

Zur definierten Herstellung von Spritzbeton – Verfahrenstechnische Möglichkeiten des Versuchsstandes für Spritzbeton an der Ruhr-Universität Bochum

Dipl.-Ing. Reinhold HAHLEGE

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau an der Ruhr-Universität Bochum

1. EINLEITUNG

Mit diesem Beitrag werden neue Möglichkeiten zur definierten Herstellung von Spritzbeton im Trockenspritzverfahren vorgestellt, dessen Verfahrenstechnik und Anwendungsgebiete, wie z.B. die Übernahme einer vorläufigen Sicherung entsprechend NÖT bekannt sind (Abb.1). Dabei werden Hinweise gegeben, die verstehen helