454	5.801.373	4.560.714	5.478.374	4.489.957	4.485.933	4.881.321	3.952.630	4.542.584	4.913.210	3.995.113
	Rangordnung		9	11	6	10	4	3	7	1	5	8	2
6.	Nutzwert		830	1025	725	700	360	435	575	235	545	630	290
	Rangordnung		10	11	9	8	3	4	6	1	5	7	2

Tabelle 37: Nutzwertermittlung

Die Ergebnisse der Nutzwertermittlung ergeben – aufgrund der Eingaben durch den Anwender - eine fixe Rangordnung der Spritzbetonsysteme. Diese Rangordnung sollte vom Anwender allerdings nicht als allgemeingültiges Endergebnis unkritisch übernommen werden, sondern in einem weiteren Arbeitsschritt sollten die drei besten Verfahren nochmals – durchaus kritisch – auf ihre tatsächliche Anwendbarkeit hin überprüft werden. Dabei sollten die Vor- und Nachteile der ausgewählten Verfahren mit entsprechendem „Expertenwissen“ gegeneinander abgewogen und erst dann eine endgültige Verfahrenswahl getroffen werden.

VII Systemanwendung

VII.1 Allgemeines

Eine „Eichung“ des Auswahlverfahrens für Spritzbetonsysteme im Tunnel- und Stollenbau an bereits ausgeführten oder in Ausführung befindlichen Projekten erscheint aus der Sicht des Autors aus zwei Gründen nicht sinnvoll:

- Erstens stellt das in der gegenständlichen Arbeit vorgeschlagene Entscheidungshilfesystem bei der Auswahl eines geeigneten Spritzbetonverfahrens im Tunnel- und Stollenbau lediglich – wie bereits der Name sagt - eine Entscheidungshilfe dar. Die strukturierte Abarbeitung von Fragestellungen hinsichtlich der Beurteilungsaspekte Baubetrieb, Baustelleneinrichtung, Betontechnologie, Arbeitssicherheit und Wirtschaftlichkeit kann den Anwender nur bei der strukturierten Auswahl eines Verfahrens unterstützen. Die endgültige Entscheidung über die Auswahl des Verfahrens und die Verantwortung für eine Systemauswahl liegt jedoch weiterhin beim Nutzer.

Es kann daher aus rein strategischer und firmenpolitischer Hinsicht ein Spritzbetonsystem auf einer Baustelle zur Anwendung kommen, dass vom gegenständlichen Auswahlverfahren nicht als gut geeignet vorgeschlagen würde. Das bedeutet aber weder, dass das Auswahlverfahren praktisch nicht anwendbar wäre, noch dass vom Bauunternehmen für die Baustelle ein falsches Spritzbetonsystem ausgewählt worden wäre. Eine Eichung des Auswahlverfahrens an praktischen Beispielen könnte daher zu einer „firmenpolitischen“ Verzerrung des Auswahlverfahrens führen.

- Zweitens hängt die vom Auswahlverfahren vorgeschlagene Entscheidung über ein geeignetes Spritzbetonsystem wesentlich von der Gewichtung der Beurteilungsaspekte im Zielprogramm ab. Eine deutlich höhere Gewichtung des Beurteilungsaspektes Wirtschaftlichkeit kann für einen Auftragnehmer (z.B. Bauunternehmen) durchaus Sinn machen, während für einen Auftraggeber (z.B. ÖBB, HL-AG) der Schwerpunkt auf den Beurteilungsaspekten Baubetrieb und Baustelleneinrichtung liegen könnte.

Beide Schwerpunktsetzungen sind – aus der Sicht des jeweiligen Nutzers – plausibel. Sie führen im Auswahlverfahren zwar zu unterschiedlichen Ergebnissen, ohne aber eine wirklich abgesicherte Aussage über die Praxistauglichkeit des vorgeschlagenen Entscheidungshilfesystems machen zu können.

Auf Grund dieser o.a. Überlegungen über die Anwendbarkeit bzw. Prüfung (Eichung) des Entscheidungshilfesystems an praktischen Tunnel- und Stollenbaustellen, werden in der gegenständlichen Arbeit stattdessen Parameterstudien durchgeführt. Damit sollen unterschiedliche geologische und baubetriebliche Szenarien theoretisch durchgespielt werden, um die Sensibilität des Auswahlverfahrens auf Änderungen verschiedenster Eingangsparameter (z.B. der Gebirgsparameter, der geometrischen Randbedingungen und der Zielprogramme) analysieren zu können.

Mit dieser Vorgangsweise werden – basierend auf einer für einen beispielhaften Tunnel durchschnittlichen Vortriebsklasse - insgesamt 48 unterschiedliche Fälle durchgespielt und anschließend „Regelanwendungsbereiche“ für die einzelnen Spritzbetonsysteme festgelegt. Die Parameterstudie wird für Tunnellängen von 500 m, 1.000 m, 2.000 m, 3.000 m, 4.000 m und 5.000 m durchgeführt, dabei werden folgende Szenarien durchgespielt:

- „Großer“ Tunnelquerschnitt (Regelquerschnitt A = 75 m², Kalottenquerschnitt A = 56 m², Abwicklungslänge in der Kalotte 18,80 m) und standfestes Gebirge.
- „Großer“ Tunnelquerschnitt (Regelquerschnitt A = 75 m², Kalottenquerschnitt A = 56 m², Abwicklungslänge in der Kalotte 18,80 m) und nachbrüchiges Gebirge.
- „Kleiner“ Tunnelquerschnitt (Regelquerschnitt A = 25 m², Kalottenquerschnitt A = 19 m², Abwicklungslänge in der Kalotte 11,00 m) und standfestes Gebirge.
- „Kleiner“ Tunnelquerschnitt (Regelquerschnitt A = 25 m², Kalottenquerschnitt A = 19 m², Abwicklungslänge in der Kalotte 11,00 m) und nachbrüchiges Gebirge.

Zusätzlich zu den bereits o.a. Parametern werden der Entscheidung über die Auswahl eines geeigneten Spritzbetonsystems zusätzlich noch zwei unterschiedliche Zielprogramme zu Grunde gelegt (s. Tabelle 38).

Beurteilungsaspekt	Gewichtung Zielprogramm 1	Gewichtung Zielprogramm 2
Baubetrieb	15	30
Baustelleneinrichtung	10	15
Betontechnologie	10	15
Arbeitssicherheit	5	10
Wirtschaftlichkeit	60	30
Gesamt	100	100

Tabelle 38: Zielprogramme der Parameterstudie

Die Eingangsparameter in die Berechnung (Geometrie, Geologie und Kosten) und die Berechnungsergebnisse sind im Anhang detailliert dargestellt.

VII.2 Auswertung

Die Auswertung der unterschiedlichen Berechnungsszenarien führt in Abhängigkeit der geometrischen und geotechnischen Randbedingungen und den zugrunde gelegten Kalkulationsansätzen, sowie den Gewichtungen der Beurteilungsaspekte und -kriterien zu einer (relativen) Rangordnung der insgesamt 11 Spritzbetonsysteme. Dem am besten geeigneten System wird dabei der erste Rang, dem am schlechtest geeigneten System der letzte Rang zugewiesen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden für jedes durchgerechnete Szenario jeweils nur die ersten drei bestplatzierten Spritzbetonsysteme grafisch dargestellt.

Die ermittelte Rangordnung der Spritzbetonsysteme hängt – nachdem die Wirtschaftlichkeit in den beiden gewählten Zielprogrammen mit 30 % bzw. 60 % als sehr wesentlicher Beurteilungsaspekt bewertet wird – stark von den vorab gewählten Kostenansätzen für Mischgut, Baustelleneinrichtung, Vortriebsgerät und Personal und den Gewichtungen der einzelnen Beurteilungsaspekte und Beurteilungskriterien ab.

Die in der gegenständlichen Arbeit angeführten Rangordnungen sind daher nicht allgemeingültig, sondern beruhen ausschließlich auf den – in der gegenständlichen Arbeit - gewählten Eingangsparametern (s. Anhang) für jedes Berechnungsszenario.

Änderungen dieser Eingangsparameter (z.B. Kostenansätze, Gewichtungen der Beurteilungskriterien innerhalb eines Beurteilungsaspektes, Veränderungen des Zielprogramms) führen somit zwangsläufig zu Verschiebungen innerhalb der Rangordnung der Spritzbetonsysteme.

Die Kostenansätze können vom Anwender - entsprechend den baustellenspezifischen Randbedingungen – mit der Tabellenkalkulation „Musterkalkulation“ (s. V.2) selbständig vorgenommen werden. Die für eine ganzheitliche Beurteilung der Spritzbetonverfahren erforderlichen Gewichtungsfaktoren der einzelnen Beurteilungsaspekte im Zielprogramm bzw. die Gewichtung der entsprechend zugehörigen Beurteilungskriterien sind im Tabellenkalkulationsprogramm „Zielwertmatrizen“ (s. VI.2) ebenfalls abänderbar.

VII.2.1 „Großer“ Tunnelquerschnitt und standfestes Gebirge

Für einen gewählten Kalottenregelquerschnitt von $A_{RQ} = 56,50 \text{ m}^2$, einer zugehörigen Länge der Abwicklungslinie A_{AL} von 19,20 m Länge und den übrigen Eingangsparametern in die Berechnung (s. Anhang) ergibt sich – je nach Gewichtung des Beurteilungsfaktors „Wirtschaftlichkeit“ mit 30 % oder mit 60 % - die nachfolgende Rangordnung der analysierten Spritzbetonsysteme (s. Abbildung 71 und Abbildung 72).

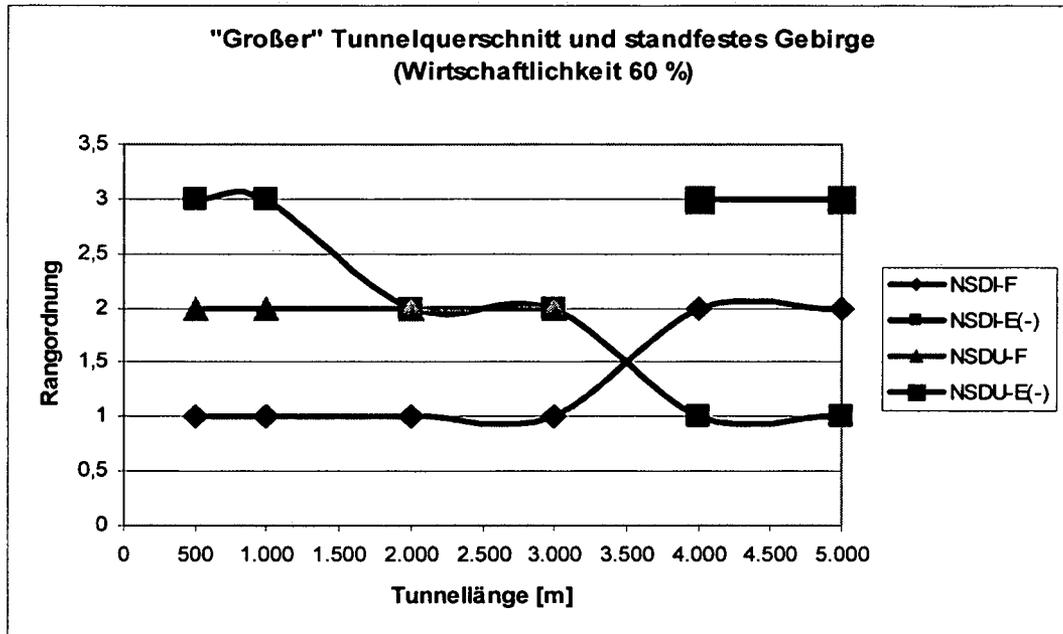


Abbildung 71: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „großen“ Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 60 % laut Zielprogramm)

Bei einem deutlichen Schwergewicht des Beurteilungsaspektes „Wirtschaftlichkeit“ eines Spritzbetonverfahrens zeigt sich, dass die Nassspritzverfahren sowohl im Dicht- als auch im Dünnstrom bei großen Tunnelquerschnitten (durch den größeren Querschnitt ergibt sich auch ein größerer Spritzbetonbedarf pro Abschlag) und bei einem Vortrieb in standfestem Gebirge den Trockenspritzverfahren überlegen sind. Mit zunehmender Tunnellänge – d.h. mit zunehmend erforderlichen Mengen an Spritzbeton und Ortbeton – wird auch die Eigenversorgung einer Tunnelbaustelle mit Nassmischgut wirtschaftlich interessanter (s. Abbildung 71 – Verlauf der Kurve für NSDI-E(-)).

Für den Fall einer schwächeren Gewichtung des Beurteilungsaspektes „Wirtschaftlichkeit“ (s. Abbildung 72) zeigt sich, dass sich das Nassspritzverfahren im Dichtstrom – aufgrund der guten Bewertungen der übrigen Beurteilungsaspekte - gegenüber allen anderen Verfahren in der Bewertung durchsetzt.

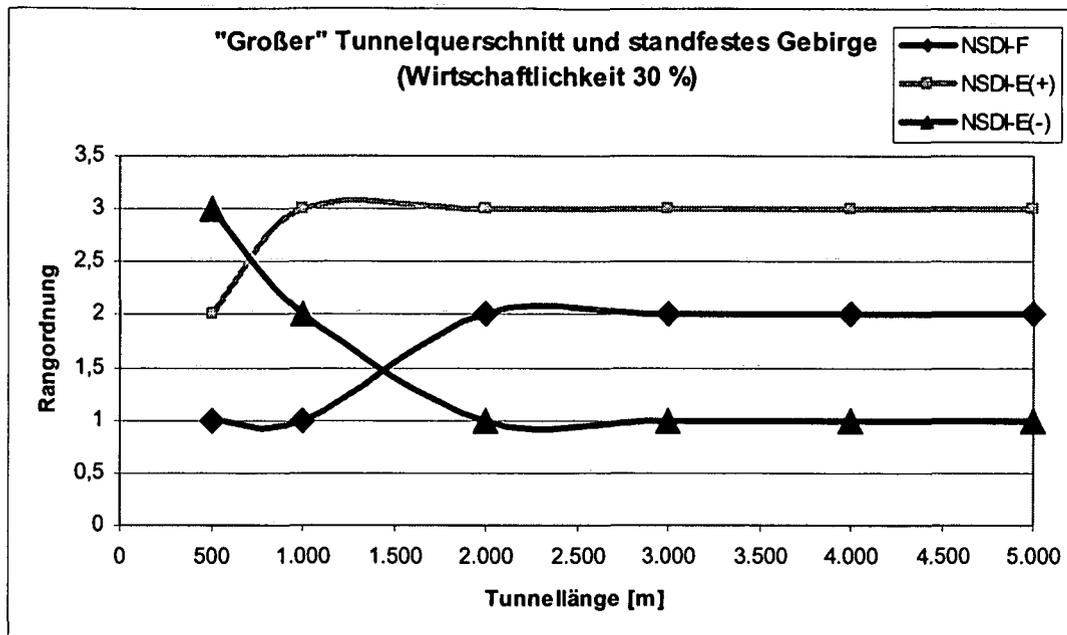


Abbildung 72: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „großen“ Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 30 % laut Zielprogramm)

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass eine Eigenversorgung der Baustelle bei geringen Tunnellängen und damit verbunden auch geringen Betonmengen wirtschaftlich sicher nicht sinnvoll ist. Die gute Bewertung der Systeme mit Eigenversorgung – auch bei geringen Tunnellängen von 500 m bis 1.000 m - ergibt sich durch die hohe Gewichtung der übrigen Beurteilungsaspekte, sollte aber kritisch hinterfragt werden bzw. sollten die Werte aus der Musterkalkulation in [€/m³] zusätzlich herangezogen werden.

VII.2.2 „Großer“ Tunnelquerschnitt und nachbrüchiges Gebirge

Analog zur Vorgangsweise im Punkt VII.2.1 wird in diesem Abschnitt die Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „großen“ Tunnelquerschnitt ermittelt. Für diese Parameterstudie erfolgt der Vortrieb allerdings nicht mehr in standfestem, sondern in nachbrüchigem Gebirge. In der Abbildung 73 ist die Rangordnung der einzelnen Spritzbetonsysteme für diesen Fall dargestellt.

Es zeigt sich, dass bei kurzen Vortrieblängen bis ca. 1.000 m das Trockenspritzverfahren mit erdfeuchtem Mischgut wirtschaftlich anwendbar ist, ansonsten sind die Nassspritzverfahren den Trockenspritzverfahren allerdings vorzuziehen. Auch hier zeigt sich, dass mit zunehmender Tunnellänge die Versorgung mit einer baustelleneigenen Mischanlage zunehmend bedeutender wird (s. Kurvenverlauf für NSDI-E(-) und NSDU-E(-)).

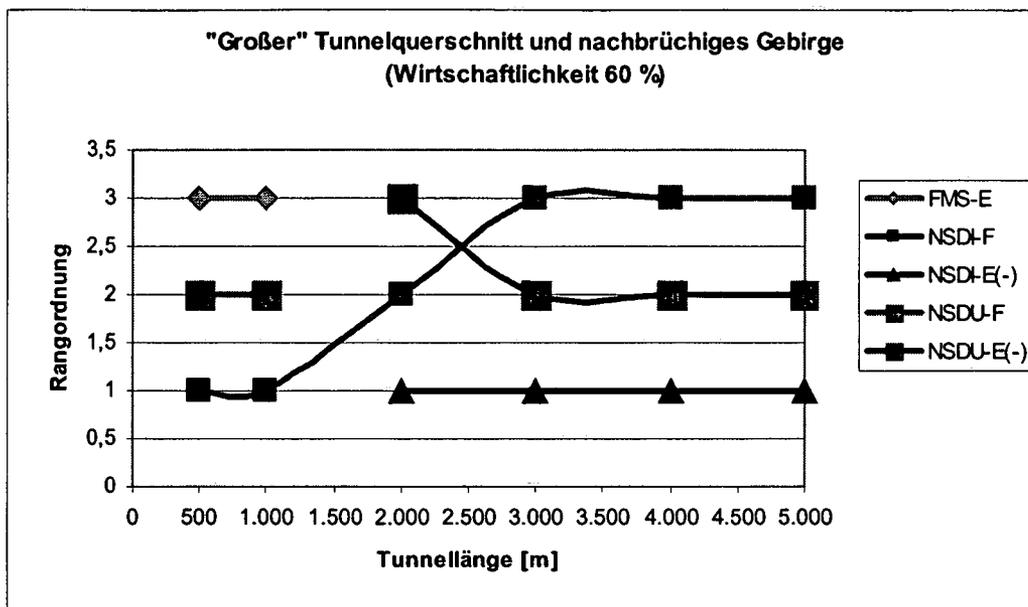


Abbildung 73: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „großen“ Tunnelquerschnitt in nachbrüchigem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 60 % laut Zielprogramm)

Bei einer geringen Bewertung der Wirtschaftlichkeit zeigt sich, dass das Trockenspritzverfahren mit erdfeuchten Zuschlägen sehr gut geeignet ist und für sämtliche untersuchte Vortriebslängen den ersten Rang einnimmt (s. Abbildung 74). Die Nassspritzverfahren im Dichtstrom sind aber auch in diesem Fall gut geeignet, hinsichtlich der Eigenversorgung der Baustelle bei kurzen Vortriebslängen gelten die Aussagen im Punkt VII.2.1.

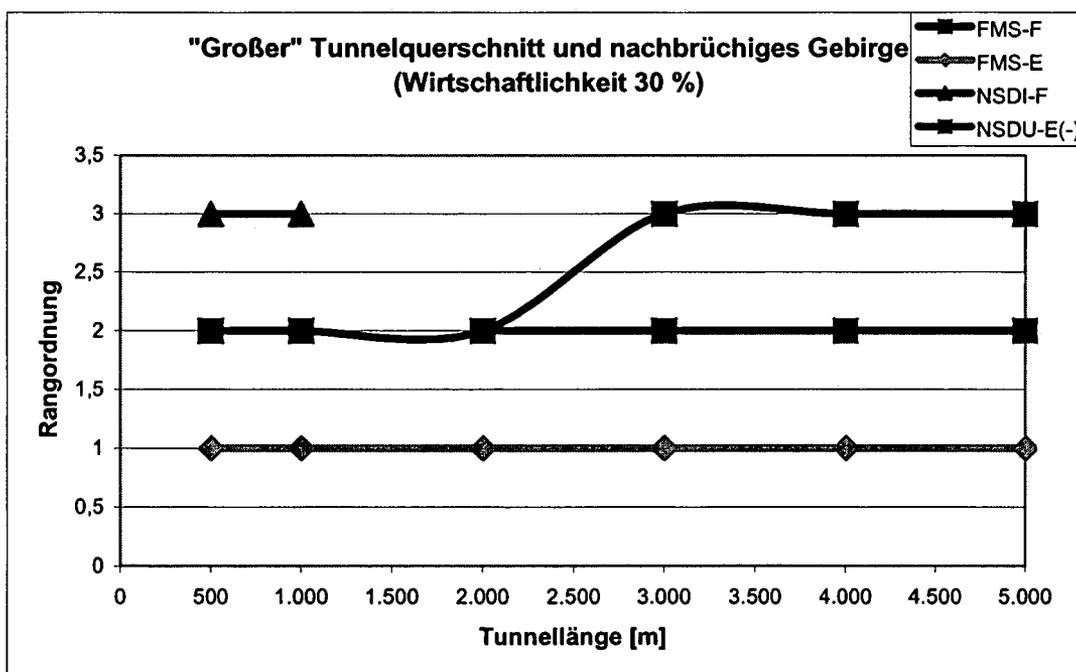


Abbildung 74: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „großen“ Tunnelquerschnitt in nachbrüchigem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 30 % laut Zielprogramm)

VII.2.3 „Kleiner“ Tunnelquerschnitt und standfestes Gebirge

Für diese Parameterstudie wurde ein Kalottenregelquerschnitt von $A_{RQ} = 19,20 \text{ m}^2$ und einer zugehörigen Abwicklungslänge von $A_{AL} = 11,00 \text{ m}$ herangezogen. Der Vortrieb erfolgt in standfestem Gebirge, die weiteren Eingangsparameter können dem Anhang detailliert entnommen werden.

Die Auswertung mit Hilfe des gegenständlichen Auswahlverfahrens ergibt – unter Berücksichtigung der Gewichtung des Beurteilungsaspektes „Wirtschaftlichkeit“ mit zunächst 60 % - die in der Abbildung 75 dargestellte Rangordnung der Spritzbetonverfahren.

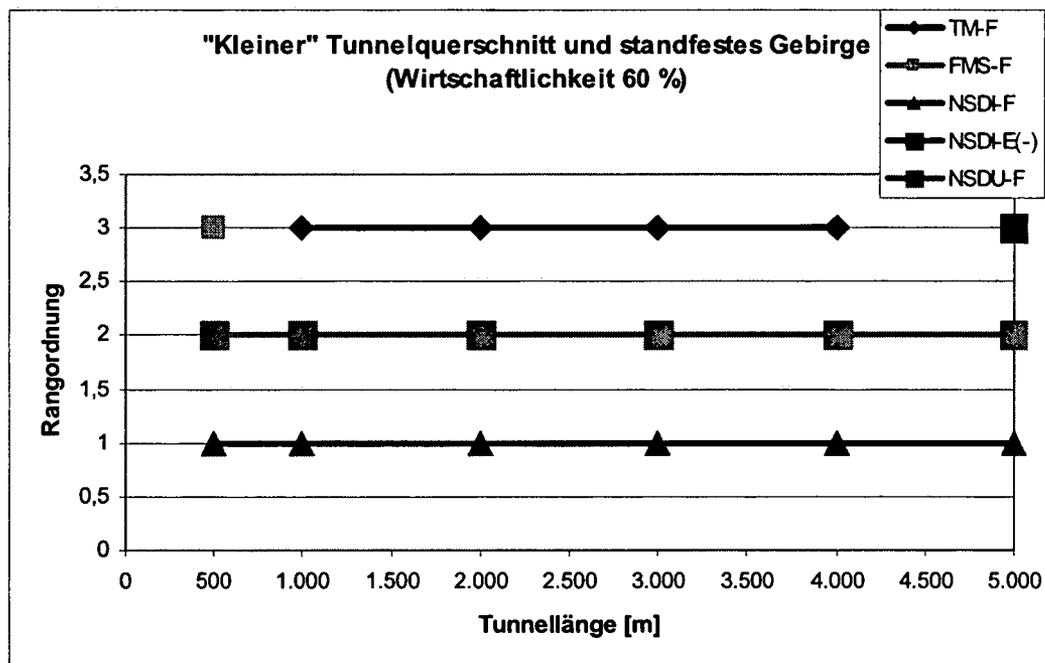


Abbildung 75: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „kleinen“ Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 60 % laut Zielprogramm)

Bei kleinen Tunnelquerschnitten in standfestem Gebirge sind die Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem bzw. erdfeuchtem Gesteinskörnung durchaus konkurrenzfähig und platzieren sich auf jeweils dritten Rängen. Die Nassspritzverfahren mit Fremdversorgung sind im Sinne einer ganzheitlichen Bewertung der Verfahren allerdings – aufgrund der geringeren Kosten für die Baustelleneinrichtung und die Vortriebsgeräte und der zusätzlichen guten Bewertung der übrigen Beurteilungsaspekte - den Trockenspritzverfahren vorzuziehen.

Wird der Faktor „Wirtschaftlichkeit“ auf 30 % herabgesetzt, dann führen diese o.a. guten Bewertungen der anderen Beurteilungsaspekte noch zu einer deutlicheren Verschiebung zu Gunsten der Nassspritzverfahren (s. Abbildung 76).

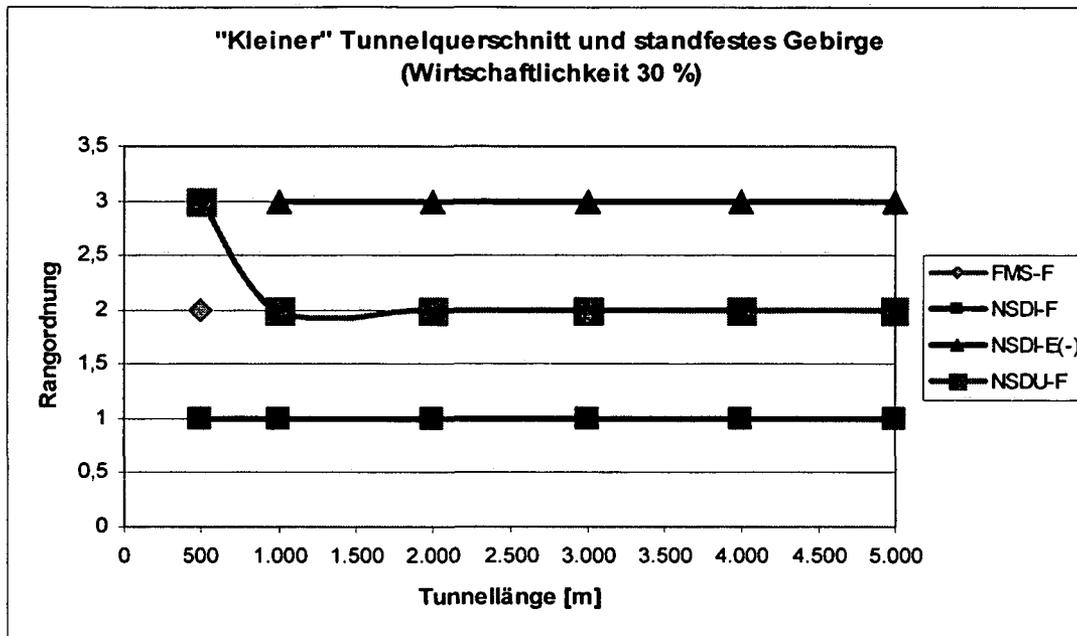


Abbildung 76: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „kleinen“ Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 30 % laut Zielprogramm)

VII.2.4 „Kleiner“ Tunnel und nachbrüchiges Gebirge

Analog zur Vorgangsweise im Punkt VII.2.3 erfolgt die Ermittlung der Rangordnung der Spritzbetonsysteme für „kleine“ Tunnel in nachbrüchigem Gebirge. Für die Gewichtung des Beurteilungsaspektes „Wirtschaftlichkeit“ ergibt sich der nachfolgende Kurvenverlauf (s. Abbildung 77).

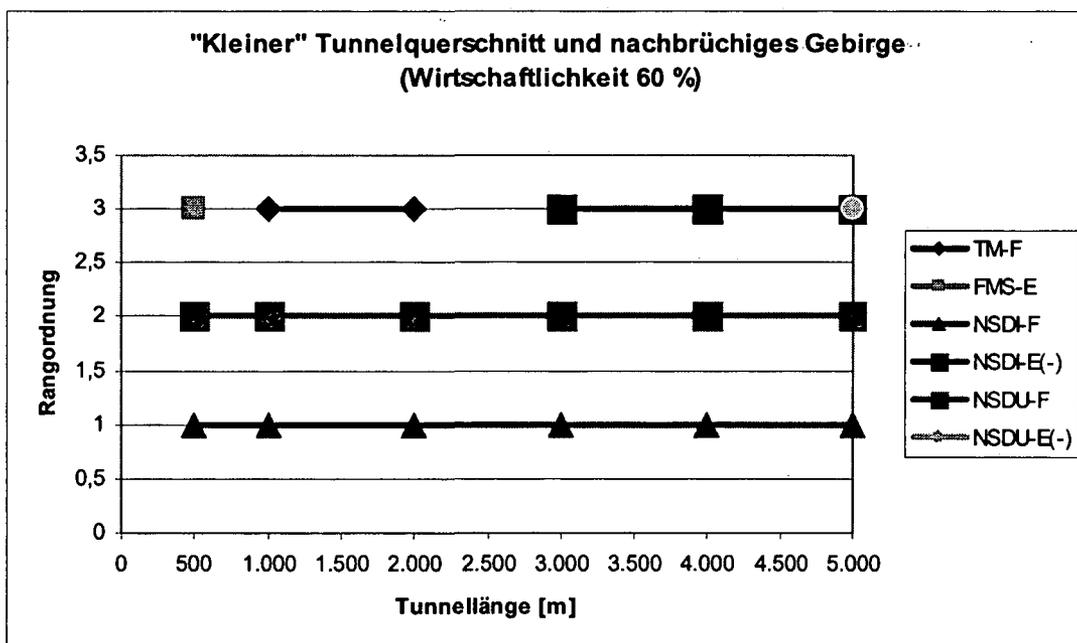


Abbildung 77: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „kleinen“ Tunnelquerschnitt in nachbrüchigem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 60 % laut Zielprogramm)

Es zeigt sich, dass die Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem und erdfeuchtem Mischgut wirtschaftlich konkurrenzfähig sind und somit – insbesondere bei Vortriebslängen bis zu 2.000 m – gut eingesetzt werden können. Die Nassspritzverfahren sind – nachdem die Flexibilität dieser Verfahren durch technische Innovationen deutlich verbessert werden konnte – auch bei schlechten Gebirgsverhältnissen und bei kleinen Tunnelquerschnitten sehr gut einsetzbar.

Wird die Gewichtung des Beurteilungsaspektes „Wirtschaftlichkeit“ auf 30 % herabgesetzt, ergeben sich deutliche Vorteile für das Trockenspritzverfahren mit erdfeuchtem Mischgut. Mit zunehmender Tunnellänge verbessert sich allerdings auch das Nassspritzverfahren im Dichtstrom vom dritten auf den ersten Rang und erscheint damit auch bei einer ganzheitlichen Betrachtung als sehr gut einsetzbar (s. Abbildung 78).

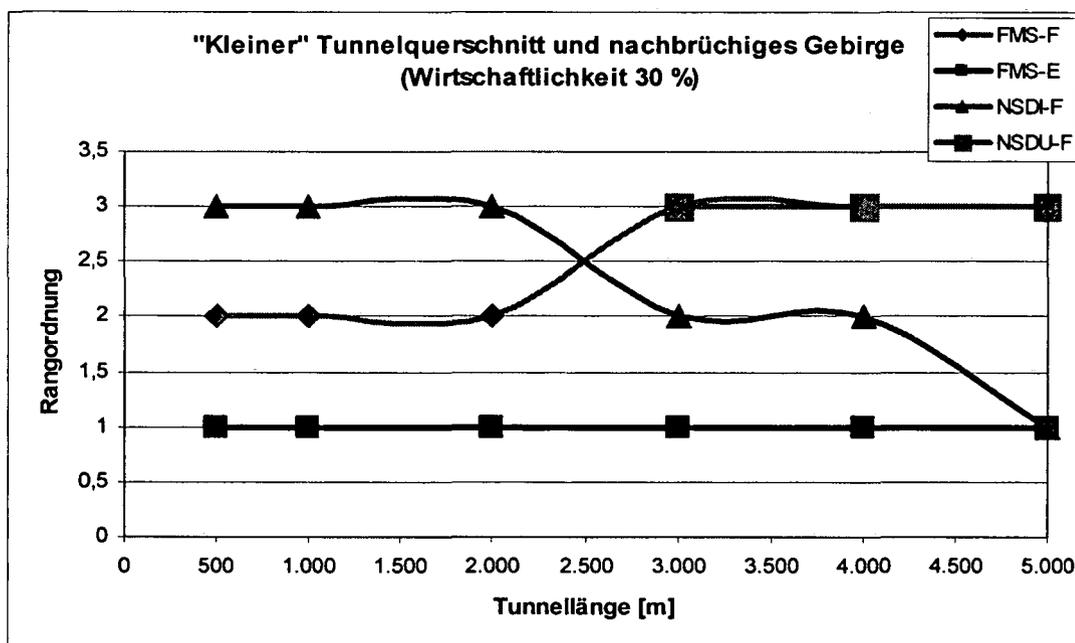


Abbildung 78: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „kleinen“ Tunnelquerschnitt in nachbrüchigem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 30 % laut Zielprogramm)

VII.2.5 Schlussfolgerungen

Bereits in der Einleitung zum gegenständlichen Kapitel wird darauf verwiesen, dass die Aussagen in den Punkten VII.2.1 bis VII.2.4 über die Rangordnung der einzelnen Spritzbetonsysteme nicht allgemeingültig sind. Die Parameterstudien beruhen auf einer Vielzahl von äußerst komplexen Eingangsparametern. Diese Parameter dürfen jedoch nur als Richtwerte verstanden werden und können sich demnach in Abhängigkeit von den baustellenspezifischen Randbedingungen auch stark verändern. Dadurch kann es von Fall zu Fall zu Verschiebungen innerhalb der Rangordnung der Spritzbetonsysteme kommen .

Generell lassen sich aber mit Hilfe der durchgeführten Parameterstudie – unter Berücksichtigung der kalkulativen Eingangsparameter (s. Anhang), der vom Autor vorab gewählten Gewichtungen der Beurteilungsaspekte und Beurteilungskriterien und den baustellenspezifischen Unsicherheiten - doch einige Trends ablesen:

- Bei **großen Tunnelquerschnitten und Vortrieben in standfestem Gebirge** sind die Nassspritzverfahren den Trockenspritzverfahren deutlich überlegen. Die Bedeutung der Eigenversorgung der Baustelle mit Spritzbeton nimmt mit zunehmender Vortriebslänge zu.
- Bei **großen Tunnelquerschnitten und Vortrieben in nachbrüchigem Gebirge** sind die Trockenspritzverfahren bei Vortriebslängen bis ca. 1.000 m Länge noch konkurrenzfähig. Eine ganzheitliche Bewertung der Verfahren ergibt jedoch auch für diesen Fall eine bessere Platzierung der Nassspritzverfahren gegenüber den Trockenspritzverfahren. Auch hier zeigt sich, dass die Bedeutung der Eigenversorgung der Baustelle mit Spritzbeton mit zunehmender Vortriebslänge zunimmt.
- Bei **kleinen Tunnelquerschnitten und Vortrieben in standfestem Gebirge** können die Trockenspritzverfahren gut und wirtschaftlich eingesetzt werden. Durch die verbesserte baubetriebliche Flexibilität können mit den Nassspritzverfahren ebenfalls gute Ergebnisse erzielt werden. Ab einer Vortriebslänge von ca. 3.000 m beginnt sich die Eigenversorgung der Baustelle mit Spritzbeton zu rechnen.
- Bei **kleinen Tunnelquerschnitten und Vortrieben in nachbrüchigem Gebirge** steigt die Bedeutung der Trockenspritzverfahren (ofentrocken und erdfeucht) gegenüber den Nassspritzverfahren. Wird die Bedeutung des Beurteilungsaspektes „Wirtschaftlichkeit“ bei der ganzheitlichen Bewertung der Verfahren zurückgenommen, erreicht das Trockenspritzverfahren mit erdfeuchtem Mischgut aufgrund seiner guten baubetrieblichen Beurteilungen die besten Bewertungen.

VIII Ausblick

VIII.1 Zusammenfassung

Das Forschungsziel der gegenständlichen Arbeit liegt in der Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems zur Auswahl von geeigneten Spritzbetonsystemen im Tunnel- und Stollenbau. Der fachkundige Ingenieur soll mit einer klar strukturierten und checklistenartigen Vorgangsweise bei der Entscheidungsfindung unterstützt werden, dabei

- sollen einerseits potentielle Fehlermöglichkeiten minimiert werden und
- andererseits zusätzlich die Überlegungen zur endgültigen Auswahl eines Verfahrens transparent und klar nachvollziehbar dargestellt werden.

Neben der Berücksichtigung der projektspezifischen Randbedingungen werden die jeweiligen Verfahren hinsichtlich des Baubetriebs, der Baustelleneinrichtung, der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes sowie der Wirtschaftlichkeit beurteilt und mittels einer Nutzwertanalyse schlussendlich einer ganzheitlichen Beurteilung unterzogen.

Zunächst wird im **Kapitel 2** der Begriff „**Entscheidungshilfesystem**“ definiert. Dabei handelt es sich um interaktive, auf Computer basierende Systeme, die dem Anwender helfen sollen, zielgerichtet Entscheidungen bei komplexen Aufgaben- bzw. Problemstellungen zu treffen. Dem Benutzer wird dadurch nicht nur „Expertenwissen“ zur Verfügung gestellt, sondern auch eine strukturierte und klar nachvollziehbare und erklärbare Vorgangsweise bei der Lösung komplexer Probleme angeboten. Die erhaltenen Lösungsansätze sind dabei aber weder völlig richtig noch falsch, sondern im Rahmen von Ermessensspielräumen plausibel und vernünftig und stellen nur eine mögliche Unterstützung bei der Entscheidungsfindung dar.

Im täglichen Einsatz müssen die Ergebnisse des Entscheidungshilfesystems nach wie vor vom Anwender ständig kontrolliert werden. Auch muss der Benutzer weiterhin auf seinem Fachgebiet geschult sein, um vermeidbare Fehlfunktionen und unplausible Lösungsansätze zu erkennen und entsprechend reagieren zu können. Die eigentliche Entscheidung und das Vertreten der Lösung kann dem Benutzer durch das System nicht abgenommen werden.

Nach diesem theoretischen Exkurs in die Welt der Datenverarbeitung und der Informatik wird im dritten Kapitel „**Spritzbetonverfahren**“ zunächst ein Überblick über die einzelnen Spritzbetonverfahrenstechniken gegeben, anschließend werden die folgenden insgesamt acht Spritzbetonsysteme und deren zugehörige Verfahrenstechnik analysiert:

- Trockenspritzverfahren mit Trockenmischgut (TM-F und TM-E)
- Trockenspritzverfahren mit erdfeuchtem Mischgut (FMS-F und FMS-E)

- Nassspritzverfahren im Dichtstrom (NSDI-F und NSDI-E)
- Nassspritzverfahren im Dünnstrom (NSDU-F und NSDU-E)

Bei der Systembezeichnung wird zusätzlich nach Fremd- und Eigenversorgung unterschieden (Kennbuchstabe „F“ für Fremdversorgung und „E“ für Eigenversorgung). Mit Eigenversorgung wird dabei die Aufbereitung von Mischgut bzw. Gesteinskörnung direkt auf der Baustelle (z.B. durch den Einsatz einer baustelleneigenen Aufbereitungs- und Mischanlage) bezeichnet, während unter Fremdversorgung die Zulieferung des Mischgutes durch ein externes Transportbetonwerk verstanden wird.

Als Grundlage für eine weiterführende Musterkalkulation werden in diesem Abschnitt für die einzelnen Spritzbetonsysteme übersichtliche Flussdiagramme entwickelt, die den baubetrieblichen Ablauf von der Anlieferung der Spritzbetonausgangsstoffe bzw. des Mischgutes zur Baustelle, über die Verarbeitung des Mischgutes vor Ort bis zum eigentlich Spritzbetonauftrag lückenlos darstellen (s. Abbildung 15 bis Abbildung 28).

Die Erfassung von wesentlichen Beurteilungskriterien zur Auswahl von Spritzbetonsystemen erfolgt im Kapitel **„Erfassung von Beurteilungskriterien“**. 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 - in sogenannten „Zielertragsmatrizen“ für jeden Beurteilungsaspekt - dargestellt. Unter einem Zielertrag wird dabei ein „Matrixkästchen“ mit numerischen oder verbalem Inhalt verstanden, dass ein Spritzbetonsystem bezüglich eines Beurteilungskriteriums beschreibt (z.B. Rückprall = 40 %).

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

- Verfahrensunabhängige Beurteilungskriterien,
- Baubetrieb,
- Baustelleneinrichtung,
- Betontechnologie,
- Arbeitssicherheit, Umwelt- bzw. Gesundheitsschutz und
- Wirtschaftlichkeit.

Die Gliederung der o.a. Beurteilungsaspekte nach Beurteilungskriterien ist einerseits grafisch in der Abbildung 30 und Abbildung 31 übersichtlich dargestellt, eine detaillierte Beschreibung

der Beurteilungsaspekte und der – alphabetisch geordneten - Beurteilungskriterien erfolgt in zugehörigen Zielertragsmatrizen (s. Tabelle 16 bis Tabelle 24). Durch die Berücksichtigung der einzelnen Beurteilungsaspekte bei der Entscheidungsfindung soll nicht nur eine ausschließliche Beurteilung der einzelnen Verfahren nach den ermittelten Kosten erfolgen, sondern eine ganzheitliche Bewertung nach z.B. baubetrieblichen und betontechnologischen Aspekten möglich sein.

Im Kapitel „**Musterkalkulation**“ werden die Kosten – auf Basis der baubetrieblichen Flussdiagramme und der ausgeschriebenen Vortriebsklassenverteilung des zyklischen und zeitkritischen Kalottenvortriebes - für einen Losekubikmeter Spritzbeton ermittelt.

Es wird davon ausgegangen, dass die Sicherung des Hohlraumrandes bzw. der Ortsbrust mit Spritzbeton immer am kritischen Weg liegt und die Spritzbetonarbeiten daher wesentlich die Gesamtdauer eines Abschlages und somit die erzielbaren Vortriebsleistungen in den jeweiligen Vortriebsklassen bestimmen. Außerdem wird die Annahme getroffen, dass durch die Anwendung unterschiedlicher Spritzbetonverfahrenstechniken bei einem Tunnelbauprojekt die übrigen Arbeitsvorgänge eines Abschlages nicht beeinflusst werden.

Der Aufbau der Musterkalkulation von der Eingabe der wesentlichen Kostenansätze bis zur Ermittlung der Berechnungsergebnisse wird in der Abbildung 62 dargestellt. Zunächst sind vom Anwender im Kalkulationsprogramm die verfahrensunabhängigen Beurteilungskriterien bei der Auswahl eines Spritzbetonverfahrens einzugeben, dazu zählen beispielsweise die geometrischen Abmessungen des Tunnels, die Anzahl der Vortriebe oder die Vortriebsklassenverteilung in der Kalotte. Außerdem sind vom Anwender die Kostenansätze für die Baustelleneinrichtung, das Mischgut bzw. die Spritzbetonausgangsstoffe, die Vortriebsgeräte und das Personal einzugeben. Das **Tabellenkalkulationsprogramm „Musterkalkulation“** (s. beiliegende CD-Rom) gibt bereits Richtwerte für Kostenansätze vor, die vom jeweiligen Anwender aber an die baustellenspezifischen Randbedingungen angepasst werden können.

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. Diese Verminderung bzw. Erhöhung der zeitgebundenen Baustellengemeinkosten, die aus den unterschiedlichen Spritzbetonförderleistungen resultiert, wird in der Kalkulation in Form einer Umlage dieser Kosten auf einen Losekubikmeter Spritzbeton berücksichtigt.

Nach der Berechnung der Kosten für einen Losekubikmeter Spritzbeton mit Hilfe der o.a. Musterkalkulation, werden sämtliche Spritzbetonsysteme einer ganzheitlichen Bewertung mittels einer **Nutzwertanalyse** (Kapitel „Bewertung der Einflussparameter“) unterzogen. Der schematische Ablauf und die grundsätzliche Vorgangsweise bei einer Nutzwertanalyse wird in der Abbildung 70 grafisch dargestellt. In einem ersten Schritt wird vom Anwender mit dem **Tabellenkalkulationsprogramm „Zielwertmatrizen“** (s. beiliegende CD-Rom) ein Zielprogramm definiert, darunter wird eine Gewichtung der Beurteilungsaspekte im Zuge der Nutzwertanalyse zur Ermittlung eines Nutzwertes verstanden.

Damit kann z.B. die Bedeutung des Beurteilungsaspektes „Wirtschaftlichkeit“ gegenüber den anderen Beurteilungsaspekten erhöht oder verringert werden. Danach muss der Anwender die Beurteilungskriterien anhand vorliegender baustellenspezifischer Randbedingungen bewerten, die Berechnung der Nutzwerte für jeden Beurteilungsaspekt bzw. die Ermittlung eines ganzheitlichen Nutzwertes erfolgt dann selbständig durch das Tabellenkalkulationsprogramm. Abschließend werden die einzelnen Verfahren – auf der Grundlage der Eingaben durch den Anwender – nach Rängen geordnet, wobei dem am besten geeigneten Verfahren der erste Rang zugewiesen wird.

Im letzten Kapitel der Arbeit werden **Parameterstudien** durchgeführt, um die Plausibilität der Berechnungs- und Auswertungsergebnisse des Auswahlverfahrens bewerten zu können. Dabei werden die vier nachfolgenden Vortriebsszenarien rechnerisch untersucht:

- „Großer“ Tunnelquerschnitt ($A_{RQ} = 75 \text{ m}^2$) und Vortrieb in standfestem Gebirge
- „Großer“ Tunnelquerschnitt ($A_{RQ} = 75 \text{ m}^2$) und Vortrieb in nachbrüchigem Gebirge
- „Kleiner“ Tunnelquerschnitt ($A_{RQ} = 25 \text{ m}^2$) und Vortrieb in standfestem Gebirge
- „Kleiner“ Tunnelquerschnitt ($A_{RQ} = 25 \text{ m}^2$) und Vortrieb in nachbrüchigem Gebirge

Die Berechnung der Nutzwerte erfolgt für verschiedene Tunnellängen (von 500 m bis 5.000 m) und zwei unterschiedliche Zielprogramme, damit soll die Empfindlichkeit des Systems auf Änderungen im Zielprogramm getestet werden.

Die in der gegenständlichen Arbeit und mittels Parameterstudien beispielhaft angeführten Rangordnungen sind allerdings nicht allgemeingültig, sondern beruhen ausschließlich auf den vorab gewählten Eingangsparametern für jedes Berechnungsszenario. Änderungen dieser Berechnungsparameter führen bei der Auswertung des Systems zwangsläufig zu Verschiebungen innerhalb der Rangordnung der Spritzbetonsysteme.

Generell lassen sich mit Hilfe der durchgeführten Parameterstudie aber trotzdem einige grobe Trends ablesen:

- Bei **großen Tunnelquerschnitten und Vortrieben in standfestem Gebirge** sind die Nassspritzverfahren den Trockenspritzverfahren überlegen.
- Bei **großen Tunnelquerschnitten und Vortrieben in nachbrüchigem Gebirge** sind die Trockenspritzverfahren bei Vortriebslängen bis ca. 1.000 m Länge noch konkurrenzfähig, die Nassspritzverfahren weisen gegenüber den Trockenspritzverfahren aber tendenziell bessere Nutzwerte auf.
- Bei **kleinen Tunnelquerschnitten und Vortrieben in standfestem Gebirge** können sowohl Trockenspritzverfahren als auch Nassspritzverfahren gut und wirtschaftlich eingesetzt werden.
- Bei **kleinen Tunnelquerschnitten und Vortrieben in nachbrüchigem Gebirge** steigt die Bedeutung der Trockenspritzverfahren (ofentrocken und erdfeucht) gegenüber den Nassspritzverfahren deutlich an.

VIII.2 Schlussfolgerungen

Mit der vorliegenden Arbeit und den beigefügten Kalkulationsprogrammen wird eine strukturierte, digitalisierte Vorgangsweise bei der Auswahl eines Spritzbetonsystems angeboten. Neben der Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit eines Spritzbetonverfahrens wird damit erstmals der Versuch unternommen, mehrere – nicht monetär bewertbare - Beurteilungsaspekte (z.B. Baubetrieb, Arbeitssicherheit) in eine klar strukturierte und nachvollziehbare Entscheidungsfindung mit Hilfe der Methode der Nutzwertanalyse einzubinden. Wesentliche Einflussparameter auf den Entscheidungsfindungsprozess liegen dabei übersichtlich und gegliedert in Form von Zielertragsmatrizen vor und bilden damit die Grundlage für die Vergleichbarkeit von einzelnen Beurteilungskriterien und Beurteilungsaspekten für unterschiedliche Spritzbetonsysteme.

Außerdem bietet die für sämtliche Spritzbetonsysteme erarbeitete Musterkalkulation die Möglichkeit einer detaillierten Kostenkalkulation, in der die wesentlichen Kosten für die Baustelleneinrichtung, die Vortriebsgeräte und das Vortriebspersonal und die unterschiedlichen Mischgutzusetzungen übersichtlich einander gegenübergestellt und miteinander verglichen werden können. Unterschiedlichste Berechnungsszenarien können durch die Eingabe unterschiedlicher Kostenansätze durchgespielt werden, durch eine unterschiedliche Gewichtung der Zielprogramme kann die Bedeutung einzelner Beurteilungsaspekte gegenüber anderen erhöht oder vermindert werden und der Einfluss eines Beurteilungsaspektes auf die Entscheidungsfindung damit abgeschätzt werden kann.

Aus der Sicht des Autors der gegenständlichen Arbeit besteht allerdings weiterer Forschungs- bzw. Verbesserungsbedarf in folgender Hinsicht:

- Derzeit ist das Tabellenkalkulationsprogramm nur in Verbindung mit der gegenständlichen Arbeit, die als Handbuch für den Anwender verstanden wird, strukturiert nutzbar. Die Interaktionsfähigkeit des Entscheidungshilfesystems, welches derzeit noch programmtechnisch auf einem leicht handhabbaren Tabellenkalkulationsprogramm (Microsoft - Excel) basiert, sollte daher durch die Erarbeitung einer anwenderfreundlichen Benutzeroberfläche verbessert werden. Damit sollte einerseits eine Verbesserung der Dialogfähigkeit zwischen dem Anwender und dem Entscheidungshilfesystem möglich werden und andererseits eine bessere Nachvollziehbarkeit von Entscheidungsfindungsprozessen erreicht werden.
- Für den Aufbau einer Wissensdatenbank für mehrere Tunnel- und Stollenbauprojekte sollte eine Vernetzung der benutzerfreundlichen Oberfläche mit einem Datenbanksystem erfolgen. Damit wäre eine weitere Zielsetzung für den Aufbau eines übergeordneten „Expertensystems“ erfüllt. Durch die Speicherung von zahlreichen Projektdaten könnte das System damit „selbständig“ von den einzelnen Projekten „lernen“ und den Anwender mit zusätzlichem Faktenwissen bei der Entscheidungsfindung unterstützen.

Die vorliegende Arbeit und die beigelegten Kalkulationsprogramme stellen aus der Sicht des Autors für den fachkundigen Anwender eine gute Grundlage für eine klar strukturierte Auswahl eines Spritzbetonverfahrens im Tunnel- und Stollenbau dar. Die Ergebnisse des Entscheidungshilfesystems stellen dabei zwar mit Sicherheit keine absolut richtigen Lösungen dar, sondern sind in gewissen Ermessensspielräumen plausibel und müssen durch den Anwender noch eingehend geprüft werden.

Verbesserungen des vorgeschlagenen Auswahlverfahrens durch die Erarbeitung einer benutzerfreundlichen Oberfläche und eine weitere Verfeinerung der Musterkalkulation würden die Interaktions- und Dialogfähigkeit des Systems und damit den Kreis potentieller interessierter Anwender erhöhen. Bewährt sich dieses Entscheidungshilfesystem zur Auswahl eines Spritzbetonsystems im „baubetrieblichen“ Alltag, wäre eine Anwendung dieser Methode der Verfahrensauswahl mittels Nutzwertanalysen auch auf andere Felder der Bauverfahrenstechnik (z.B. Spezialtiefbau, Hochbau) durchaus denkbar und würde weiteren baubetrieblichen und bauwirtschaftlichen Forschungsbedarf bieten.

IX Verzeichnisse

IX.1 Literatur

IX.1.1 Expertensysteme - Entscheidungshilfesysteme

- [1] Analyse von Entscheidungshilfesystemen und Wissensmanagement im Bauwesen / M. Malinek / Diplomarbeit am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / TU-Wien / 2001
- [2] BINAS – Ein Entscheidungshilfesystem für die Bestandsanalyse von Bauwerken /
- [3] Computerunterstützte Baustellenführung / M. Gehri / Dissertation am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / ETH-Zürich / 1992
- [4] Das Cyber-Unternehmen – total digital vernetzt / J. Martin / Ueberreuter / 1997
- [5] Die Wahl eines Vertriebssystems mit Hilfe des Analytischen Hierarchie-Prozesses / W. Ossadnik, O. Lange / Zeitschrift WISU / April 2000
- [6] Entwicklung eines Expertensystems zur Beurteilung, Beseitigung und Vorbeugung von Oberflächenschäden an Betonbauteilen / M. Sohni / Dissertation am Institut für Massivbau / Technische Hochschule Darmstadt / 1992
- [7] Expertensysteme – nicht nur für Informatiker / P. Schnupp, U. Leibrandt / Springer-Verlag / 1986
- [8] Expertensysteme / A. Bremer / Vortrag beim Seminar Datenverarbeitung / Lehrstuhl Datenverarbeitung / Ruhr-Universität Bochum / 2000
- [9] Expertensysteme in der Architektur und im Bauwesen / M. Lenart / Birkhäuser Verlag / 1991
- [10] Expertensysteme zur Lösung bauwirtschaftlicher und baubetrieblicher Probleme / C.J. Diederichs / Bauwirtschaft Heft 2/1988
- [11] Expertensystem-Praktikum / P. Schnupp, C.T. Nguyen Huu / Springer Verlag / 1987
- [12] <http://dssresources.com/papers/whatisadss/index11.htm> Stand Dezember 2000
- [13] <http://www.et-inf.fho-emden.de/~socher/xps/inhalt.html>
- [14] <http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/Projekte/plex/PLex/Lemmata/H-Lemma/Heuristi.htm>
<http://www.uni-weimar.de/~ikm/PROC97/DOCS/079/INDEX.HTM>
- [15] Introduction to Expert Systems / P. Jackson / Addison-Wesley 1986
- [16] Kommunikations- und Datenflüsse aus baubetrieblicher Sicht unter besonderer Berücksichtigung neuer Medien / H. Christalon / Diplomarbeit am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / TU-Wien / 1998
- [17] What is an Expert System. Expert Systems in Civil Engineering, ASCE, In Kostem and Maher – pp. 1 - 6 / S. Fenves / New York 1986

IX.1.2 Spritzbetonverfahren

- [18] Alkaliarme Spritzbetontechnologie / M. Testor / Dissertation / Institut für Baustofflehre und Materialprüfung / Universität Innsbruck 1997
- [19] Ausgewählte Bauverfahren // H.G. Jodl, G. Goger / Vorlesungsskriptum / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / TU-Wien 2001
- [20] Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau / G. Girmscheid / Ernst & Sohn 2000
- [21] Bewertung von neuentwickelten Spritzbetonverfahrenstechniken / Straßenforschung – Heft 474 / BM für wirtschaftliche Angelegenheiten / 1998
- [22] Das Nassspritzverfahren im Dichtstromverfahren in Österreich / W. Pichler / Spritzbetontagung Alpbach 2002 / Tagungsband
- [23] Einführung in die neue Richtlinie Spritzbeton / Österreichischer Betonverein / Heft 35 / Dezember 1998

- [24] Entscheidungskriterien für die Auswahl von Spritzbetonverfahren / D. Bady / Diplomarbeit / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / TU-Wien 2000
- [25] Handbuch für Spritzbeton / B. Maidl / Ernst & Sohn 1992
- [26] http://www.aliva.com/deu/index_3nd.html Stand August 2001
- [27] <http://www.asg.physik.uni-erlangen.de/europa/eugmap.htm>
- [28] <http://www.rgbaustoffe.de/frame03.html> Stand August 2001
- [29] <http://www.transbeton.at/transmobil/> Stand August 2001
- [30] Maschinentechnische Anforderungen an Spritzmaschinen im Dünnstromverfahren / J. Scherer / Spritzbeton-Technologie / 2. internationale Fachtagung in Innsbruck / 1987
- [31] NATS / New Austrian Torkret System / Prospekt 04/1997
- [32] New ecologically desirable sprayed concrete / W. Kusterle / Institute for Building Materials and Material Testing, University of Innsbruck / Austria 1997
- [33] Beton: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis / ÖNORM B 4710-1 / Stand 01.01.2002
- [34] Richtlinie Spritzbeton / Österreichischer Betonverein / Oktober 1998
- [35] Spritzbeton auf der Neubaustrecke Köln – Rhein/Main / R. Sternath / Spritzbeton – Technologie / 6. Internationale Fachtagung / 1999
- [36] Spritzbeton im Tunnelbau - Analyse der Verfahrensweisen, der Arbeitssicherheit, der Qualität und der Wirtschaftlichkeit / S. Matzenauer / Diplomarbeit / Technische Universität, Bergakademie Freiberg 1998
- [37] Spritzbetonmanagement – Leistungs- und Kostenevaluation / A. Stecher / Forschungsbericht / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / ETH – Zürich / 2000
- [38] Untertagebauarbeiten / Werkvertragsnorm / ÖNORM B 2203-1 / Stand: 01.12.2001
- [39] Untertagebauarbeiten / Werkvertragsnorm / ÖNORM B 2203 / Stand: 01.10.1994

IX.1.3 Erfassung von Einflussparametern

- [40] Alkaliarme Spritzbetontechnologie – Spritzsysteme, Dosiertechnik und Benetzungstechnik / M. Testor, W. Kusterle / Tunnel 5 / 1998
- [41] Alkaliarme Spritzbetontechnologie – Verfahrenstechnik / M. Testor / Dissertation / Institut für Baustofflehre und Materialprüfung / Universität Innsbruck 1997
- [42] Alkalifrei beschleunigter Nassspritzbeton / Zeitschrift Tunnel / 02/2000
- [43] Anmerkungen zum Baustelleneinsatz der neuen Spritzbetontechniken / G. Strappler / Spritzbetontechnologie 1996/ Tagungsband / Seite 11-19
- [44] ARGE Eggraintunnel AET / Firmenunterlagen Mobil-Crete / 2001
- [45] Arlbergtunnel Ostportal: Nassspritzverfahren gewährleistet Bautermin / H. Schatz, F. Embacher, E. Galehr / STUVA-Tagung 1999 in Frankfurt
- [46] Automatisierte Spritzarmsteuerung / O. Tschumi / Spritzbetontechnologie 1999 / Tagungsband / Seite 129-135
- [47] Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau / G. Girmscheid / Ernst & Sohn 2001
- [48] Baupraktische Vergleiche mehrerer Spritzbetonverfahren am Siebergtunnel / P. Schwab / Spritzbeton-Technologie / Tagungsband / Innsbruck 1999
- [49] Baustelleneinrichtung – Betriebliche Organisation, Geräte, Kosten und Checklisten / P. Böttcher / Bauverlag / 1997
- [50] Beschleunigerfreie Werkstrockengemische auf Basis Schnellzement im Tunnelbau / R. Röck / Spritzbetontechnologie 1993 / Tagungsband / Seite 59-63

- [51] Betontechnologische Einflüsse auf das Rückprallverhalten im Trockenspritzverfahren / M. Pfeuffer / Zeitschrift Zement und Beton / 2000 / Seite 29-32
- [52] Bewertung von neuentwickelten Spritzbetonverfahrenstechniken / W. Lukas et.al / Straßenforschung - Heft 474 / BMWA
- [53] Bindemittel- und Verfahrenstechnologie von modernem Spritzbeton / K. Eichler / Spritzbetontechnologie 1999 / Tagungsband / Seite 195-202
- [54] Das Mobil-Crete Spritzbeton Informationssystem 2000 / Firmenunterlagen / CD / 2000
- [55] Das Nassspritzen im Dichtstromverfahren mit einem Aluminatbeschleuniger am Beispiel Top-Shot / K.E. von Eckardstein / Seite 155-163
- [56] Das Nassspritzverfahren – Baustellenerfahrungen und Kostenvergleiche / H. Lauffer / Spritzbetontechnologie 1987 / Tagungsband / Seite 75-80
- [57] Dauerhaftigkeit von Spritzbetonbauwerken / K. Frager / Diplomarbeit / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / TU - Wien 1997
- [58] Der Einsatz von Rückprallminderer im Trockenspritzverfahren / R. Röck, K. Mitteregger / Spritzbetontechnologie 1999 / Tagungsband / Seite 47-53
- [59] Der Erkundungsstollen Fiecht / K. Czopak / PORR – Nachrichten Nr. 139 / 2002
- [60] Der Felsbau / 3. Band Tunnelbau / L. Müller / Enke-Verlag 1978
- [61] Der Tunnel Spital – täglich eine neue Herausforderung / M. Diewald / PORR – Nachrichten Nr. 138 / 2001
- [62] Die Baustelleneinrichtung – Entwurf, Planung, Beispiele / G. Drees / Werner Verlag / 1971
- [63] Die zwei Wege zum Abbindebeschleunigen von Spritzbeton / E. Werthmann / ÖIAZ / Heft 06/1995
- [64] Ein neues System flüssiger Erstarrungsbeschleuniger für Spritzbeton – Erfahrungen im Tunnelbau / G. Vogel / Spritzbetontechnologie 1987 / Tagungsband / Seite 41-47
- [65] Einfluss der Baustellenorganisation und Bauablaufplanung auf die Qualität des Spritzbetons / G. Ruffert / Zeitschrift Tunnel / 02/1996
- [66] Einflüsse des Bergwassers auf den Baubetrieb im Tunnelbau / A. Lang / Diplomarbeit / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / TU - Wien 1997
- [67] Einführung in die neue Richtlinie „Spritzbeton“ / Österreichischer Betonverein / H. Lauffer / Heft 35/1998
- [68] Einführung in die neue Richtlinie „Spritzbeton“ / Österreichischer Betonverein / R. Röck / Heft 35/1998
- [69] Einführung in die neue Richtlinie „Spritzbeton“ / Österreichischer Betonverein / W. Lukas / Heft 35/1998
- [70] Einführung in die neue Richtlinie „Spritzbeton“ / Österreichischer Betonverein / W. Kusterle / Heft 35/1998
- [71] Einsatzerfahrungen mit Spritzbeton mit alkalifreiem flüssigem Beschleuniger im Sicherheitsausbau / R. Oppikofer, O. Böckli / Zeitschrift Tunnel / 02/2001
- [72] Entscheidungskriterien für die Auswahl von Spritzbetonverfahren / D. Bady / Diplomarbeit / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / TU-Wien 2000
- [73] Entwicklung einer neuen Düsenbeschichtung beim Einsatz von abrasiven Gesteinskörnungstoffen bei Nassspritzbeton an der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main / M. Bauer / Geomechanik-Kolloquium 2000
- [74] Entwicklung und Einsatz einer neuartigen mobilen Anlage zur Herstellung und Auftragung von Trockenspritzbeton mit erdfeuchten Zuschlägen / K. Kassl / Spritzbetontechnologie 1999 / Tagungsband / Seite 283-289
- [75] Entwicklungen und Praxiserfahrungen mit einer neuen Verfahrenstechnik zur Herstellung und Verarbeitung von umweltfreundlichen Spritzbeton / W. Balbach, H. Emsberger / Spritzbetontechnologie 1996 / Tagungsband / Seite 43-47
- [76] Erfahrung mit neuen Spritzsystemen / W. Karpellus / Spritzbetontechnologie 1996 / Tagungsband / Seite 31-33
- [77] Erfahrungen mit alkalifreiem Erstarrungsbeschleuniger in Österreich / J. Gantner, G. Bracher, E. Galehr / Spritzbetontechnologie 1999 / Tagungsband / Seite 123–127

- [78] Erfahrungen mit alkalifreien, flüssigen Beschleunigern im Nassspritzverfahren auf der Baustelle Tunnel Dembach, NBS Köln-Rhein/Main / Spritzbetontechnologie 1999 / Tagungsband / Seite 115-121
- [79] Erfahrungen mit den eingesetzten Spritzbetonverfahren beim Bau der bergmännischen Eisenbahntunnel für die Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt / Zeitschrift Tiefbau / 11/1999
- [80] Erfahrungen mit der einschaligen Spritzbetonbauweise im Nassspritzverfahren am Vereinatunnel / B. Röthlisberger / Spritzbetontechnologie 1996 / Tagungsband / Seite 49-56
- [81] Erfahrungen mit neuen Spritzbindemitteln im Lainbergtunnel / J. Keil, R. Röck / Spritzbetontechnologie 1996 / Tagungsband / Seite 35 – 41
- [82] Flüssiger, alkalifreier Beschleuniger der neuesten Generation / M. Bauer / Zeitschrift Tunnel / 06/2000
- [83] Frischbeton am Einsatzort / D. Zimmerling / Spritzbetontechnologie 1993 / Tagungsband / Seite 195-197
- [84] Grundlagen für die Anwendung von Spritzbeton unter Druckluft / J. Schreyer / Tunnelbautaschenbuch 1990 / Seite 83–123
- [85] Handbuch für Spritzbeton / B. Maidl / Ernst & Sohn 1992
- [86] Handwörterbuch der Bauwirtschaft / W. Oberndorfer, H.G. Jodl et.al. / Österreichisches Normungsinstitut / 2001
- [87] Kosten und Dimensionierung der Baustelleneinrichtung / E. Langer / Diplomarbeit / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / TU-Wien / 1998
- [88] MAK – Wert Liste / Bundesministerium für Arbeit und Soziales / Februar 1993
- [89] Maschinentechnische Anforderungen an Spritzmaschinen im Dünnstromverfahren / J. Scherer / Spritzbetontechnologie 1987 / Tagungsband / Seite 59-66
- [90] Mechanisierter Auftrag von Spritzbeton / E. Galehr / SIKA Plastiment GmbH / November 1999
- [91] Möglichkeiten zur Reduktion des Rückpralls von Spritzbeton aus verfahrenstechnischer und betontechnologischer Sicht / U. Diecken / Dissertation / Institut für Konstruktiver Ingenieurbau / Ruhr-Universität Bochum / 1990
- [92] Nass-Spritzbeton mit Stahlfasern / Eignungsversuche am Hafnerbergtunnel / Baugeologie Chur / 2000
- [93] Nassspritzbeton-Technologie im Berg- und Tunnelbau / T. Krämer-Wasserka / Zeitschrift Felsbau / 04/1999
- [94] Neubaustrecke Köln-Rhein / Main: Zweischaliger Tunnelausbau / G. Brux / Zeitschrift-Tunnel / 02/2001
- [95] Neue Abbindebeschleuniger-Technologie für Spritzbetonapplikationen / R. Oppikofer, M. Sommer / Zeitschrift Tunnel / 02/2001
- [96] Neue Entwicklungen im Bereich Spritz-Bindemittel / T. Deuse / Spritzbetontechnologie 1999 / Tagungsband / Seite 187-193
- [97] Neue Forschungsergebnisse der ETH-Zürich / G. Brux / Zeitschrift Tiefbau / 10/1997
- [98] Neues Nassspritzbetonverfahren / R. Pohl, T. Deuse, B. Hillemeier / Beton (40) / Betonverlag Düsseldorf 1990
- [99] Neues Spritzbetonbindemittel für die Verarbeitung naturfeuchter Zuschläge im Trockenspritzverfahren / T. Deuse, K. Mann, F. Rüßmann / Zeitschrift Tunnel / 06/1998
- [100] New Austrian Torkret System / Prospekt / PORR AG, Perlmooser, pHs, SIKA / April 1997
- [101] Praktische Baustelleneinrichtung – Erfahrungen und Methoden auf Großbaustellen / E. Toussaint / Ernst & Sohn / 1983
- [102] Praxiserfahrungen Zammer Tunnel / J. Herdina / Spritzbetontechnologie 1996 / Tagungsband / Seite 21-26
- [103] Präziser Spritzbetonauftrag / Zeitschrift Tunnel / 07/1999
- [104] Problematik der Erzeugung von Spritzbeton unter ungünstigen Bedingungen und eine überraschende Erkenntnis / G. Strappler / Spritzbetontechnologie 1987 / Tagungsband / Seite 37-40

- [105] Richtlinie für die geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb / Österreichische Gesellschaft für Geomechanik / Oktober 2001
- [106] Richtlinie für Spritzbeton / Österreichischer Betonverein / 1998
- [107] Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau / Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen
- [108] Rückprall- und Staubminderung bei modifiziertem Trockenspritzverfahren / W. Lukas / Spritzbetontechnologie 1996 / Tagungsband / Seite 77-81
- [109] Shotcrete support for Thalwil's TBM tunnel enlargement / H. Hentschel / Zeitschrift Tunnel / 04/2001
- [110] Shotcreting works in the Önzberg Tunnel / Zeitschrift Tunnel / 04/2001
- [111] Skriptum „Einrichtung und Betrieb von Baustellen“ / H.G. Jodl, M. Hager / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / TU - Wien 2001
- [112] Spritzbeton – das Nassspritzverfahren unter Berücksichtigung von Qualität, Rückprall und Staub / R. Amberg / Spritzbetontechnologie 1993 / Seite 131-137
- [113] Spritzbeton – Stand der Technik und Ausblick aus österreichischer Sicht / H. Huber / Seite 37-46
- [114] Spritzbeton / G. Ruffert / Beton-Verlag / 1991
- [115] Spritzbeton / P. Teichert / E. Laich SA / 2001
- [116] Spritzbeton am Schulwaldtunnel / K. Brötz, P. Löschnig, F. Müller / Zeitschrift Tunnel / 06/2000
- [117] Spritzbeton auf der Neubaustrecke Köln – Rhein/Main / R. Sternath / Spritzbetontechnologie 1999 / Seite 11-21
- [118] Spritzbeton für den Pilotstollen des Semmering-Basistunnels / W. Hermann / PORR - Nachrichten Nr. 125 / 1997
- [119] Spritzbeton im Tunnelbau – Analyse der Verfahrensweisen, der Arbeitssicherheit, der Qualität und der Wirtschaftlichkeit / S. Matzenauer / Diplomarbeit / Technische Universität Bergakademie Freiberg 1998
- [120] Spritzbeton in kleinen Querschnitten / W. Hermann, M. Bitschnau / Spritzbetontechnologie 1999 / Tagungsband / Seite 43-46
- [121] Spritzbeton mit alkalifreier Erstarrungsbeschleunigung – umweltneutraler Spritzbeton / H. Huber, J. Gantner, W. Kusterle / Zeitschrift Zement und Beton / 1994 / Seite 19-21
- [122] Spritzbetonbauweisen mit Druckluft beim Münchner U-Bahn-Bau / A. Kruschke / STUVA-Tagung / Seite 17-24
- [123] Spritzbetonroboter – Entwicklung und Erfahrungen / G. Girmscheid, S. Moser / Geomechanik-Kolloquium 2000
- [124] Spritzbetontechnik – Gleichmäßiges Spritzbild / Zeitschrift Tunnel / 03/2000
- [125] Spritzbetontechnik bei den Vorarbeiten für den Gotthard-Basistunnel / D. Zaengerle / Zeitschrift Tunnel / 04/2001
- [126] Spritzbetonverfahren mit geringer Staubbentwicklung für die Tunnel der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main / Zeitschrift Tiefbau / 11/2000
- [127] Spritzbetonversorgung und –einbau als Dienstleistung / Zeitschrift Tunnel / 08/2000
- [128] Stahlfaserbeton / B. Maidl / Ernst & Sohn 1991
- [129] Stahlfaserspritzbeton – Verhalten bei Brand, Forschungsergebnisse und Ausführungsbeispiel / Zeitschrift Tiefbau / 10/1999
- [130] Stahlfaser-Spritzbeton im Tunnel Berg Bock / Zeitschrift Tunnel / 03/2001
- [131] Stahlfaserspritzbeton: Qualität und Sicherheit / M. Vandewalle / Spritzbetontechnologie 1993 / Tagungsband / Seite 157-162
- [132] Staub- und Rückprallreduktion beim Auftrag von Trockenspritzbeton / M. Testor, M. Pfeuffer / Spritzbetontechnologie 1999 / Tagungsband / Seite 137-149

- [133] Staubbekämpfung bei Spritzbetonarbeiten im Untertagebau – das Nassspritzverfahren als Alternative zum Trockenspritzverfahren mit chemischen Zusätzen zur Staubreduzierung / STUVA-Tagung / Heft 35 Forschung – Praxis / Seite 153-157
- [134] Staubreduzierung bei Spritzbetonarbeiten unter Tage – Ergebnisse neuer Forschungsarbeiten / Tiefbau-Berufsgenossenschaft / April 1995
- [135] Transportbeton Journal Nr. 4 / Februar 2001
- [136] Umweltverträglicher Spritzbeton am Zammer-Tunnel / E. Galehr, K. Hartleitner / Zeitschrift Tunnel / 07/1996
- [137] Untersuchungen über das Auslaugverhalten von Spritzbeton / A. Saxer, W. Kusterle, W. Lukas / Spritzbetontechnologie 1993 / Tagungsband / Seite 25-35
- [138] Untertagebau / Werkvertragsnorm Schweiz / SIA 1999 / Ausgabe 1993
- [139] Untertagebauarbeiten / Werkvertragsnorm / ÖNORM B 2203-1 / Stand: 01.12.2001
- [140] Ursachen und Gefahren von Staubentwicklung beim Trockenspritzen / H. Micke / Spritzbetontechnologie 1993 / Tagungsband / Seite 53-57
- [141] Verarbeitung von umweltfreundlichem Spritzbeton im Trockenspritzverfahren / M. Aschaber, W. Balbach, A. Rombold / Zeitschrift Tunnel 3/95
- [142] Verbesserungen der Vorbenetzungstechnik im Trockenspritzbetonverfahren / M. Pfeuffer, W. Kusterle / Zeitschrift Tunnel / 02/2000
- [143] Vergleichende Untersuchung von Spritzbeton mit Kies oder Splitt als Gesteinskörnung / R. Springenschmied, R. Schmiedmayer, G. Schöggler / Zeitschrift Tunnel / 02/1998
- [144] Wet sprayed concrete – Achievements and Further Work / W. Aldrian, T. Melbye, R. Dimmock / Zeitschrift Felsbau / Nr. 6/2000
- [145] Wirtschaftlichkeitsvergleich von verschiedenen Spritzbetonverfahren im Tunnelbau / A. Strubreiter / Diplomarbeit / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / Universität Innsbruck 1998

IX.1.4 Musterkalkulation

- [146] Handwörterbuch der Bauwirtschaft / W. Oberndorfer, H.G. Jodl, et. al. / Österreichisches Normungsinstitut 2001
- [147] Richtlinie Spritzbeton / Österreichischer Betonverein / Oktober 1998
- [148] Skriptum „Ausgewählte Bauverfahren“ / H.G. Jodl, G. Goger / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / TU - Wien 2001
- [149] Untertagebauarbeiten / Werkvertragsnorm / ÖNORM B 2203-1 / Stand: 01.12.2001
- [150] Wirtschaftlichkeitsvergleich von verschiedenen Spritzbetonverfahren im Tunnelbau / A. Strubreiter / Diplomarbeit / Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft / Universität Innsbruck 1998

IX.1.5 Bewertung der Einflussparameter

- [151] Bewertung von neuentwickelten Spritzbetonverfahrenstechniken / Straßenforschung – Heft 474 / BM für wirtschaftliche Angelegenheiten / 1998
- [152] Nutzwertanalyse in der Systemtechnik / C. Zangemeister / Verlag Wittmannsche Buchhandlung / 1973

IX.2 Abbildungen

Abbildung 1: Phasenmodell einer wissensbasierten Systementwicklung [15].....	18
Abbildung 2: Systemarchitektur eines Entscheidungshilfesystems [11].....	22
Abbildung 3: Klassifikation von Expertensystemen	23
Abbildung 4: Programmaufbau von REPCON [6].....	26
Abbildung 5: Vorgangsweise bei der Erarbeitung von Instandsetzungs- bzw. Reparaturvorschlägen [6].....	27
Abbildung 6: Programmaufbau von BINAS [2]	28
Abbildung 7: Schadensaufnahme über hypermediales Dialogfenster [2].....	29
Abbildung 8: Historische Übersicht über die Spritzbetonverfahren [20]	32
Abbildung 9: Erstes Modell der Cement Gun 1910 (linkes Bild - [25]) und Prinzipskizze einer Zweikammerspritzmaschine (rechtes Bild - [20]).....	33
Abbildung 10: Schneckenmaschine (linkes Bild) und Rotomaschine (rechtes Bild) - [30].....	33
Abbildung 11: Mörtelspritzmaschine – Bauart Moser-Kraftbau aus dem Jahr 1918 [25].....	34
Abbildung 12: Europakarte [27].....	35
Abbildung 13: Spritzbetonsilo Fa. Rombold [28] (links) – Prinzipskizze Spritzsystem [32] (rechts)	41
Abbildung 14: TM-Mobil am Tunnel Laimberg (Oberösterreich)	42
Abbildung 15: Flussdiagramm „Trockenspritzverfahren mit Trockenmischgut TM“	43
Abbildung 16: Prinzipskizze des Bauablaufs bei Verwendung von lagerfähigem Feuchtmischgut [25].....	44
Abbildung 17: Schnitt durch Rotorspritzmaschine (links) [20] – Spritzmaschine ALIVA 262 (rechts) [26].....	44
Abbildung 18: Trockenspritzverfahren mit FM-L und flüssigem EB [21].....	45
Abbildung 19: Trockenspritzverfahren mit FM-L und pulverförmigem EB [21]	45
Abbildung 20: Flussdiagramm „Trockenspritzverfahren mit Feuchtmischgut FM-L“	46
Abbildung 21: Prinzipskizze Verfahrenstechnik [32]	47
Abbildung 22: Mobile Mischanlage - Spritzbetonschlitzen „Mixomat“ [31]	47
Abbildung 23: Flussdiagramm „Trockenspritzverfahren mit Feuchtmischgut FM-S“	49
Abbildung 24: Prinzipskizze Nassspritzverfahren im Dichtstrom [18].....	50
Abbildung 25: Übersicht über die Fördertechniken beim Nassspritzverfahren	50
Abbildung 26: Kolbenpumpe zur Dichtstromförderung [20]	51
Abbildung 27: Flussdiagramm „Nassspritzverfahren im Dichtstrom“	52
Abbildung 28: Flussdiagramm „Nassspritzverfahren im Dünnstrom“	54
Abbildung 29: Übersicht über analysierte Spritzbetonsysteme	55
Abbildung 30: Verfahrens unabhängige und baubetriebliche Beurteilungskriterien	56
Abbildung 31: Übersicht über Beurteilungskriterien der Baustelleneinrichtung, der Betontechnologie und des Sicherheits- bzw. Gesundheitsschutzes	57
Abbildung 32: Frühfestigkeitsklassen des Jungen Spritzbetons [106]	61
Abbildung 33: Tunnelbautechnische Begriffe – Querschnitt [139]	63
Abbildung 34: Tunnelbautechnische Begriffe – Längenschnitt [139].....	64
Abbildung 35: Vergleich der ein- und zweischaligen Konstruktion [128].....	66
Abbildung 36: Abrechnungslinien, Ausbruch und Stützmittel – Darstellung vor der Verformung [139].....	71
Abbildung 37: Abrechnungslinien; Beton und Mehrbeton – Darstellung nach der Verformung [139]	73
Abbildung 38: Überblick über Ausbruchs- und Vortriebsarten im Tunnelbau	81
Abbildung 39: Beispiel für den Inselbetrieb des Kalottenvortriebes beim Tunnel Spital [61] - Teil 1.....	84
Abbildung 40: Beispiel für den Inselbetrieb des Kalottenvortriebes beim Tunnel Spital [61] – Teil 2.....	84
Abbildung 41: Prinzipskizze einer Dosierblenschnecke [43]	95
Abbildung 42: Spritzanlage – Zweibahniger Mobile Mischanlage – Tunnelbaustelle Spital/Semmering [72].....	101
Abbildung 43: Silowagen nach dem Befüllen – Tunnel Spital am Semmering [72]	101
Abbildung 44: Spritzmobil [Fotoarchiv Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft an der TU - Wien].....	102
Abbildung 45: Einflüsse auf das Rückprallverhalten nach Lindner [46].....	112
Abbildung 46: Regelbereiche der Rückprallfaktoren für die analysierten Spritzbetonsysteme	113
Abbildung 47: Abhängigkeit des Rückprallfaktors von der Mischguttemperatur [108].....	114
Abbildung 48: Einfluss der Eigenfeuchte der Zuschläge auf den Rückprallanteil beim System FMS [91]	115
Abbildung 49: Prinzipielle Möglichkeiten für die Wasserführung im Aufbau einer Hauptbenetzungsdüse im Trockenspritzverfahren [47].....	118
Abbildung 50: Prinzipskizze der Vorbenetzungstechnik beim Verfahren TM-F bzw. TM-E [142]	119
Abbildung 51: Einfluss der Benetzungsstrecke auf den Rückprall beim Trockenspritzverfahren [91].....	119
Abbildung 52: Schematischer Aufbau der Pfeuffer - Vorbenetzungsdüse [142].....	119
Abbildung 53: Vergleich von manueller und mechanisierter Düsenführung [85]	121
Abbildung 54: Schematischer Aufbau einer Nassspritzdüse [47].....	122
Abbildung 55: Anlagenkonzept einer Mischanlage [81]	136
Abbildung 56: Anlagenkonzept einer Trocknungsanlage [81].....	140
Abbildung 57: Charakteristische Kurve der Frühfestigkeitsentwicklung von Trockenspritzbeton mit ofentrockenem und erdfeuchtem Mischgut [52].....	151
Abbildung 58: Charakteristische Kurve der Frühfestigkeitsentwicklung von Nassspritzbeton mit alkalihaltiger (EB-AH) und alkalifreier (EB-AF) Erstarrungsbeschleunigung [52]	153
Abbildung 59: Druckfestigkeiten für unterschiedlich hergestellten Spritzbeton nach 1d bzw. 56d [52].....	154
Abbildung 60: Bereiche der minimalen und maximalen Feinstaubkonzentrationen, gemessen < 6 m vor der Ortsbrust beim Applizieren von Spritzbeton (MW = Mittelwert der Feinstaubkonzentration) [52].....	173
Abbildung 61: Beispiel für einen Abschlagszyklus in der Vortriebsklasse 8/9,24 [148]	177
Abbildung 62: Flussdiagramm – Aufbau der Musterkalkulation	182
Abbildung 63: Tabellenblatt „Bauzeitmittlung“	185
Abbildung 64: Tabellenblatt „Weitere Kalkulationsparameter“	186
Abbildung 65: Tabellenblatt „Mischgutrezeptur“ [Angaben in m ³ -fest].....	187
Abbildung 66: Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“	190
Abbildung 67: Tabellenblatt „Vortriebsgerät“	192
Abbildung 68: Tabellenblatt „Vortriebspersonal“	193
Abbildung 69: Tabellenblatt „Wirtschaftlichkeitsvergleich“	195

Abbildung 70: Schematische Darstellung des Ablaufes einer Nutzwertanalyse [152].....	196
Abbildung 71: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „großen“ Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 60 % laut Zielprogramm).....	214
Abbildung 72: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „großen“ Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 30 % laut Zielprogramm).....	215
Abbildung 73: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „großen“ Tunnelquerschnitt in nachbrüchigem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 60 % laut Zielprogramm).....	216
Abbildung 74: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „großen“ Tunnelquerschnitt in nachbrüchigem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 30 % laut Zielprogramm).....	216
Abbildung 75: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „kleinen“ Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 60 % laut Zielprogramm).....	217
Abbildung 76: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „kleinen“ Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 30 % laut Zielprogramm).....	218
Abbildung 77: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „kleinen“ Tunnelquerschnitt in nachbrüchigem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 60 % laut Zielprogramm).....	218
Abbildung 78: Rangordnung der Spritzbetonsysteme für einen „kleinen“ Tunnelquerschnitt in nachbrüchigem Gebirge (Beurteilungsaspekt Wirtschaftlichkeit 30 % laut Zielprogramm).....	219

IX.3 Tabellen

Tabelle 1: Hauptunterschiede zwischen konventioneller Programmierung und Expertensystem [6].....	16
Tabelle 2: Übersicht über die – nach der NÖT aufgefahrene - zweigleisigen Tunnel [35].....	36
Tabelle 3: Spritzverfahren im österreichischen Verkehrswegebau [22].....	37
Tabelle 4: Überblick über Spritzbetonverfahrenstechnik.....	40
Tabelle 5: Beispiele für Spritzbetonsorten [106].....	59
Tabelle 6: Beschreibung der Spritzbetonklassen SpB I bis SpB III.....	60
Tabelle 7: Frühfestigkeitsklasse - Einsatzgebiet.....	61
Tabelle 8: Spritzbeton-Festigkeitsklasse.....	62
Tabelle 9: Verfahrens unabhängiger Einfluss des Bergwasserzutrittes auf Rückprall und Lohnaufwand bei der Spritzbetonsicherung.....	75
Tabelle 10: Beispielhafte Durchrechnung des verfahrens unabhängigen Einflusses des Bergwasserzutrittes auf Rückprall und Lohnaufwand bei der Spritzbetonsicherung.....	76
Tabelle 11: Kriterien für die Auswahl einer geeigneten Ausbruchsart.....	82
Tabelle 12: Überblick über Vor- und Nachteile von Vollausrüchren (vgl. [47]).....	82
Tabelle 13: Überblick über Vor- und Nachteile von Teilausrüchren (vgl. [47]).....	83
Tabelle 14: Ziekerträge „Nachbearbeitung der Spritzbetonschale“.....	105
Tabelle 15: Ziekerträge „Restmengen an Mischgut“.....	110
Tabelle 16: Ziekertragsmatrix Baubetrieb – Teil 1.....	129
Tabelle 17: Ziekertragsmatrix Baubetrieb – Teil 2.....	130
Tabelle 18: Ziekertragsmatrix Baubetrieb – Teil 3.....	131
Tabelle 19: Ziekertragsmatrix Baustelleneinrichtung.....	147
Tabelle 20: Verarbeitungstemperatur für Trocken- und Feuchtmischgut [106].....	157
Tabelle 21: Ziekertragsmatrix - Betontechnologie.....	165
Tabelle 22: Spezifische Unfallgefahren bei Spritzbetonarbeiten (nach [85], [114]).....	166
Tabelle 23: Staubgrenzwerte nach MAK-Werte-Liste (nach [88]).....	172
Tabelle 24: Ziekertragsmatrix Arbeitssicherheit, Umwelt- und Gesundheitsschutz.....	176
Tabelle 25: Beispielhafte Ermittlung der Zeitdauern für einen Abschlag unter Berücksichtigung unterschiedlicher Spritzbetonverfahrenstechniken (Variante A und B).....	180
Tabelle 26: Zielprogramm der Beurteilungsaspekte.....	197
Tabelle 27: Zeilenweiser Auszug aus der baubetrieblichen Ziekertragsmatrix für den Rückprall.....	198
Tabelle 28: Zeilenweiser Auszug aus der baubetrieblichen Zielwertmatrix für den Rückprall.....	199
Tabelle 29: Punktezah und Rangordnung für ein Beurteilungskriterium.....	200
Tabelle 30: Rangordnung der einzelnen Beurteilungsaspekte.....	201
Tabelle 31: Ordinale Zielwertmatrix der Beurteilungsaspekte - Nutzwertbestimmung.....	201
Tabelle 32: Zielprogramm der Nutzwertanalyse.....	202
Tabelle 33: Zielwertmatrix Baubetrieb.....	204
Tabelle 34: Zielwertmatrix „Baustelleneinrichtung“.....	206
Tabelle 35: Zielwertmatrix „Betontechnologie“.....	208
Tabelle 36: Zielwertmatrix „Arbeitssicherheit und Datenerfassung“.....	208
Tabelle 37: Nutzwertermittlung.....	210
Tabelle 38: Zielprogramme der Parameterstudie.....	212

X Anhang

X.1 Allgemeines

Im Anhang werden die wesentlichen Eingangsparameter für die Sensibilitätsanalyse des Entscheidungshilfesystems zur Auswahl eines optimal geeigneten Spritzbetonverfahrens im Tunnel- und Stollenbau angegeben. Außerdem liegen die Tabellenkalkulationsprogramme „Musterkalkulation“ und „Zielwertmatrizen“ auf CD-Rom in digitaler Form bei. Für die folgenden vier Berechnungsszenarien werden dabei die Berechnungsunterlagen in tabellarischer Form dargestellt:

- „Großer“ Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge,
- „Großer“ Tunnelquerschnitt in nachbrüchigem Gebirge,
- „Kleiner“ Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge und
- „Kleiner“ Tunnelquerschnitt in nachbrüchigem Gebirge.

Dabei werden zunächst die folgenden Tabellenblätter des Tabellenkalkulationsprogramms „Musterkalkulation“ für eine repräsentative Vortriebsklasse und eine Tunnellänge von 500 m dargestellt:

- Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“
- Tabellenblatt „Weitere Kalkulationsparameter“
- Tabellenblatt „Mischgutrezeptur“
- Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“
- Tabellenblatt „Vortriebsgerät“
- Tabellenblatt „Vortriebspersonal“
- Tabellenblatt „Gesamtkosten“

Es ändern sich in der Parameterstudie nur die jeweiligen Vortriebslängen (500m, 1.000m, 2.000m, 3.000m, 4.000m, 5.000m) und die ermittelten Vortriebsdauern. Die gewählten Kostenansätze bleiben für alle vier Berechnungsszenarien gleich, die o.a. Tabellenblätter werden daher nur für einen (von insgesamt 48) Berechnungsfall angeführt. Nachdem das Tabellenkalkulationsprogramm „Musterkalkulation“ der Arbeit beiliegt sind die einzelnen Berechnungsschritte einfach nachvollziehbar.

Die Zielwertmatrizen, die der Nutzwertanalyse zu Grunde liegenden, werden mit den gewählten Gewichtungen der einzelnen Beurteilungsaspekte und Beurteilungskriterien ebenfalls angegeben. Mit dem beiliegenden Tabellenkalkulationsprogramm „Zielwertmatrizen“ können die einzelnen Berechnungsschritte ebenfalls einfach durchgeführt werden.

INHALTSVERZEICHNIS

X	Anhang.....	1
X.1	Allgemeines.....	1
X.2	Musterkalkulation.....	3
X.2.1	Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“.....	3
X.2.2	Tabellenblatt „Weitere Kalkulationsparameter“.....	7
X.2.3	Tabellenblatt „Mischgutrezeptur“.....	8
X.2.4	Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“.....	9
X.2.5	Vortriebsgeräte.....	11
X.2.6	Tabellenblatt „Vortriebspersonal“.....	13
X.2.7	Tabellenblatt „Wirtschaftlichkeit“.....	14
X.3	Nutzwertanalyse.....	15
X.3.1	Zielwertmatrix Baubetrieb.....	15
X.3.2	Zielwertmatrix „Baustelleneinrichtung“.....	19
X.3.3	Zielwertmatrix Betontechnologie.....	21
X.3.4	Zielwertmatrix „Arbeitssicherheit“.....	23
X.3.5	Nutzwertermittlung.....	24

X.2 Musterkalkulation

X.2.1 Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“

Zykluszeiten in der Kalotte - Zeitbedarf je Vortriebsklasse unabhängig vom gewählten Spritzbetonverfahren (s. Spalte 13)
 Zahleneingaben durch den Anwender dürfen nur in den weißen Feldern und dimensionslos (d.h. nur Wert, keine Einheit) erfolgen!!!

Nr.	VTKL	1 Abchlagslänge [m]	2 Bohrwagen einrichten [min]	3 Bohren Sprenglöcher [min]	4 Laden und Sprengen [min]	5 Lüften [min]	6 Schüttern, Ablauten [min]	7 Geologische Aufnahme [min]	8 Bögen [min]	9 Gitter [min]	10 Anker [min]	11 Spiesse [min]	12 Verzugsbleche [min]	13 (B13e12) Zeitbedarf je Abchlag [min]
1.	4/4,26	1,80	10	80	36	15	90	10	0	0	12	0	0	252
2.														0
3.														0
4.														0
5.														0
6.														0
7.														0
8.														0
9.														0
10.														0
11.														0
12.														0
13.														0
14.														0
15.														0
16.														0
17.														0
18.														0
19.														0
20.														0

Zykluszeiten in der Kalotte - Zeitbedarf je Vortriebsklasse unter Berücksichtigung der Spritzbetonsicherung (s. Spalte 25)
 Zahleneingaben durch den Anwender dürfen nur in den weißen Feldern und dimensionslos (d.h. nur Wert, keine Einheit) erfolgen!!!

Eingabe der unbedingt erforderlichen Spritzbetonförderleistung [m³-fest/h]: 8,00 m³-fest/h

7 Umrechnungsfaktor m³-fest/h auf m³-fest pro Stunde: 1 m³-fest = 1 m³-fest / (1-Rückprall [%])
 7 Diese Leistung muss von jedem Spritzbetonverfahren erbracht werden!!!

Nr.	VTKL	14 Ausbruchquerschnitt theoretisch A _{th} [m²]	15 Abwicklungslänge A _L [m]	16 VTKL-Länge l [m]	17 (r16:1) Anzahl der Abchläge je VTKL n _a [1]	18 Spritzbetondicke Leibung d _L [m]	19 Überprofil d _u [m]	20 Geologisch bedingter Mehrausbruch d _g [1]	21 Spritzbetondicke Ortbau d _o [m]	22 SpB-Kubatur theoretisch pro VTKL SpB _{th} [m³-fest]	23 SpB-Kubatur theoretisch pro Abchlag SpB _{th} [m³-fest]	24 Theoretischer Zeitbedarf Spritzbeton pro Abchlag [min]	25 (r24:13) Gesamte Zykluszeit pro Abchlag [min]	26 Abchläge pro Arbeitstag [1]	27 (r27:25) SpB-Kubatur theoretisch pro AT [m³/AT]	28 (r28:1) Vortriebsleistung [m/AT]	29 (r17:29) Gesamtspritzdauer je VTKL [AT]	30 (r19:27) Vortriebsdauer je VTKL [AT]
1.	4/4,26	56,60	18,80	500,00	278	0,10	0,05	1,02	0,00	1,438	5,18	39	291	4,95	25,64	8,91	7,49	56,10
2.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
3.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
4.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
5.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
6.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
7.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
8.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
9.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
10.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
11.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
12.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
13.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
14.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
15.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
16.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
17.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
18.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
19.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
20.		0			0					0	0,00	0	0			0,00	0,00	0,00
		Gesamtvortriebslänge [m]:			500,00	Spritzbetonkubatur [m³-fest]:			1,438,20	Dauer [AT]:			7,49	86,10				

Tabelle 1: Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“ für einen großen Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge

Zykluszeiten in der Kalotte - Zeitbedarf je Vortriebsklasse unabhängig vom gewählten Spritzbetonverfahren (s. Spalte 13)
 Zahleneingaben durch den Anwender dürfen nur in den weißen Feldern und dimensionslos (d.h. nur Wert, keine Einheit) erfolgen!!!

Nr.	VTKL	1 Abschlaglänge [m]	2 Bohrwagen einrichten [min]	3 Bohren Sprenglöcher [min]	4 Laden und Sprengen [min]	5 Lüften [min]	6 Schüttern, Ablauten [min]	7 Geologische Aufnahme [min]	8 Bögen [min]	9 Glitter [min]	10 Anker [min]	11 Spiesse [min]	12 Verzugs- bleche [min]	13 (B1 bis 12) Zeitbedarf je Abschlag [min]
1.	5/5,52	1,40	15	80	45	15	100	10	15	15	24	0	0	319
2.														0
3.														0
4.														0
5.														0
6.														0
7.														0
8.														0
9.														0
10.														0
11.														0
12.														0
13.														0
14.														0
15.														0
16.														0
17.														0
18.														0
19.														0
20.														0

Zykluszeiten in der Kalotte - Zeitbedarf je Vortriebsklasse unter Berücksichtigung der Spritzbetoneicherung (s. Spalte 25)
 Zahleneingaben durch den Anwender dürfen nur in den weißen Feldern und dimensionslos (d.h. nur Wert, keine Einheit) erfolgen!!!

Eingabe der unbedingt erforderlichen Spritzbetonförderleistung [m³-fest/h]: 8,00 m³-fest/h

? Umrechnungsfaktor m³-fest/h auf m³-loose pro Stunde: 1 m³-loose = 1 m³-fest / (1-Rückprall [%])
 ? Diese Leistung muss von jedem Spritzbetonverfahren erbracht werden!!!

Nr.	VTKL	14 Ausbruchs- querschnitt theoretisch A _{th} [m ²]	15 Abwicklungslänge A _{kl} [m]	16 VTKL-Länge l [m]	17 (=16:l) Anzahl der Abschläge je VTKL n _a [t]	18 Spritzbeton- dicke Laibung d _s [m]	19 Überprofil d _p [m]	20 Geologisch bedingter Mehrausbruch d _b [t]	21 Spritzbeton- dicke Ortsbrust d _{so} [m]	22 SpB-Kubatur theoretisch pro VTKL SpB _{th} [m ³ -fest]	23 SpB-Kubatur theoretisch pro Abschlag SpB _{th} [m ³ -fest]	24 Theoretischer Zeitbedarf Spritzbeton pro Abschlag [min]	25 (=24*n3) Gesamte Zykluszeit pro Abschlag [min]	26 Abschläge pro Arbeitstag [t]	27 (=23*26) SpB-Kubatur theoretisch pro AT [m ³ /AT]	28 (=28*1) Vortriebs- leistung [m/AT]	29 (=17*24) Gesamt- spritzdauer je VTKL [AT]	30 (=16:27) Vortriebs- dauer je VTKL [AT]	
1.	5/5,52	56,50	18,80	500,00	357	0,25	0,20	1,20	0,05	6,287	17,60	132	451	3,19	56,20	4,47	32,74	111,88	
2.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
17.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Gesamtvortriebslänge [m]:			500,00					Spritzbetonkubatur [m ³ -fest]:		6.288,71				Dauer [AT]:		32,74	111,88

Tabelle 2: Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“ für einen großen Tunnelquerschnitt in nachbruchigem Gebirge

Zykluszeiten in der Kalotte - Zeitbedarf je Vortriebsklasse unabhängig vom gewählten Spritzbetonverfahren (s. Spalte 13)
 Zahleneingaben durch den Anwender dürfen nur in den weißen Feldern und dimensionslos (d.h. nur Wert, keine Einheit) erfolgen!!!

Nr.	VTKL	1 Abschlagslänge [m]	2 Bohrwagen einrichten [min]	3 Bohren Sprenglöcher [min]	4 Laden und Sprengen [min]	5 Lüften [min]	6 Schüttern, Ablauten [min]	7 Geologische Aufnahme [min]	8 Bögen [min]	9 Gitter [min]	10 Anker [min]	11 Splesse [min]	12 Verzugsbleche [min]	13 (81b12) Zeitbedarf* je Abschlag [min]
1.	5/5,52	1,40	15	80	45	15	100	10	0	15	24	0	0	304
2.														0
3.														0
4.														0
5.														0
6.														0
7.														0
8.														0
9.														0
10.														0
11.														0
12.														0
13.														0
14.														0
15.														0
16.														0
17.														0
18.														0
19.														0
20.														0

Zykluszeiten in der Kalotte - Zeitbedarf je Vortriebsklasse unter Berücksichtigung der Spritzbetonsicherung (s. Spalte 25)
 Zahleneingaben durch den Anwender dürfen nur in den weißen Feldern und dimensionslos (d.h. nur Wert, keine Einheit) erfolgen!!!

Eingabe der unbedingt erforderlichen Spritzbetonförderleistung [m³-fest/h]: 8,00 m³-fest/h

? Umrechnungsfaktor m³-fest/h auf m³-loose pro Stunde: 1 m³-loose = 1 m³-fest / (1-Rückprall [%])
 ? Diese Leistung muss von jedem Spritzbetonverfahren erbracht werden!!!

Nr.	VTKL	14 Ausbruchquerschnitt theoretisch A _{aq} [m²]	15 Abwicklungslänge A _{all} [m]	16 VTKL-Länge l [lfm]	17 (=16:1) Anzahl der Abschläge je VTKL n _a [t]	18 Spritzbetondicke Laibung d _s [m]	19 Überprofil d _p [m]	20 Geologisch bedingter Mehrausbruch d _g [t]	21 Spritzbetondicke Ortsbrust d _{so} [m]	22 SpB-Kubatur theoretisch pro VTKL SpB _{th2} [m³-fest]	23 SpB-Kubatur theoretisch pro Abschlag SpB _{th2} [m³-fest]	24 Theoretischer Zeitbedarf Spritzbeton pro Abschlag [min]	25 (=24*13) Gesamte Zykluszeit pro Abschlag [min]	26 Abschläge pro Arbeitstag [t]	27 (=22*26) SpB-Kubatur theoretisch pro AT [m³/AT]	28 (=28*1) Vortriebsleistung [m/AT]	29 (=17*24) Gesamtspritzdauer je VTKL [AT]	30 (=16:27) Vortriebsdauer je VTKL [AT]
1.	5/5,52	19,20	11,00	500,00	357	0,15	0,10	1,10	0,00	1,513	4,24	32	338	4,29	18,16	6,00	7,88	83,27
2.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
3.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
4.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
5.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
6.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
7.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
8.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
9.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
10.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
11.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
12.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
13.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
14.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
15.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
16.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
17.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
18.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
19.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
20.					0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
		Gesamtvortriebslänge [m]:			500,00	Spritzbetonkubatur [m³-fest]:			1,512,50				Dauer [AT]:		7,88	83,27		

Tabelle 3: Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“ für einen kleinen Tunnelquerschnitt in standfestem Gebirge

Zykluszeiten in der Kalotte - Zeitbedarf je Vortriebsklasse unabhängig vom gewählten Spritzbetonverfahren (s. Spalte 13)
 Zahleneingaben durch den Anwender dürfen nur in den weißen Feldern und dimensionslos (d.h. nur Wert, keine Einheit) erfolgen!!!

Nr.	VTKL	1 Abschlagslänge [m]	2 Bohrwagen einrichten [min]	3 Bohren Sprenglöcher [min]	4 Laden und Sprengen [min]	5 Lüften [min]	6 Schüttern, Ablauten [min]	7 Geologische Aufnahme [min]	8 Bögen [min]	9 Gitter [min]	10 Anker [min]	11 Spiesse [min]	12 Verzugsbleche [min]	13 (Stblst) Zeitbedarf je Abschlag [min]	
1.		5/5,52	1,40	15	80	45	15	100	10	20	20	38	15	0	358
2.															0
3.															0
4.															0
5.															0
6.															0
7.															0
8.															0
9.															0
10.															0
11.															0
12.															0
13.															0
14.															0
15.															0
16.															0
17.															0
18.															0
19.															0
20.															0

Zykluszeiten in der Kalotte - Zeitbedarf je Vortriebsklasse unter Berücksichtigung der Spritzbetonsicherung (s. Spalte 25)
 Zahleneingaben durch den Anwender dürfen nur in den weißen Feldern und dimensionslos (d.h. nur Wert, keine Einheit) erfolgen!!!

Eingabe der unbedingt erforderlichen Spritzbetonförderleistung [m³-fest/h]: 8,00 m³-fest/h

? Umrechnungsfaktor m³-fest/h auf m³-fest pro Stunde: 1 m³-fest = 1 m³-fest / (1-Rückprall [%])
 ? Diese Leistung muss von jedem Spritzbetonverfahren erbracht werden!!!

Nr.	VTKL	14 Ausbruchquerschnitt theoretisch A _{th} [m²]	15 Abwicklungslänge A _{AL} [m]	16 VTKL-Länge l [m]	17 (=18:1) Anzahl der Abschläge je VTKL n _a [t]	18 Spritzbetondicke Laibung d _l [m]	19 Überprofil d _u [m]	20 Geologisch bedingter Mehrausbruch d _g [t]	21 Spritzbetondicke Ortsbrust d _o [m]	22 SpB-Kubatur theoretisch pro VTKL SpB _{th} [m³-fest]	23 SpB-Kubatur theoretisch pro Abschlag SpB _{th2} [m³-fest]	24 Theoretischer Zeitbedarf Spritzbeton pro Abschlag [min]	25 (=24*13) Gesamte Zykluszeit pro Abschlag [min]	26 Abschläge pro Arbeitstag [t]	27 (=23*26) SpB-Kubatur theoretisch pro AT [m³AT]	28 (=26*1) Vortriebsleistung [mAT]	29 (=17*24) Gesamtspritzdauer je VTKL [AT]	30 (=18*27) Vortriebsdauer je VTKL [AT]	
1.		5/5,52	19,20	11,00	500,00	357	0,25	0,20	1,20	0,06	3,381	9,47	71	427	3,37	31,93	4,72	17,81	105,91
2.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
3.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
4.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
5.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
6.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
7.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
8.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
9.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
10.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
11.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
12.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
13.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
14.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
15.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
16.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
17.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
18.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
19.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
20.		0				0					0	0,00	0	0				0,00	0,00
		Gesamtvortriebslänge [m]:			600,00				Spritzbetonkubatur [m³-fest]:			3,381,43				Dauer [AT]:		17,81	105,91

Tabelle 4: Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“ für einen kleinen Tunnelquerschnitt in nachbruchigem Gebirge

X.2.2 Tabellenblatt „Weitere Kalkulationsparameter“

Nr.	Kalkulationsparameter		
	Beschreibung	Wert	Quelle
1.	Gesamtvortriebslänge	500,00 m	Tab. "Bauzeitermittlung" (Spalte 16)
2.	Gesamtspritzbetonkubatur in der Kalotte	1.438,20 m ³ -fest	Tab. "Bauzeitermittlung" (Spalte 22)
3.	Maximaler Spritzbetonbedarf pro Abschlag	5,18 m ³ -fest	Tab. "Bauzeitermittlung" (Spalte 23)
4.	Anzahl "n" gleichzeitig aufgefahrener Kalottenvortriebe	1	Zahleneingabe erforderlich (Nicht "Null" eingeben!)
5.	Mittlerer Spritzbetonbedarf pro AT für "n=1" Vortriebe	25,64 m ³ -fest/AT	Tab. "Bauzeitermittlung" (Spalte 27)
6.	Maximaler Spritzbetonbedarf pro AT für "n=1" Vortriebe	25,64 m ³ -fest/AT	Tab. "Bauzeitermittlung" (Spalte 27)
7.	Max. Spritzbetonbedarf pro AT für "n" gleichzeitige Vortriebe (s. Zeile 4)	25,64 m ³ -fest/AT	Zelle 4 * Zelle 5
8.	Gesamtmenge Spritzbeton für Strosse, Sohle u.a. Vortriebsorte	550,00 m ³ -fest	Zahleneingabe erforderlich!
9.	Gesamtmenge Beton für die Ortbetoninnenschale	2.300,00 m ³ -fest	Zahleneingabe erforderlich!
10.	Gesamtbetonkubatur (Spritzbeton und Ortbetoninnenschale)	4.288,20 m ³ -fest	Zelle 2 + Zelle 7 + Zelle 8
11.	Erforderliche Dauer der Bevorratung von Mischgut bzw. Spritzbeton- ausgangsstoffen (z.B. keine Zulieferung wegen Wochenendfahrverbot möglich)	2,00 AT	Zahleneingabe erforderlich (Nicht "Null" eingeben!)
12.	Maximal erforderliche Vorratsmenge an Mischgut bzw. SpB-Ausgangsstoffen	51,27 m ³ -fest	Zelle 6 * Zelle 10
13.	Gesamtvortriebsdauer [AT] bei "n=1" Vortriebe	56,10 AT	Tab. "Bauzeitermittlung" (Spalte 29)
14.	Gesamtvortriebsdauer [AT] für "n" gleichzeitige Vortriebe (s. Zeile 4)	56,10 AT	Zelle 12 / Zelle 4
15.	Arbeitstage pro Monat	30,00 AT/Mo	Zahleneingabe erforderlich!
16.	Gesamtvortriebsdauer [Monate] für "n=1" Vortriebe	1,87 Mo	Zelle 12 / Zelle 14
17.	Gesamtvortriebsdauer [Monate] für "n" gleichzeitige Vortriebe (s. Zeile 4)	1,87 Mo	Zelle 13 / Zelle 14
18.	Zeitgebundene Baustellengemeinkosten [€/Mo]	200.000 €/Mo	Zahleneingabe erforderlich!
19.	Durchschnittliche Bergwasserzutritte über die Vortriebslänge: Wenn kein Bergwasserzutritt, dann den Wert 1,00 eingeben! Bergwasserzutritte 0 bis 5 l/s: Wert zwischen 1,00 und 1,17 eingeben! Bergwasserzutritte 5 bis 15 l/s: Wert zwischen 1,17 und 1,33 eingeben! Bergwasserzutritt 15 bis 30 l/s: Wert zwischen 1,33 und 1,67 eingeben! Bergwasserzutritte 30 bis 60 l/s: Wert zwischen 1,67 und 2,33 eingeben! Bergwasserzutritte über 60 l/s: Wert zwischen 2,33 und 3,33 eingeben!	1,00	Zahleneingabe erforderlich!

Tabelle 5: Tabellenblatt „Weitere Kalkulationsparameter“

Die Eingangsparameter für die Menge an Spritzbeton in der Strosse bzw. in der Ortbetoninnenschale sind an die Vortriebslängen jeweils anzupassen.

Es gelten folgende Ansätze:

- Großer Querschnitt / Strosse: 1,1 m³-fest / Laufmeter Großer Querschnitt / Beton: 4,6 m³-fest / Laufmeter
- Kleiner Querschnitt / Strosse: 1,1 m³-fest / Laufmeter Kleiner Querschnitt / Beton: 2,7 m³-fest / Laufmeter

X.2.3 Tabellenblatt „Mischgutrezeptur“

Spritzbetonausgangsstoffe	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)	
1. Bindemittel												
Bandbreite Bindemittelgehalt	300 - 400 kg/m³			300 - 400 kg/m³			330 - 450 kg/m³			270 - 350 kg/m³		
Gewählt:	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	380,00 kg/m³	380,00 kg/m³	350,00 kg/m³	350,00 kg/m³	350,00 kg/m³	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	
Einheitspreis Bindemittel	90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t	90,00 €/t	
Einheitspreis pro m³-SpB	30,60 €/m³	30,60 €/m³	30,60 €/m³	34,20 €/m³	34,20 €/m³	31,50 €/m³	31,50 €/m³	31,50 €/m³	30,60 €/m³	30,60 €/m³	30,60 €/m³	
2. Zuschlag												
Bandbreite Zuschlaggehalt	1.800 - 2000 kg/m³			1.800 - 2000 kg/m³			1.700 - 2000 kg/m³			1.700 - 2000 kg/m³		
Gewählt:	1.900,00 kg/m³	1.900,00 kg/m³	1.900,00 kg/m³	1.880,00 kg/m³	1.880,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	
Einheitspreis Zuschlag	30,00 €/t	30,00 €/t	20,00 €/t	30,00 €/t	20,00 €/t	30,00 €/t	30,00 €/t	20,00 €/t	30,00 €/t	20,00 €/t	20,00 €/t	
Einheitspreis pro m³-SpB	57,00 €/m³	57,00 €/m³	38,00 €/m³	56,40 €/m³	37,60 €/m³	53,10 €/m³	53,10 €/m³	35,40 €/m³	53,10 €/m³	35,40 €/m³	35,40 €/m³	
3. Wasser												
Wasser-Bindemittel-Wert	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50	0,50	
Wassergehalt	153,00 kg/m³	153,00 kg/m³	153,00 kg/m³	171,00 kg/m³	171,00 kg/m³	157,50 kg/m³	157,50 kg/m³	157,50 kg/m³	170,00 kg/m³	170,00 kg/m³	170,00 kg/m³	
Einheitspreis Wasser	0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t	0,50 €/t	
Einheitspreis pro m³-SpB	0,08 €/m³	0,08 €/m³	0,08 €/m³	0,09 €/m³	0,09 €/m³	0,08 €/m³	0,08 €/m³	0,08 €/m³	0,09 €/m³	0,09 €/m³	0,09 €/m³	
4. Zusatzstoffe												
Bandbreite Zusatzstoffgehalt	30 - 50 kg/m³			30 - 50 kg/m³			50 - 80 kg/m³			50 - 80 kg/m³		
Zusatzstoff 1 (z.B. Flugasche)	0,00 kg/m³			0,00 kg/m³			60,00 kg/m³			60,00 kg/m³		
Gewählt:	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	60,00 kg/m³	60,00 kg/m³	60,00 kg/m³	60,00 kg/m³	60,00 kg/m³	60,00 kg/m³	
Einheitspreis Zusatzstoff 1	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	58,00 €/t	58,00 €/t	58,00 €/t	58,00 €/t	58,00 €/t	58,00 €/t	
Einheitspreis (1) pro m³-SpB	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	3,48 €/m³	3,48 €/m³	3,48 €/m³	3,48 €/m³	3,48 €/m³	3,48 €/m³	
Zusatzstoff 2 (z.B. Bentonit)	0,00 kg/m³			0,00 kg/m³			0,00 kg/m³			0,00 kg/m³		
Gewählt:	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	
Einheitspreis Zusatzstoff 2	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	0,00 €/t	
Einheitspreis (2) pro m³-SpB	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	
Einheitspreis (1+2) pro m³-SpB	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	3,48 €/m³	3,48 €/m³	3,48 €/m³	3,48 €/m³	3,48 €/m³	3,48 €/m³	
5. Zusatzmittel												
Zusatzmittel 1 (z.B. EB-AF)	0,00 %			0,00 %			6,00 %			6,00 %		
Dosierung (%-Satz Bindemittel):	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	21,00 kg/m³	21,00 kg/m³	21,00 kg/m³	20,40 kg/m³	20,40 kg/m³	20,40 kg/m³	
Zusatzmittel 1	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	
Einheitspreis Zusatzmittel 1	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	16,80 €/m³	16,80 €/m³	16,80 €/m³	16,32 €/m³	16,32 €/m³	16,32 €/m³	
Einheitspreis (1) pro m³-SpB	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	16,80 €/m³	16,80 €/m³	16,80 €/m³	16,32 €/m³	16,32 €/m³	16,32 €/m³	
Zusatzmittel 2 (z.B. Fließmittel)	0,00 %			0,00 %			1,10 %			1,10 %		
Dosierung (%-Satz Bindemittel):	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	3,85 kg/m³	3,85 kg/m³	3,85 kg/m³	3,74 kg/m³	3,74 kg/m³	3,74 kg/m³	
Zusatzmittel 2	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,00 kg/m³	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	0,80 €/kg	
Einheitspreis Zusatzmittel 2	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	3,08 €/m³	3,08 €/m³	3,08 €/m³	2,99 €/m³	2,99 €/m³	2,99 €/m³	
Einheitspreis (2) pro m³-SpB	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	3,08 €/m³	3,08 €/m³	3,08 €/m³	2,99 €/m³	2,99 €/m³	2,99 €/m³	
Einheitspreis (1+2) pro m³-SpB	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	0,00 €/m³	19,88 €/m³	19,88 €/m³	19,88 €/m³	19,31 €/m³	19,31 €/m³	19,31 €/m³	
6. Mischgutkosten												
Mischgutkosten ohne Zusatzmittel**	85,00 €/m³	87,68 €/m³	68,68 €/m³	90,69 €/m³	71,89 €/m³	95,00 €/m³	88,16 €/m³	70,46 €/m³	95,00 €/m³	87,27 €/m³	69,57 €/m³	
Mischgutkosten mit Zusatzmittel	85,00 €/m³	87,68 €/m³	68,68 €/m³	90,69 €/m³	71,89 €/m³	114,88 €/m³	108,04 €/m³	90,34 €/m³	114,31 €/m³	106,58 €/m³	88,88 €/m³	

Tabelle 6: Tabellenblatt „Mischgutrezeptur“

X.2.4 Tabellenblatt „Baustelleneinrichtung“

Baustelleneinrichtung	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)	
1. Spritzbeton Kalotte												
Bandbreite für den Rückprallfaktor	25 bis 45 %			15 bis 30 %			5 bis 20 %			11 bis 15 %		
Gewählt: Rückprallfaktor	30,00 %	30,00 %	30,00 %	20,00 %	20,00 %	13,00 %	13,00 %	13,00 %	12,00 %	12,00 %	12,00 %	
Bergwasserandrang Faktor fbw	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Berücksichtigung des Rückpralls in der Kalotte: lose = 1 m³-fest/(1-(Rückprall [%]*fbw))	1,43	1,43	1,43	1,25	1,25	1,15	1,15	1,15	1,14	1,14	1,14	
Gesamtspritzbetonkubatur Kalotte												
Festkubikmeter SpB-Kalotte	28.760 m³											
Losekubikmeter SpB-Kalotte*	41.086 m³	41.086 m³	41.086 m³	35.951 m³	35.951 m³	33.058 m³	33.058 m³	33.058 m³	32.682 m³	32.682 m³	32.682 m³	
Maximal erforderliche Vorratsmenge an Mischgut- bzw. Spritzbetonausgangsstoffen	95 m³		95 m³	95 m³		95 m³	95 m³					
Spritzbeton - Kalotte [m³-lose]	136 m³	136 m³	136 m³	119 m³	119 m³		109 m³	109 m³		108 m³	108 m³	
* Losekubikmeter SpB ist eine wesentliche Bemessungsgrundlage für die Kosten der Baustelleneinrichtung												
2. Spritzbeton Strosse, Sohle u.a. Vortriebsorte												
Gesamtspritzbetonkubatur [m³-fest]	12.500 m³											
Abminderung des Rückprallfaktors in der Kalotte (kein Spritzbetonauftrag Überkopf)	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	70,00 %	
Berücksichtigung des Rückpralls in der Strosse	1,27	1,27	1,27	1,16	1,16	1,10	1,10	1,10	1,09	1,09	1,09	
Spritzbeton - Strosse, Sohle [m³-lose]	15.823 m³	15.823 m³	15.823 m³	14.535 m³	14.535 m³	13.751 m³	13.751 m³	13.751 m³	13.646 m³	13.646 m³	13.646 m³	
3. Ortbetoninnenschale												
Gesamtbetonmenge [m³-fest]	40.000 m³											
Verdichtungsmaß [m³-lose zu m³-fest]	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	
Ortbeton für Innenschale [m³-lose]	41.200 m³											
4. Gesamtmenge (Kalotte + Strosse + Ortbetoninnenschale)	98.109 m³	98.109 m³	98.109 m³	91.685 m³	91.685 m³	88.009 m³	88.009 m³	88.009 m³	87.529 m³	87.529 m³	87.529 m³	
5. Bindemittelagerung												
Bindemittelgehalt lt. Mischgutrezeptur	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	380,00 kg/m³	380,00 kg/m³	350,00 kg/m³	350,00 kg/m³	350,00 kg/m³	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	340,00 kg/m³	
Max. Materialbevorratung (SpB m³-lose)	136 m³	136 m³	136 m³	119 m³	119 m³		109 m³	109 m³		108 m³	108 m³	
Max. erford. Bindemittelbevorratung [t]	46 t	46 t	46 t	45 t	45 t		38 t	38 t		37 t	37 t	
Bindemittelsilo 150 t (ÖBGL 1301-0150)												
Erforderliche Anzahl "x" an 150 t - Bindemittelsilos	1,00 Stk		1,00 Stk	1,00 Stk		1,00 Stk	1,00 Stk					
AV und Reparaturentgelt pro Monat (für 1 Silo)	934 €/Mo		934 €/Mo	934 €/Mo		934 €/Mo	934 €/Mo					
AV und Reparaturentgelt pro Monat (für "x" Silo)	934 €/Mo		934 €/Mo	934 €/Mo		934 €/Mo	934 €/Mo					
AV und Rep. pro Monat und Tonne	6,23 €/Mo&t		6,23 €/Mo&t	6,23 €/Mo&t		6,23 €/Mo&t	6,23 €/Mo&t					
Monatliche Kosten für Bindemittelagerung	288 €/Mo	288 €/Mo	288 €/Mo	281 €/Mo	281 €/Mo		238 €/Mo	238 €/Mo		229 €/Mo	229 €/Mo	
Einmalige Kosten (Auf- und Abbau für 1 Silo)	0 €	3.000 €	3.000 €	3.000 €	3.000 €		3.000 €	3.000 €		3.000 €	3.000 €	
Einmalige Kosten (Auf- und Abbau für "x" Silos)	0 €	3.000 €	3.000 €	3.000 €	3.000 €		3.000 €	3.000 €		3.000 €	3.000 €	
Umlage einmalige Kosten auf m³-SpB-Kalotte	0,00 €/m³	0,07 €/m³	0,07 €/m³	0,08 €/m³	0,08 €/m³		0,09 €/m³	0,09 €/m³		0,09 €/m³	0,09 €/m³	

Tabelle 7: Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“ – Teil 1

Bauteileinrichtung	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
6. Gesteinskörnungslagerung											
Gesteinskörnung lt. Mischgutrezeptur	1.900,00 kg/m³	1.900,00 kg/m³	1.900,00 kg/m³	1.880,00 kg/m³	1.880,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³	1.770,00 kg/m³
Max. Materialbevorratung (SpB m³-lose)	138 m³	138 m³	138 m³	119 m³	119 m³	109 m³	109 m³	109 m³	108 m³	108 m³	108 m³
Max. erford. Zuschlagbevorratung [t]	258 t	258 t	258 t	223 t	223 t	193 t	193 t	193 t	191 t	191 t	191 t
Dichte des Zuschlages [t/m³]	1,60 t/m³	1,60 t/m³	1,60 t/m³	1,60 t/m³	1,60 t/m³	1,60 t/m³	1,60 t/m³				
Max. erford. Bevorratung [m³]	161 m³	161 m³	161 m³	140 m³	140 m³	121 m³	121 m³	121 m³	120 m³	120 m³	120 m³
Zuschlagsilo 200 m³ (ÖBGL 1310-0200)											
Erforderliche Anzahl "x" an 200 m³ - Zuschlagsilo	1,00 Stk	1,00 Stk	1,00 Stk	1,00 Stk	1,00 Stk	1,00 Stk	1,00 Stk				
AV und Reparaturentgelt pro Monat (für 1 Silo)	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo				
AV und Reparaturentgelt pro Monat (für "x" Silo)	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo	1.109 €/Mo				
AV und Rep. pro Monat und Tonne	5,55 €/Mo&t	5,55 €/Mo&t	5,55 €/Mo&t	5,55 €/Mo&t	5,55 €/Mo&t	5,55 €/Mo&t	5,55 €/Mo&t				
Monatliche Kosten für Gesteinskörnungslagerung	895 €/Mo	895 €/Mo	895 €/Mo	775 €/Mo	775 €/Mo	671 €/Mo	671 €/Mo	671 €/Mo	663 €/Mo	663 €/Mo	663 €/Mo
Einmalige Kosten (Auf- und Abbau für 1 Silo)	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €
Einmalige Kosten (Auf- und Abbau für "x" Silos)	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €
Umlage einmalige Kosten auf m³-SpB-Kalotte	0,09 €/m³	0,09 €/m³	0,09 €/m³	0,10 €/m³	0,10 €/m³	0,11 €/m³	0,11 €/m³	0,11 €/m³	0,11 €/m³	0,11 €/m³	0,11 €/m³
7. Gesteinskörnungstrocknung											
Gesteinskörnungsgehalt lt. Mischgutrezeptur	1,90 t/m³	1,90 t/m³	1,90 t/m³	1,88 t/m³	1,88 t/m³	1,77 t/m³	1,77 t/m³	1,77 t/m³	1,77 t/m³	1,77 t/m³	1,77 t/m³
Energieaufwand der Zuschlagstrocknung [kWh/t]		8,00 kWh/t	8,00 kWh/t		6,00 kWh/t						
Energiekosten [€/kWh]		0,20 €/kWh	0,20 €/kWh		0,20 €/kWh						
Energiekosten Zuschlagstrocknung [€/m³]		3,04 €/m³	3,04 €/m³		2,26 €/m³						
8. Baustelleneigene Gesteinskörnungsaufbereitung											
Erforderliche Gesamtbetonkubatur auf Wirtschaftlichkeitprüfungen!!!			Erfüllt		Erfüllt			Erfüllt			Erfüllt
Gesteinskörnungsgehalt lt. Mischgutrezeptur			1,90 t/m³		1,88 t/m³			1,77 t/m³			1,77 t/m³
Aufwand eigene Zuschlagsaufbereitung [kWh/t]			15,00 kWh/t		15,00 kWh/t			15,00 kWh/t			15,00 kWh/t
Betriebskosten [€/kWh]			0,20 €/kWh		0,20 €/kWh			0,20 €/kWh			0,20 €/kWh
Betriebskosten Zuschlagsaufbereitung [€/m³]			5,70 €/m³		5,84 €/m³			5,31 €/m³			5,31 €/m³
Einmalige Kosten (Auf- und Abbau der Anlage)			60.000 €		60.000 €			60.000 €			60.000 €
Umlage einmalige Kosten auf m³-Beton			0,61 €/m³		0,65 €/m³			0,68 €/m³			0,69 €/m³
9. Baustelleneigene Betonmischanlage											
Kompaktbetonmischanlage ÖBGL Nr. 1130-0500 Festbetonleistung 75 m³/h											
Erforderliche Gesamtbetonkubatur auf Wirtschaftlichkeitprüfungen!!!			Erfüllt	Erfüllt	Betonmischanlage zur SpB- Erzeugung nicht erforderlich!			Erfüllt	Erfüllt		Erfüllt
AV und Reparaturentgelt pro Monat (lt. ÖBGL)		8.712 €/Mo	8.712 €/Mo				8.712 €/Mo	8.712 €/Mo		8.712 €/Mo	8.712 €/Mo
Motorleistung		110,00 kW	110,00 kW				110,00 kW	110,00 kW		110,00 kW	110,00 kW
Energiekosten [€/kWh]		0,20 €/kWh	0,20 €/kWh				0,20 €/kWh	0,20 €/kWh		0,20 €/kWh	0,20 €/kWh
Energiekosten pro Monat		3.784 €/Mo	3.784 €/Mo				3.784 €/Mo	3.784 €/Mo		3.784 €/Mo	3.784 €/Mo
Mittellohn Maschinist		35 €/h	35 €/h				35 €/h	35 €/h		35 €/h	35 €/h
Monatliche Kosten für den Maschinisten		6.020 €/Mo	6.020 €/Mo				6.020 €/Mo	6.020 €/Mo		6.020 €/Mo	6.020 €/Mo
Monatliche Kosten für Betonmischanlage		18.516 €/Mo	18.516 €/Mo				18.516 €/Mo	18.516 €/Mo		18.516 €/Mo	18.516 €/Mo
Verhältnis SpB-Kubatur zu Gesamtbetonkubatur		58,01 %	58,01 %				53,19 %	53,19 %		52,93 %	52,93 %
Anteilige monatliche SpB-Kosten Mischanlage		10.740 €/Mo	10.740 €/Mo				9.848 €/Mo	9.848 €/Mo		9.800 €/Mo	9.800 €/Mo
Einmalige Kosten (Auf- und Abbau der Mischanlage)		120.000 €	120.000 €				120.000 €	120.000 €		120.000 €	120.000 €
Umlage einmalige Kosten auf m³-Beton		1,22 €/m³	1,22 €/m³				1,36 €/m³	1,36 €/m³		1,37 €/m³	1,37 €/m³

Tabelle 8: Tabellenblatt „Bauzeitermittlung“ – Teil 2

X.2.5 Vortriebsgeräte

Eingangsparameter	Wert	Quelle
Anzahl der Vortriebe (immer 1 - Kosten auf m³/h umgelegt!!!)	1	
Unbedingt erforderliche Spritzbetonförderleistung:	8,00 m³-fest/h	s. Tab. "Bauzeitemittlung"
Maximal erforderlicher Spritzbetonbedarf pro Abschlag:	5,18 m³-fest	s. Tab. "Weitere Kalkulationsparameter"
SpB-Bedarf pro Abschlag bei TM-F und TM-E (inkl. Rückprall!)	7,40 m³-lose	
SpB-Bedarf pro Abschlag bei FMS-F und FMS-E (inkl. Rückprall!)	6,47 m³-lose	
SpB-Bedarf pro Abschlag bei NSDI-F und NSDI-E (inkl. Rückprall!)	5,95 m³-lose	
SpB-Bedarf pro Abschlag bei NSDU-F und NSDU-E (inkl. Rückprall!)	5,88 m³-lose	
Mittlerer Spritzbetonbedarf pro Arbeitstag	25,64 m³-fest	s. Tab. "Weitere Kalkulationsparameter"
Zeitaufwand SpB-Sicherung pro AT (= mittlerer SpB-Bedarf / Leistung)	3,20 h/AT	
Zeitaufwand SpB-Sicherung pro Monat	96,13 h/Mo	
Einsatzfaktor (=Zeitaufwand SpB-Sicherung/Monat / 172 h/Mo)	0,56	
Abminderungsfaktoren für ÖBGL 1996:		
Abminderungsfaktor Abschreibung	0,50	
Abminderungsfaktor Verzinsung	0,70	
Betriebsmittel Diesel	0,65 €/l	
Mittlerer Dieselverbrauch	0,15 l/kWh	
Betriebsmittel Strom	0,22 €/kWh	

Trockenspritzverfahren mit ofentrockenem Mischgut (TM-F und TM-E)

Nr.	Anzahl	Gerätebezeichnung	ÖBGL-Nr.	AV/Gerät [€/Mo]	REP/Gerät [€/Mo]	Abgem. AV+REP [€/Mo]	Motorleistung [kW]	Einsatzfaktor [1]	Betriebsmittel [€/h]	Betriebsmittel [€/Mo]	Gerätekosten [€/Mo]
1.	1	Spritzbomber (2 x 10 m³)		4.600,00	5.500,00	6.150,00	160	0,56	8,72	1.499,68	7.649,68
2.	1	Schraubenkompressor	6113-0130	960,00	862,00	1.083,40	91	0,56	11,19	1.924,59	3.007,99
3.	1	Druckluftbehälter	6124-0030	48,00	26,00	42,20					42,20
4.	1	Bagger + Hebebühne	3145-0130	3.680,00	3.520,00	4.304,00	65	0,56	3,54	609,25	4.913,25
Gerätekosten pro Monat											15.613,12 €/Mo
Gerätekosten pro Stunde											90,77 €/h

Trockenspritzverfahren mit erdfeuchtem Mischgut (FMS-F und FMS-E)

Nr.	Anzahl	Gerätebezeichnung	ÖBGL-Nr.	AV/Gerät [€/Mo]	REP/Gerät [€/Mo]	Abgem. AV+REP [€/Mo]	Motorleistung [kW]	Einsatzfaktor [1]	Betriebsmittel [€/h]	Betriebsmittel [€/Mo]	Gerätekosten [€/Mo]
1.	1	Mixomat		6.100,00	4.100,00	5.920,00	50	0,56	6,15	1.057,47	6.977,47
2.	2	Trockenspritzmaschine		2.910,00	3.490,00	7.796,00	24	0,56	2,95	507,58	8.303,58
3.	2	Schraubenkompressor	6113-0130	960,00	862,00	2.166,80	182	0,56	22,38	3.849,18	6.015,98
4.	2	Druckluftbehälter	6124-0050	80,00	42,00	138,80					138,80
5.	1	Bagger + Hebebühne	3145-0130	3.680,00	3.520,00	4.304,00	65	0,56	3,54	609,25	4.913,25
6.	1	Radlader (Befüllung Mixomat)	3301-0155	5.180,00	4.960,00	6.062,00	160	0,28	4,36	749,84	6.811,84
7.	1	Zementsilowagen (Befüllung)	2926-0500	2.360,00	2.000,00	2.580,00	155	0,56	8,45	1.452,82	4.032,82
Gerätekosten pro Monat											37.193,73 €/Mo
Gerätekosten pro Stunde											216,24 €/h

Tabelle 9: Tabellenblatt „Vortriebgerät“ – Teil 1

Nassspritzverfahren im Dichtstrom - Fremdversorgung

Nr.	Anzahl	Gerätebezeichnung	ÖBGL-Nr.	AV/Gerät [€/Mo]	REP/Gerät [€/Mo]	Abgem. AV+REP [€/Mo]	Motorleistung [kW]	Einsatzfaktor [1]	Betriebsmittel [€/h]	Betriebsmittel [€/Mo]	Gerätekosten [€/Mo]
1.	1	Spritzbetonmanipulator		8.000,00	9.500,00	10.650,00	127	0,56	15,62	2.685,97	13.335,97
2.	1	Schraubenkompressor	6113-0130	960,00	862,00	1.083,40	91	0,56	11,19	1.924,59	3.007,99
3.	1	Druckluftbehälter	6124-0050	80,00	42,00	69,40					69,40
4.	1	TSPM zur BE-Dosierung	2550-0003	290,00	350,00	390,00	5	0,56	0,61	105,75	495,75
Gerätekosten pro Monat											16.909,10 €/Mo
Gerätekosten pro Stunde											98,31 €/h

Nassspritzverfahren im Dichtstrom - Eigenversorgung

Nr.	Anzahl	Gerätebezeichnung	ÖBGL-Nr.	AV/Gerät [€/Mo]	REP/Gerät [€/Mo]	Abgem. AV+REP [€/Mo]	Motorleistung [kW]	Einsatzfaktor [1]	Betriebsmittel [€/h]	Betriebsmittel [€/Mo]	Gerätekosten [€/Mo]
1.	1	Spritzbetonmanipulator		8.000,00	9.500,00	10.650,00	127	0,56	15,62	2.685,97	13.335,97
2.	1	Schraubenkompressor	6113-0130	960,00	862,00	1.083,40	91	0,56	11,19	1.924,59	3.007,99
3.	1	Druckluftbehälter	6124-0050	80,00	42,00	69,40					69,40
4.	1	TSPM zur BE-Dosierung	2550-0003	290,00	350,00	390,00	5	0,56	0,61	105,75	495,75
5.	1	Fahrmischer (6 m³ Inhalt)	2501-0060	2.650,00	2.210,00	2.848,63	159	0,56	8,65	1.487,48	4.336,10
6.	1	Betonzweischensilo	1312-0040	231,83	193,31	251,23					251,23
Gerätekosten pro Monat											21.245,21 €/Mo
Gerätekosten pro Stunde											123,52 €/h

Nassspritzverfahren im Dünnstrom - Fremdversorgung

Nr.	Anzahl	Gerätebezeichnung	ÖBGL-Nr.	AV/Gerät [€/Mo]	REP/Gerät [€/Mo]	Abgem. AV+REP [€/Mo]	Motorleistung [kW]	Einsatzfaktor [1]	Betriebsmittel [€/h]	Betriebsmittel [€/Mo]	Gerätekosten [€/Mo]
1.	1	Spritzbetonmanipulator		8.000,00	9.500,00	10.650,00	127	0,56	15,62	2.685,97	13.335,97
2.	1	Schraubenkompressor	6113-0130	960,00	862,00	1.083,40	91	0,56	11,19	1.924,59	3.007,99
3.	1	Druckluftbehälter	6124-0050	80,00	42,00	69,40					69,40
4.	1	TSPM zur BE-Dosierung	2550-0003	290,00	350,00	390,00	5	0,56	0,61	105,75	495,75
Gerätekosten pro Monat											16.909,10 €/Mo
Gerätekosten pro Stunde											98,31 €/h

Nassspritzverfahren im Dünnstrom - Eigenversorgung

Nr.	Anzahl	Gerätebezeichnung	ÖBGL-Nr.	AV/Gerät [€/Mo]	REP/Gerät [€/Mo]	Abgem. AV+REP [€/Mo]	Motorleistung [kW]	Einsatzfaktor [1]	Betriebsmittel [€/h]	Betriebsmittel [€/Mo]	Gerätekosten [€/Mo]
1.	1	Spritzbetonmanipulator		8.000,00	9.500,00	10.650,00	127	0,56	15,62	2.685,97	13.335,97
2.	1	Schraubenkompressor	6113-0130	960,00	862,00	1.083,40	91	0,56	11,19	1.924,59	3.007,99
3.	1	Druckluftbehälter	6124-0050	80,00	42,00	69,40					69,40
4.	1	TSPM zur BE-Dosierung	2550-0003	290,00	350,00	390,00	5	0,56	0,61	105,75	495,75
5.	1	Fahrmischer (6 m³ Inhalt)	2501-0060	2.650,00	2.210,00	2.816,26	157	0,56	8,55	1.470,57	4.286,83
6.	1	Betonzweischensilo	1312-0040	231,83	193,31	251,23					251,23
Gerätekosten pro Monat											21.447,16 €/Mo
Gerätekosten pro Stunde											124,69 €/h

Tabelle 10: Tabellenblatt „Vortriebsgeräte“ – Teil 2

X.2.6 Tabellenblatt „Vortriebspersonal“

Vortriebsdrittel - Mannschaftsstand	6 Mann
Mittellohnkosten	35,00 €/h

Tätigkeitsbeschreibung	Verfahren							
	TM-F	TM-E	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E	NSDU-F	NSDU-E
Spritzbetonbomber	1,0 Mann	1,0 Mann						
Maschinist Mixomat			1,0 Mann	1,0 Mann				
Radladerfahrer			0,5 Mann	0,5 Mann				
Maschinist Betonpumpe					1,0 Mann	1,0 Mann		
Maschinist Spritzmaschine							1,0 Mann	1,0 Mann
Fahrer Fahrmischer						1,0 Mann		1,0 Mann
Düsenführer	2,0 Mann	2,0 Mann	2,0 Mann	2,0 Mann	1,0 Mann	1,0 Mann	1,0 Mann	1,0 Mann
"Produktive Mineure"	3,0 Mann	3,0 Mann	3,5 Mann	3,5 Mann	2,0 Mann	3,0 Mann	2,0 Mann	3,0 Mann
"Produktiver SpB-Lohn"	105,00 €/h	105,00 €/h	122,50 €/h	122,50 €/h	70,00 €/h	104,72 €/h	70,00 €/h	104,32 €/h
"Unproduktive Mineure"	3,0 Mann	3,0 Mann	2,5 Mann	2,5 Mann	4,0 Mann	3,0 Mann	4,0 Mann	3,0 Mann
"Unproduktiver SpB-Lohn"	105,00 €/h	105,00 €/h	87,50 €/h	87,50 €/h	140,00 €/h	105,28 €/h	140,00 €/h	105,68 €/h

Tabelle 11: Tabellenblatt „Vortriebspersonal“

X.2.7 Tabellenblatt „Wirtschaftlichkeit“

Wirtschaftlichkeit - Übersicht Gesamtwerte	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMB-F	FMB-E	NBD-F	NBD-E (-)	NBD-E (+)	NBDU-F	NBDU-E (-)	NBDU-E (+)
1. Grundriss - Bereich / SpB-Lösung											
Sperrbereichsbreite Kabelle [m ² /h ²]	1.438 m ²	1.438 m ²	1.438 m ²	1.438 m ²	1.438 m ²	1.438 m ²	1.438 m ²	1.438 m ²	1.438 m ²	1.438 m ²	1.438 m ²
Rückpraxfaktor	30,00 %	30,00 %	30,00 %	30,00 %	30,00 %	30,00 %	30,00 %	30,00 %	30,00 %	30,00 %	30,00 %
Bezugsverhältnis Faktor (m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Berechnung des Rückprax in der Kabelle: loss = 1 m ² /h ² (1-Rückprax (%))	1,43	1,43	1,43	1,29	1,29	1,15	1,15	1,15	1,14	1,14	1,14
Sperrbereichsbreite Kabelle [m ² /h ²]	2.988 m ²	2.988 m ²	2.988 m ²	1.798 m ²	1.798 m ²	1.883 m ²	1.883 m ²	1.883 m ²	1.834 m ²	1.834 m ²	1.834 m ²
Theoretisch erforderliche Förderleistung [m ³ /h]	8,00 m ³ /h	8,00 m ³ /h	8,00 m ³ /h	8,00 m ³ /h	8,00 m ³ /h	8,00 m ³ /h	8,00 m ³ /h	8,00 m ³ /h	8,00 m ³ /h	8,00 m ³ /h	8,00 m ³ /h
Theoretische Gesamtvorleistung [AT]	56,10 AT	56,10 AT	56,10 AT	56,10 AT	56,10 AT	56,10 AT	56,10 AT	56,10 AT	56,10 AT	56,10 AT	56,10 AT
Theoretische Gesamtvorleistung [AT]	7,49 AT	7,49 AT	7,49 AT	7,49 AT	7,49 AT	7,49 AT	7,49 AT	7,49 AT	7,49 AT	7,49 AT	7,49 AT
Theoretische Förderleistung [m ³ /h]	179,73 m ³ /h	179,73 m ³ /h	179,73 m ³ /h	179,73 m ³ /h	179,73 m ³ /h	179,73 m ³ /h	179,73 m ³ /h	179,73 m ³ /h	179,73 m ³ /h	179,73 m ³ /h	179,73 m ³ /h
Theoretische Förderleistung [m ³ /h]	11,43 m ³ /h	11,43 m ³ /h	11,43 m ³ /h	10,29 m ³ /h	10,29 m ³ /h	8,29 m ³ /h	8,29 m ³ /h	8,29 m ³ /h	8,29 m ³ /h	8,29 m ³ /h	8,29 m ³ /h
Praktische Förderleistung											
Bandbreite [m ³ /h]	8 bis 8,0 m ³ /h und Döse			8 bis 8,0 m ³ /h und Döse		8 bis 28 m ³ /h und Döse			8 bis 28 m ³ /h und Döse		
Erforderliche Förderleistung	2,00 BSt			2,00 BSt		1,00 BSt			1,00 BSt		
Bandbreite [m ³ /h]	14,00 m ³ /h			14,00 m ³ /h		18,00 m ³ /h			18,00 m ³ /h		
Berechnung Verengungsstellenberechnungen											
Bandbreite III	Bandbreite 0,80 bis 1,00			Bandbreite 0,80 bis 1,00		Bandbreite 0,80 bis 1,00			Bandbreite 0,80 bis 1,00		
Querschnitt	0,95	0,90	0,90	0,95	0,95	0,90	0,95	0,95	0,90	0,95	0,95
Praktische Förderleistung [m ³ /h]	13,88 m ³ /h	13,88 m ³ /h	13,88 m ³ /h	13,88 m ³ /h	13,88 m ³ /h	18,29 m ³ /h	17,19 m ³ /h	17,19 m ³ /h	14,49 m ³ /h	13,39 m ³ /h	13,39 m ³ /h
Theoretische Gesamtvorleistung [AT]	154,48 AT	153,04 AT	153,04 AT	136,17 AT	136,17 AT	86,67 AT	86,67 AT	86,67 AT	119,49 AT	107,62 AT	107,62 AT
Theoretische Gesamtvorleistung [AT]	6,44 AT	6,79 AT	6,79 AT	6,83 AT	6,83 AT	4,29 AT	4,83 AT	4,83 AT	4,73 AT	4,48 AT	4,48 AT
Theoretische Gesamtvorleistung [AT]	59,08 AT	59,41 AT	59,41 AT	54,24 AT	54,24 AT	52,64 AT	52,64 AT	52,64 AT	53,24 AT	53,09 AT	53,09 AT
Theoretische Gesamtvorleistung [AT]	1,83 BSt	1,88 BSt	1,88 BSt	1,81 BSt	1,81 BSt	1,78 BSt	1,78 BSt	1,78 BSt	1,78 BSt	1,77 BSt	1,77 BSt
Verminderung / Erhöhung der zeitgebundenen Bandbreite durch Verengung / Vergrößerung der Gesamtvorleistung [AT]	-1,88 AT	-4,78 AT	-4,78 AT	-1,88 AT	-1,88 AT	-3,24 AT	-3,48 AT	-3,48 AT	-3,78 AT	-3,61 AT	-3,61 AT
2. Bauschichten	88,88 €/m ³	87,88 €/m ³	89,88 €/m ³	89,88 €/m ³	77,88 €/m ³	114,88 €/m ³	106,88 €/m ³	90,34 €/m ³	114,31 €/m ³	106,88 €/m ³	89,88 €/m ³
3. Bauteilberechnungswerte											
3.1. Bodenbelagsarbeiten											
Bodenbelagsarbeiten	155,00 €/m ²	156,00 €/m ²	155,00 €/m ²	151,84 €/m ²	151,84 €/m ²	128,43 €/m ²	128,43 €/m ²	128,43 €/m ²	128,43 €/m ²	128,43 €/m ²	128,43 €/m ²
Querschnitt über Vorleistung	295,81 €	295,81 €	295,81 €	274,18 €	274,18 €	225,81 €	225,81 €	225,81 €	225,81 €	225,81 €	225,81 €
Umsatz auf m ² -Sperrblech Kabelle	0,14 €/m ²	0,14 €/m ²	0,14 €/m ²	0,15 €/m ²	0,15 €/m ²	0,14 €/m ²	0,14 €/m ²	0,14 €/m ²	0,13 €/m ²	0,13 €/m ²	0,13 €/m ²
Umsatz der abgemessenen Kosten auf m ² -SpB	1,48 €/m ²	1,49 €/m ²	1,49 €/m ²	1,47 €/m ²	1,47 €/m ²	1,41 €/m ²	1,41 €/m ²	1,41 €/m ²	1,44 €/m ²	1,44 €/m ²	1,44 €/m ²
Kosten für Bodenbelagsarbeiten	1,60 €/m ²	1,60 €/m ²	1,60 €/m ²	1,63 €/m ²	1,63 €/m ²	1,58 €/m ²	1,58 €/m ²	1,58 €/m ²	1,57 €/m ²	1,57 €/m ²	1,57 €/m ²
3.2. Zuschlagarbeiten											
Zuschlagarbeiten	492,20 €/m ²	492,20 €/m ²	492,20 €/m ²	417,89 €/m ²	417,89 €/m ²	381,00 €/m ²	381,00 €/m ²	381,00 €/m ²	387,26 €/m ²	387,26 €/m ²	387,26 €/m ²
Querschnitt über Vorleistung	890,72 €	890,72 €	890,72 €	724,18 €	724,18 €	624,81 €	624,81 €	624,81 €	624,81 €	624,81 €	624,81 €
Umsatz auf m ² -Sperrblech Kabelle	0,43 €/m ²	0,43 €/m ²	0,43 €/m ²	0,42 €/m ²	0,42 €/m ²	0,38 €/m ²	0,38 €/m ²	0,38 €/m ²	0,39 €/m ²	0,39 €/m ²	0,39 €/m ²
Umsatz der abgemessenen Kosten auf m ² -SpB	1,70 €/m ²	1,70 €/m ²	1,70 €/m ²	1,69 €/m ²	1,69 €/m ²	1,62 €/m ²	1,62 €/m ²	1,62 €/m ²	1,64 €/m ²	1,64 €/m ²	1,64 €/m ²
Kosten für Zuschlagarbeiten	2,13 €/m ²	2,14 €/m ²	2,14 €/m ²	2,11 €/m ²	2,11 €/m ²	2,08 €/m ²	2,08 €/m ²	2,08 €/m ²	2,03 €/m ²	2,03 €/m ²	2,03 €/m ²
Kosten für Zuschlagarbeiten	3,94 €/m ²	3,94 €/m ²	3,94 €/m ²	3,80 €/m ²	3,80 €/m ²	3,66 €/m ²	3,66 €/m ²	3,66 €/m ²	3,61 €/m ²	3,61 €/m ²	3,61 €/m ²
Kosten für Zuschlagarbeiten	17,42 €/m ²			15,32 €/m ²				18,28 €/m ²			18,34 €/m ²
Anschlag mauerwerkliche Kosten für Betonmischerarbeiten	14,922 €	14,922 €	14,922 €	13,654 €	13,654 €	13,654 €	13,654 €	13,654 €	13,654 €	13,654 €	13,654 €
Querschnitt über Vorleistung	27,858 €	27,858 €	27,858 €	23,733 €	23,733 €	20,733 €	20,733 €	20,733 €	20,733 €	20,733 €	20,733 €
Umsatz auf m ² -Sperrblech Kabelle	15,41 €/m ²	15,41 €/m ²	15,41 €/m ²	15,39 €/m ²	15,39 €/m ²	15,39 €/m ²	15,39 €/m ²	15,39 €/m ²	15,39 €/m ²	15,39 €/m ²	15,39 €/m ²
Umsatz der abgemessenen Kosten auf m ² -SpB	23,44 €/m ²	23,44 €/m ²	23,44 €/m ²	23,44 €/m ²	23,44 €/m ²	23,44 €/m ²	23,44 €/m ²	23,44 €/m ²	23,44 €/m ²	23,44 €/m ²	23,44 €/m ²
Kosten für Betonmischerarbeiten	36,85 €/m ²	36,85 €/m ²	36,85 €/m ²	36,85 €/m ²	36,85 €/m ²	36,85 €/m ²	36,85 €/m ²	36,85 €/m ²	36,85 €/m ²	36,85 €/m ²	36,85 €/m ²
Kosten für Betonmischerarbeiten	3,73 €/m ²	4,03 €/m ²	4,18 €/m ²	4,18 €/m ²	4,18 €/m ²	4,18 €/m ²	4,18 €/m ²	4,18 €/m ²	4,18 €/m ²	4,18 €/m ²	4,18 €/m ²
4. Verbleibende Bauteile											
Monetäre Kosten Verbleibende	18.813,12 €/m ²	18.813,12 €/m ²	18.813,12 €/m ²	37.193,73 €/m ²	37.193,73 €/m ²	18.809,16 €/m ²	31.248,21 €/m ²	31.248,21 €/m ²	18.809,16 €/m ²	31.247,16 €/m ²	31.247,16 €/m ²
Querschnitt über Vorleistung	28.838,00 €	28.838,00 €	28.838,00 €	27.250,18 €	27.250,18 €	29.790,49 €	27.277,88 €	27.277,88 €	30.984,41 €	27.858,18 €	27.858,18 €
Kosten für Verbleibende	15,84 €/m ²	14,83 €/m ²	14,83 €/m ²	37,41 €/m ²	37,41 €/m ²	18,82 €/m ²	23,88 €/m ²	23,88 €/m ²	15,89 €/m ²	23,22 €/m ²	23,22 €/m ²
5. Personal											
Produktive, mündliche, Berichtsarbeiten	109,00 €/h	109,00 €/h	109,00 €/h	122,82 €/h	122,82 €/h	79,00 €/h	104,72 €/h	104,72 €/h	79,00 €/h	104,32 €/h	104,32 €/h
Produktive, schriftliche, Berichtsarbeiten	109,00 €/h	109,00 €/h	109,00 €/h	87,60 €/h	87,60 €/h	140,00 €/h	109,68 €/h	109,68 €/h	140,00 €/h	109,68 €/h	109,68 €/h
Kosten für Personal	19,77 €/m ²	19,77 €/m ²	19,77 €/m ²	16,17 €/m ²	16,17 €/m ²	12,94 €/m ²	12,94 €/m ²	12,94 €/m ²	14,88 €/m ²	12,94 €/m ²	12,94 €/m ²
6. Sonstige Kosten											
Verbleibende Bauteile	1,45 €/m ²	2,18 €/m ²	2,18 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	1,10 €/m ²	1,10 €/m ²	1,10 €/m ²	1,20 €/m ²	1,20 €/m ²	1,20 €/m ²
Förderleistung	30,00 m	30,00 m	30,00 m	30,00 m	30,00 m	30,00 m	30,00 m	30,00 m	30,00 m	30,00 m	30,00 m
Verbleibende Bauteile pro m ² -SpB und m ² -Lebung	0,15 €/m ² m	0,15 €/m ² m	0,15 €/m ² m	0,15 €/m ² m	0,15 €/m ² m	0,15 €/m ² m	0,15 €/m ² m	0,15 €/m ² m	0,15 €/m ² m	0,15 €/m ² m	0,15 €/m ² m
Verbleibende Bauteile	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²
Verbleibende Döse	2,81 €/m ²	2,81 €/m ²	2,81 €/m ²	2,81 €/m ²	2,81 €/m ²	1,45 €/m ²	1,45 €/m ²	1,45 €/m ²	1,45 €/m ²	1,45 €/m ²	1,45 €/m ²
Verbleibende Wasserbedarf	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,90 €/m ²	0,11 €/m ²	0,11 €/m ²	0,11 €/m ²	0,11 €/m ²	0,11 €/m ²	0,11 €/m ²
Verbleibende Wasserbedarf	0,22 €/m ²	0,22 €/m ²	0,22 €/m ²	0,22 €/m ²	0,22 €/m ²	0,22 €/m ²	0,22 €/m ²	0,22 €/m ²	0,22 €/m ²	0,22 €/m ²	0,22 €/m ²
Sonstige Kosten	0,28 €/m ²	0,21 €/m ²	0,28 €/m ²	0,28 €/m ²	0,28 €/m ²	0,28 €/m ²	0,28 €/m ²	0,28 €/m ²	0,28 €/m ²	0,28 €/m ²	0,28 €/m ²
7. Zeitgebundene Bauteilberechnungswerte											
Verminderung bzw. Erhöhung der Vorleistung	-1,88 AT	-4,78 AT	-4,78 AT	-1,88 AT	-1,88 AT	-3,24 AT	-3,48 AT	-3,48 AT	-3,78 AT	-3,61 AT	-3,61 AT
Monetäre zeitgebundene Bauteilberechnungswerte	290.800,00 €/m ²	290.800,00 €/m ²	290.800,00 €/m ²	290.800,00 €/m ²	290.800,00 €/m ²	290.800,00 €/m ²	290.800,00 €/m ²	290.800,00 €/m ²	290.800,00 €/m ²	290.800,00 €/m ²	290.800,00 €/m ²
Verminderung bzw. Erhöhung der zeitgebundenen Bauteilberechnungswerte	-7.228,81 €	-4.642,72 €	-4.642,72 €	-12.250,18 €	-12.250,18 €	-31.882,16 €	-23.883,87 €	-23.883,87 €	-18.111,38 €	-29.719,87 €	-29.719,87 €
Umsatz auf m ² -SpB / Änderung zeitgeb. Bauteilberechnungswerte	-3,23 €/m ²	-3,29 €/m ²									

X.3 Nutzwertanalyse

X.3.1 Zielwertmatrix Baubetrieb

Nr.	Beurteilungskriterien Baubetrieb	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1	Vortrieb in wechselfestem Gebirge	0,0	24	24	24	21	21	12	15	15	15	18	18
2	Vortrieb in standfestem Gebirge	6,0	15	15	15	18	18	24	24	24	21	21	21
3	Vortrieb in nachbrüchigem Gebirge	2,0	90	90	90	108	108	144	144	144	126	126	126
4	Vortrieb mit Teilquerschnitten	0,0	24	24	24	21	21	12	15	15	15	18	18
5	Vortrieb mit mehreren Angriffspunkten	0,0	48	48	48	42	42	24	30	30	30	36	36
6	Einsatz im Insealbetrieb	0,0	21	21	21	24	24	12	15	15	15	18	18
7	Einsatz im Ulmenstoffenvortrieb	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Vortrieb bei Bergwasserzutritten < 15 l/s	6,0	18	18	18	24	24	21	21	21	21	21	21
9	Vortrieb bei Bergwasserzutritten > 15 l/s	0,0	108	108	108	144	144	126	126	126	126	126	126
10	Einsatz bei Tunnelquerschnitten < 30 m²	0,0	24	24	24	21	21	12	12	12	15	15	15
11	Einsatz bei Tunnelquerschnitten > 30 m²	6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Guter Fahrbezugszustand im Tunnel	4,0	15	15	15	18	18	24	24	24	21	21	21
13	Hohe Flexibilität im Vortrieb	2,0	90	90	90	108	108	144	144	144	126	126	126
14	Geringe Förderleistungslänge SpB-Maschine zu Düse	2,0	12	12	12	24	24	6	9	9	6	9	9
15	Hohe erforderliche Förderleistung	6,0	48	48	48	96	96	24	36	36	24	36	36
16	Nachbehandlung der SpB-Oberfläche	4,0	21	21	21	24	24	9	12	12	12	15	15
17	Geringer Personalbedarf beim Spritzbetonauftrag	4,0	42	42	42	48	48	18	24	24	24	30	30
18	Geringer Reinigungsaufwand der Spritzgeräte	6,0	24	24	24	18	18	21	21	21	21	21	21
19	Keine Restmengenproblematik	2,0	48	48	48	36	36	42	42	42	42	42	42
20	Geringe Rückprallwerte	6,0	9	9	9	12	12	24	24	24	21	21	21
21	Geringe Störunganfälligkeit des Spritzsystems	6,0	54	54	54	72	72	144	144	144	126	126	126
22	Hohe Verfügbarkeit von SpB im Vortrieb	6,0	21	21	21	24	24	15	15	15	18	18	18
23	Verleiß	6,0	84	84	84	96	96	60	60	60	72	72	72
24	Gute Wintertauglichkeit	6,0	18	18	18	18	18	21	21	21	21	21	21
Gesamtpunktzahl Baubetrieb*			1.452	1.452	1.452	1.548	1.548	1.500	1.560	1.560	1.434	1.494	1.494
Rangordnung			8	8	8	3	3	6	1	1	11	6	6

Tabelle 13: Zielwertmatrix Baubetrieb – großer Querschnitt und standfestes Gebirge

Nr.	Beurteilungskriterien Baubetrieb	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1	Vortrieb in wechsellagertem Gebirge	6,0	24	144	144	21	126	12	90	90	15	108	108
2	Vortrieb in standfestem Gebirge	0,0	15	15	15	18	18	24	24	24	21	21	21
3	Vortrieb in nachbrüchigem Gebirge	6,0	24	144	144	21	126	12	90	90	15	108	108
4	Vortrieb mit Teilquerschnitten	6,0	21	126	126	24	144	12	90	90	15	108	108
5	Vortrieb mit mehreren Angriffspunkten	0,0	18	18	18	24	24	12	15	15	12	15	15
6	Einsatz im Inselebetrieb	0,0	0	0	0	24	24	0	0	0	0	0	0
7	Einsatz im Umlenstollenvortrieb	0,0	24	24	24	0	0	9	12	12	9	12	12
8	Vortrieb bei Bergwasserzutritten < 15 l/s	0,0	18	18	18	24	24	21	21	21	21	21	21
9	Vortrieb bei Bergwasserzutritten > 15 l/s	6,0	24	144	144	24	144	9	15	15	9	15	15
10	Einsatz bei Tunnelquerschnitten < 30 m²	0,0	24	24	24	21	21	12	12	12	15	15	15
11	Einsatz bei Tunnelquerschnitten > 30 m²	6,0	15	90	90	18	108	24	144	144	24	126	126
12	Guter Fahrbahnzustand im Tunnel	4,0	12	48	48	24	96	6	36	36	6	36	36
13	Hohe Flexibilität im Vortrieb	6,0	21	126	126	24	144	9	72	72	12	90	90
14	Geringe Förderleitungslänge SpB-Maschine zu Düse	2,0	24	48	48	18	36	21	42	42	21	42	42
15	Hohe erforderliche Förderleistung	2,0	9	18	18	12	24	24	48	48	24	42	42
16	Nachbehandlung der SpB-Oberfläche	4,0	21	84	84	21	96	24	60	60	15	72	72
17	Geringer Personalbedarf beim Spritzbetonauftrag	4,0	18	72	72	18	72	21	84	84	21	84	84
18	Geringer Reinigungsaufwand der Spritzgeräte	6,0	24	144	144	24	126	18	90	90	15	72	72
19	Keine Restmengenproblematik	6,0	24	144	144	24	126	12	72	72	12	72	72
20	Geringe Rückprallwerte	6,0	3	18	18	9	54	24	144	144	24	126	126
21	Geringe Störungsanfälligkeit des Spritzsystems	6,0	24	144	144	24	144	18	108	108	18	126	126
22	Hohe Verfügbarkeit von SpB im Vortrieb	6,0	24	144	144	24	144	18	108	108	18	126	126
23	Verschleiß	6,0	21	126	126	15	90	18	108	108	18	108	108
24	Gute Wintertauglichkeit	6,0	24	144	144	24	126	15	90	90	15	108	108
Gesamtpunkteanzahl Baubetrieb*			1.908	1.890	1.890	1.926	1.926	1.484	1.620	1.620	1.488	1.644	1.644
Rangordnung			3	4	4	1	1	11	8	8	10	6	6

Tabelle 14: Zielwertmatrix Baubetrieb – großer Querschnitt und nachbrüchiges Gebirge

Nr.	Beurteilungskriterien Baubetrieb	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSD-F	NSD-E (-)	NSD-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1	Vortrieb in wechselhaftem Gebirge	0,0	24	24	24	21	21	12	15	15	15	18	18
2	Vortrieb in standfestem Gebirge	6,0	15	15	15	18	18	24	24	24	24	21	21
3	Vortrieb in nachbrüchigem Gebirge	2,0	24	24	24	21	21	12	15	15	15	18	18
4	Vortrieb mit Teilquerschnitten	0,0	21	21	21	24	24	12	15	15	15	18	18
5	Vortrieb mit mehreren Angriffspunkten	0,0	18	18	18	24	24	12	15	15	12	15	15
6	Einsatz im Inselbetrieb	0,0	0	0	0	24	24	0	0	0	0	0	0
7	Einsatz im Ulmenstollenvortrieb	0,0	24	24	24	0	0	9	12	12	9	12	12
8	Vortrieb bei Bergwasserzutritten < 15 l/s	6,0	18	18	18	24	24	21	21	21	21	21	21
9	Vortrieb bei Bergwasserzutritten > 15 l/s	0,0	108	108	108	144	144	126	126	126	126	126	126
10	Einsatz bei Tunnelquerschnitten < 30 m²	6,0	24	21	21	24	24	9	15	15	9	15	15
11	Einsatz bei Tunnelquerschnitten > 30 m²	0,0	24	24	24	21	21	12	12	12	15	15	15
12	Guter Fahrbahnzustand im Tunnel	4,0	12	12	12	24	24	6	9	9	6	9	9
13	Hohe Flexibilität im Vortrieb	2,0	48	48	48	96	96	24	36	36	24	36	36
14	Geringe Förderleitungslänge SpB-Maschine zu Düse	2,0	21	21	21	24	24	9	12	12	12	15	15
15	Hohe erforderliche Förderleistung	2,0	42	42	42	48	48	18	24	24	24	30	30
16	Nachbehandlung der SpB-Oberfläche	4,0	24	24	24	18	18	21	21	21	21	21	21
17	Geringer Personalbedarf beim Spritzbetonauftrag	4,0	9	9	9	24	24	12	12	12	24	21	21
18	Geringer Reinigungsaufwand der Spritzgeräte	6,0	18	18	18	24	24	48	48	48	42	42	42
19	Keine Restmengenproblematik	2,0	21	21	21	24	24	15	15	15	18	18	18
20	Geringe Rückprallwerte	6,0	84	84	84	96	96	60	60	60	72	72	72
21	Geringe Störunganfälligkeit des Spritzsystems	6,0	18	18	18	18	18	21	21	21	21	21	21
22	Hohe Verfügbarkeit von SpB im Vortrieb	6,0	72	72	72	72	72	84	84	84	84	84	84
23	Verschleiß	6,0	24	24	24	21	21	18	15	15	15	12	12
24	Gute Wintertauglichkeit	6,0	48	48	48	42	42	24	24	24	24	24	24
			3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
			18	18	18	54	54	144	144	144	126	126	126
			24	24	24	21	21	12	12	12	12	12	12
			48	48	48	42	42	24	24	24	24	24	24
			144	144	144	144	144	108	126	126	108	126	126
			144	144	144	144	144	108	126	126	108	126	126
			24	24	24	24	24	18	21	21	18	21	21
			144	144	144	144	144	108	126	126	108	126	126
			21	21	21	15	15	18	18	18	18	18	18
			126	126	126	90	90	108	108	108	108	108	108
			24	24	24	21	21	15	18	18	15	18	18
			144	144	144	126	126	90	108	108	90	108	108
Gesamtpunkteanzahl Baubetrieb*			1.470	1.470	1.470	1.518	1.518	1.332	1.392	1.392	1.314	1.374	1.374
Rangordnung			3	3	3	1	1	10	6	6	11	8	8

Tabelle 15: Zielwertmatrix Baubetrieb – kleiner Querschnitt und standfestes Gebirge

Nr.	Beurteilungskriterien Baubetrieb	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1	Vortrieb in wechsellastigem Gebirge		24	24	24	21	21	12	15	15	15	18	18
		6,0	144	144	144	126	126	72	90	90	90	108	108
2	Vortrieb in standfestem Gebirge		15	15	15	18	18	24	24	24	21	21	21
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Vortrieb in nachbrüchigem Gebirge		24	24	24	21	21	12	15	15	15	18	18
		6,0	144	144	144	126	126	72	90	90	90	108	108
4	Vortrieb mit Teilquerschnitten		21	21	21	24	24	12	15	15	15	18	18
		6,0	126	126	126	144	144	72	90	90	90	108	108
5	Vortrieb mit mehreren Angriffspunkten		18	18	18	24	24	12	15	15	12	15	15
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Einsatz im Inseibetrieb		0	0	0	24	24	0	0	0	0	0	0
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Einsatz im Ulmenstollenvortrieb		24	24	24	0	0	9	12	12	9	12	12
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Vortrieb bei Bergwasserzutritten < 15 l/s		18	18	18	24	24	21	21	21	21	21	21
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Vortrieb bei Bergwasserzutritten > 15 l/s		24	21	21	24	24	9	15	15	9	15	15
		6,0	144	126	126	144	144	54	90	90	54	90	90
10	Einsatz bei Tunnelquerschnitten < 30 m²		24	24	24	21	21	12	12	12	15	15	15
		6,0	144	144	144	126	126	72	72	72	90	90	90
11	Einsatz bei Tunnelquerschnitten > 30 m²		15	15	15	18	18	24	24	24	21	21	21
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Guter Fahrbehrzustand im Tunnel		12	12	12	24	24	6	9	9	6	9	9
		4,0	48	48	48	96	96	24	36	36	24	36	36
13	Hohe Flexibilität im Vortrieb		21	21	21	24	24	9	12	12	12	15	15
		6,0	126	126	126	144	144	54	72	72	72	90	90
14	Geringe Förderleistungslänge SpB-Maschine zu Düse		24	24	24	18	18	21	21	21	21	21	21
		2,0	48	48	48	36	36	42	42	42	42	42	42
15	Hohe erforderliche Förderleistung		9	9	9	12	12	24	24	24	21	21	21
		2,0	18	18	18	24	24	48	48	48	42	42	42
16	Nachbehandlung der SpB-Oberfläche		21	21	21	24	24	15	15	15	18	18	18
		4,0	84	84	84	96	96	60	60	60	72	72	72
17	Geringer Personalbedarf beim Spritzbetonauftrag		18	18	18	18	18	21	21	21	21	21	21
		4,0	72	72	72	72	72	84	84	84	84	84	84
18	Geringer Reinigungsaufwand der Spritzgeräte		24	24	24	21	21	18	15	15	15	12	12
		6,0	144	144	144	126	126	108	90	90	90	72	72
19	Keine Restmengenproblematik		24	24	24	21	21	12	12	12	12	12	12
		6,0	144	144	144	126	126	72	72	72	72	72	72
20	Geringe Rückprallwerte		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		6,0	18	18	18	54	54	144	144	144	126	126	126
21	Geringe Störunganfälligkeit des Spritzsystems		24	24	24	24	24	18	21	21	18	21	21
		6,0	144	144	144	144	144	108	126	126	108	126	126
22	Hohe Verfügbarkeit von SpB im Vortrieb		24	24	24	24	24	18	21	21	18	21	21
		6,0	144	144	144	144	144	108	126	126	108	126	126
23	Verschleiß		21	21	21	15	15	18	18	18	18	18	18
		6,0	126	126	126	90	90	108	108	108	108	108	108
24	Gute Wintertauglichkeit		24	24	24	21	21	15	18	18	15	18	18
		6,0	144	144	144	126	126	90	108	108	90	108	108
Gesamtpunktzahl Baubetrieb*			1.982	1.944	1.944	1.944	1.944	1.392	1.648	1.648	1.452	1.608	1.608
Rangordnung			1	2	2	2	2	11	8	8	10	6	6

Tabelle 16: Zielwertmatrix Baubetrieb – kleiner Querschnitt und nachbrüchiges Gebirge

X.3.2 Zielwertmatrix „Baustelleneinrichtung“

Nr.	Beurteilungskriterien Baustelleneinrichtung	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
25	Projektstandort (Entfernung > 11 km vom Mischwerk)		21	24	24	24	24	18	24	24	18	24	24
		6,0	126	144	144	144	144	108	144	144	108	144	144
26	Geringe Anforderungen SpB-Ausgangsstofflagerung		24	15	15	21	21	24	15	18	24	15	18
		6,0	144	90	90	126	126	144	90	108	144	90	108
27	Geringe Anforderungen Mischgutlagerung		15	15	15	24	24	24	21	21	24	21	21
		6,0	90	90	90	144	144	144	126	126	144	126	126
28	Hohe Mischgutlagerungsdauer		24	24	24	21	21	9	15	15	9	15	15
		4,0	96	96	96	84	84	36	60	60	36	60	60
29	Geringe Anforderungen an die Bewetterung		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		4,0	12	12	12	36	36	96	96	96	84	84	84
30	Geringer Druckluftbedarf für SpB-Geräte		9	9	9	12	12	21	21	21	24	24	24
		6,0	54	54	54	72	72	126	126	126	144	144	144
31	Geringer Energiebedarf der SpB-Geräte		9	9	9	12	12	15	15	15	18	18	18
		6,0	54	54	54	72	72	90	90	90	108	108	108
32	Geringe Probleme bei Mischguttransport (-umschlag)		9	9	9	21	21	18	15	15	18	15	15
		6,0	54	54	54	126	126	108	90	90	108	90	90
33	Geringer Platzbedarf für Baustelleneinrichtung		21	15	18	24	21	24	15	12	24	15	12
		6,0	126	90	108	144	126	144	90	72	144	90	72
34	Geringer Platzbedarf im Tunnel		24	24	24	18	18	12	12	12	15	15	15
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtpunkteanzahl Baustelleneinrichtung			756	684	702	948	930	996	912	912	1.020	936	936
Rangordnung			9	11	10	3	6	2	7	7	1	4	4

Tabelle 17: Zielwertmatrix „Baustelleneinrichtung“ – große Querschnitte

Nr.	Beurteilungskriterien Baustelleneinrichtung	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
25	Projektstandort (Entfernung > 11 km vom Mischwerk)		21	24	24	24	24	18	24	24	18	24	24
		6,0	126	144	144	144	144	108	144	144	108	144	144
26	Geringe Anforderungen SpB-Ausgangsstofflagerung		24	15	15	21	21	24	15	18	24	15	18
		6,0	144	90	90	126	126	144	90	108	144	90	108
27	Geringe Anforderungen Mischgutlagerung		15	15	15	24	24	24	21	21	24	21	21
		6,0	90	90	90	144	144	144	126	126	144	126	126
28	Hohe Mischgutlagerungsdauer		24	24	24	21	21	9	15	15	9	15	15
		4,0	96	96	96	84	84	36	60	60	36	60	60
29	Geringe Anforderungen an die Bewetterung		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		4,0	12	12	12	36	36	96	96	96	84	84	84
30	Geringer Druckluftbedarf für SpB-Geräte		9	9	9	12	12	21	21	21	24	24	24
		6,0	54	54	54	72	72	126	126	126	144	144	144
31	Geringer Energiebedarf der SpB-Geräte		9	9	9	12	12	15	15	15	18	18	18
		6,0	54	54	54	72	72	90	90	90	108	108	108
32	Geringe Probleme bei Mischguttransport (-umschlag)		9	9	9	21	21	18	15	15	18	15	15
		6,0	54	54	54	126	126	108	90	90	108	90	90
33	Geringer Platzbedarf für Baustelleneinrichtung		21	15	18	24	21	24	15	12	24	15	12
		6,0	126	90	108	144	126	144	90	72	144	90	72
34	Geringer Platzbedarf im Tunnel		24	24	24	18	18	12	12	12	15	15	15
		4,0	96	96	96	72	72	48	48	48	60	60	60
Gesamtpunkteanzahl Baustelleneinrichtung			852	780	798	1.020	1.002	1.044	960	960	1.080	996	996
Rangordnung			9	11	10	3	4	2	7	7	1	5	5

Tabelle 18: Zielwertmatrix „Baustelleneinrichtung“ – kleine Querschnitte

X.3.3 Zielwertmatrix Betontechnologie

Nr.	Beurteilungskriterien Betontechnologie	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
35	Höchste Anforderungen an die Endfestigkeit		18	18	18	21	21	24	24	24	24	24	24
		4,0	72	72	72	84	84	96	96	96	96	96	96
36	Hohe erforderliche Frühfestigkeit		24	24	24	21	21	15	15	15	15	15	15
		2,0	48	48	48	42	42	30	30	30	30	30	30
37	Anpassung Mischgutrezeptur an Vortriebsbedingungen		3	3	3	24	24	15	18	18	15	18	18
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	Geringe Anforderungen an Verarbeitungstemperatur		24	24	24	21	21	18	18	18	18	18	18
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	Zeitliche Beschränkungen bei Mischgutverarbeitung		24	24	24	21	21	6	9	9	6	9	9
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	Keine Beeinflussbarkeit des W/B- Wertes vor Ort		6	6	6	9	9	24	24	24	24	24	24
		6,0	36	36	36	54	54	144	144	144	144	144	144
41	Geringe Zugabe von Zusatzmitteln		24	24	24	24	24	18	18	18	18	18	18
		2,0	48	48	48	48	48	36	36	36	36	36	36
42	Geringe Zugabe von Zusatzstoffen		24	24	24	24	24	18	18	18	18	18	18
		2,0	48	48	48	48	48	36	36	36	36	36	36
Gesamtpunkteanzahl Baustelleneinrichtung			252	252	252	276	276	342	342	342	342	342	342
Rangordnung			9	9	9	7	7	1	1	1	1	1	1

Tabelle 19: Zielwertmatrix „Betontechnologie“ – standfestes Gebirge

Nr.	Beurteilungskriterien Betontechnologie	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
35	Höchste Anforderungen an die Endfestigkeit		18	18	18	21	21	24	24	24	24	24	24
		6,0	108	108	108	126	126	144	144	144	144	144	144
36	Hohe erforderliche Frühfestigkeit		24	24	24	21	21	15	15	15	15	15	15
		6,0	144	144	144	126	126	90	90	90	90	90	90
37	Anpassung Mischgutrezeptur an Vortriebsbedingungen		3	3	3	24	24	15	18	18	15	18	18
		6,0	18	18	18	144	144	90	108	108	90	108	108
38	Geringe Anforderungen an Verarbeitungstemperatur		24	24	24	21	21	18	18	18	18	18	18
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	Zeitliche Beschränkungen bei Mischgutverarbeitung		24	24	24	21	21	6	9	9	6	9	9
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	Keine Beeinflussbarkeit des W/B Wertes vor Ort		6	6	6	9	9	24	24	24	24	24	24
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	Geringe Zugabe von Zusatzmitteln		24	24	24	24	24	18	18	18	18	18	18
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	Geringe Zugabe von Zusatzstoffen		24	24	24	24	24	18	18	18	18	18	18
		0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamtpunkteanzahl Baustelleneinrichtung			270	270	270	396	396	324	342	342	324	342	342
Rangordnung			9	9	9	1	1	7	3	3	7	3	3

Tabelle 20: Zielwertmatrix „Betontechnologie“ – nachbrüchiges Gebirge

X.3.4 Zielwertmatrix „Arbeitssicherheit“

Nr.	Beurteilungskriterien Arbeitssicherheit	Gewichtung durch den Anwender	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
43	Gute Arbeitsplatzbedingungen im Tunnel		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		6,0	18	18	18	54	54	144	144	144	126	126	126
44	Düsenführer direkt an der Düse		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		6,0	18	18	18	54	54	144	144	144	126	126	126
45	Geringe Elution des Spritzbetons		24	21	21	21	21	24	21	21	24	21	21
		2,0	48	42	42	42	42	48	42	42	48	42	42
46	Hohe Frühfestigkeiten zur Erhöhung Arbeitssicherheit		15	15	15	18	18	24	24	24	24	21	21
		4,0	60	60	60	72	72	96	96	96	96	84	84
47	Gute Datenerfassung beim Spritzbetonauftrag		18	18	18	15	15	24	24	24	24	24	24
		4,0	72	72	72	60	60	96	96	96	96	96	96
48	Genereller Einsatz von Manipulatoren erforderlich		3	3	3	9	9	24	24	24	21	21	21
		6,0	18	18	18	54	54	144	144	144	126	126	126
49	Geringe Staubbelastung an der Spritzmaschine		18	18	18	12	12	24	24	24	21	21	21
		6,0	108	108	108	72	72	144	144	144	126	126	126
Gesamtpunkteanzahl Baustelleneinrichtung			234	228	228	336	336	672	666	666	618	600	600
Rangordnung			9	10	10	7	7	1	2	2	4	5	5

Tabelle 21: Zielwertmatrix „Arbeitssicherheit“

X.3.5 Nutzwertermittlung

Ermittlung des Nutzwertes		Gewichtung s. Zielprogramm	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1.	Baubetrieb	15											
	Punktezah		1.452	1.452	1.452	1.548	1.548	1.500	1.560	1.560	1.434	1.494	1.494
	Rangordnung		8	8	8	3	3	5	1	1	11	6	6
2.	Baustelleneinrichtung	10											
	Punktezah		756	684	702	948	930	996	912	912	1.020	936	936
	Rangordnung		9	11	10	3	6	2	7	7	1	4	4
3.	Betontechnologie	10											
	Punktezah		300	264	258	294	294	390	378	372	390	378	372
	Rangordnung		7	10	11	8	8	1	3	5	1	3	5
4.	Arbeitssicherheit - Gesundheitsschutz	5											
	Punktezah		246	228	228	336	336	672	654	654	618	600	600
	Rangordnung		9	10	10	7	7	1	2	2	4	5	5
5.	Wirtschaftlichkeit	60											
	Punktezah		255.029	348.357	345.109	297.175	300.216	231.736	299.303	300.257	234.534	300.679	301.730
	Rangordnung		3	11	10	4	6	1	5	7	2	8	9
6.	Nutzwert		505	1040	980	430	580	170	425	565	325	665	745
	Rangordnung		5	11	10	4	7	1	3	6	2	8	9

Tabelle 22: Nutzwertermittlung für großen Tunnelquerschnitt und standfestes Gebirge bei einer Vortriebslänge von 500 m

Ermittlung des Nutzwertes		Gewichtung s. Zielprogramm	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1.	Baubetrieb	15											
	Punktezah		1.908	1.890	1.890	1.926	1.926	1.464	1.620	1.620	1.488	1.644	1.644
	Rangordnung		3	4	4	1	1	11	8	8	10	6	6
2.	Baustelleneinrichtung	10											
	Punktezah		756	684	702	948	930	996	912	912	1.020	936	936
	Rangordnung		9	11	10	3	6	2	7	7	1	4	4
3.	Betontechnologie	10											
	Punktezah		318	282	276	414	414	372	378	372	372	378	372
	Rangordnung		9	10	11	1	1	5	3	5	5	3	5
4.	Arbeitssicherheit - Gesundheitsschutz	5											
	Punktezah		246	228	228	336	336	672	654	654	618	600	600
	Rangordnung		9	10	10	7	7	1	2	2	4	5	5
5.	Wirtschaftlichkeit	60											
	Punktezah		1.093.395	1.341.836	1.267.120	1.145.485	1.104.067	956.113	1.125.188	1.078.162	968.734	1.133.017	1.086.886
	Rangordnung		5	11	10	9	6	1	7	3	2	8	4
6.	Nutzwert		570	980	920	630	480	300	650	430	350	665	445
	Rangordnung		6	11	10	7	5	1	8	3	2	9	4

Tabelle 23: Nutzwertermittlung für großen Tunnelquerschnitt und nachbrüchiges Gebirge bei einer Vortriebslänge von 500 m

Ermittlung des Nutzwertes		Gewichtung s. Zielprogramm	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1.	Baubetrieb	15											
	Punktezahl		1.470	1.470	1.470	1.518	1.518	1.332	1.392	1.392	1.314	1.374	1.374
	Rangordnung		3	3	3	1	1	10	6	6	11	8	8
2.	Baustelleneinrichtung	10											
	Punktezahl		758	684	702	948	930	996	912	912	1.020	936	936
	Rangordnung		9	11	10	3	6	2	7	7	1	4	4
3.	Betontechnologie	10											
	Punktezahl		300	264	258	294	294	390	378	372	390	378	372
	Rangordnung		7	10	11	8	8	1	3	5	1	3	5
4.	Arbeitsicherheit - Gesundheitsschutz	5											
	Punktezahl		246	228	228	336	336	672	654	654	618	600	600
	Rangordnung		9	10	10	7	7	1	2	2	4	5	5
5.	Wirtschaftlichkeit	60											
	Punktezahl		277.289	408.239	410.024	335.798	344.328	253.730	356.994	363.389	256.649	358.625	365.129
	Rangordnung		3	10	11	4	5	1	6	8	2	7	9
6.	Nutzwert		430	905	965	400	490	245	560	700	325	635	775
	Rangordnung		4	10	11	3	5	1	6	8	2	7	9

Tabelle 24: Nutzwertermittlung für kleinen Tunnelquerschnitt und standfestes Gebirge bei einer Vortrieblänge von 500 m

Ermittlung des Nutzwertes		Gewichtung s. Zielprogramm	TM-F	TM-E (-)	TM-E (+)	FMS-F	FMS-E	NSDI-F	NSDI-E (-)	NSDI-E (+)	NSDU-F	NSDU-E (-)	NSDU-E (+)
1.	Baubetrieb	15											
	Punktezahl		1.962	1.944	1.944	1.944	1.944	1.392	1.548	1.548	1.452	1.608	1.608
	Rangordnung		1	2	2	2	2	11	8	8	10	6	6
2.	Baustelleneinrichtung	10											
	Punktezahl		852	780	798	1.020	1.002	1.044	960	960	1.080	996	996
	Rangordnung		9	11	10	3	4	2	7	7	1	5	5
3.	Betontechnologie	10											
	Punktezahl		318	282	276	414	414	372	378	372	372	378	372
	Rangordnung		9	10	11	1	1	5	3	5	5	3	5
4.	Arbeitsicherheit - Gesundheitsschutz	5											
	Punktezahl		246	228	228	336	336	672	654	654	618	600	600
	Rangordnung		9	10	10	7	7	1	2	2	4	5	5
5.	Wirtschaftlichkeit	60											
	Punktezahl		580.701	783.068	760.720	664.503	659.421	533.987	685.830	677.318	540.608	689.711	681.625
	Rangordnung		3	11	10	5	4	1	8	6	2	9	7
6.	Nutzwert		420	950	890	405	355	300	710	610	350	735	635
	Rangordnung		5	11	10	4	3	1	8	6	2	9	7

Tabelle 25: Nutzwertermittlung für kleinen Tunnelquerschnitt und nachbrüchiges Gebirge bei einer Vortrieblänge von 500 m

LEBENS LAUF

Name: Dipl.-Ing. Gerald GOGER

geboren: am 19. Februar 1971 in Wien

wohnhaft: Rennbahnweg 27/10/1/10
A – 1222 Wien

Familienstand: ledig, keine Kinder

Schulbildung:
1981 – 1989 Bundesrealgymnasium Wien XXII
(Matura mit ausgezeichnetem Erfolg)

1989 – 1997 Studium Bauingenieurwesen an der TU-Wien
Studienzweig Baubetrieb und Bauwirtschaft

1998 - Dissertationsstudium zum Thema „Entwicklung eines
Entscheidungshilfesystems zur Auswahl eines optimal geeigneten
Spritzbetonverfahrens im konventionellen Tunnelbau“

Berufspraxis:
18.07.1994 – 16.09.1994 **PORR TECHNOBAU AG**
Microtunneling in 1210 Wien
(Ø 800 mm, bis zu 3 m Grundwasser)

Studienjahr 1994/95 **TUTORIUMSAUFTRAG** für die Lehrveranstaltung „Grundzüge und
Methoden der EDV“ an der TU-Wien

07.08.1995 – 27.10.1995 **PORR TECHNOBAU AG - Pilotstollen Semmering**

29.07.1996 – 04.10.1996 **PORR TECHNOBAU AG - Pilotstollen Semmering**

01.06.1997 – 31.08.1997 **ARGE „Umfahrung Schwarzach - St. Veit“**
Ausarbeitung der Diplomarbeit „Wechsel der Vortriebsklassen und
deren Einfluss auf die Vortriebsgeschwindigkeit“

01.10.1998 – 30.09.2002 **Universitätsassistent am Institut für Baubetrieb und
Bauwirtschaft an der TU-Wien bei**
o.Univ.Prof. DI Dr.techn. H.G. Jodl und
o.Univ.Prof. DI Dr.techn. W. Oberndorfer

Mitarbeit bei Gutachten:

- **Sanierung Stärkesilo – AGRANA Gmünd:** Beurteilung der Kosten von Sanierungsmaßnahmen an einem Stärkesilo.
- Entwicklung von **mathematischen Formeln zur Honorarermittlung** für verschiedene Honorarordnungen in Zusammenarbeit mit der Bundeskammer für Architekten und Ingenieurkonsulenten.
- Durchrechnung von Musterprojekten zur **Harmonisierung der europäischen Honorarordnungen** in Zusammenarbeit mit der BAIK.

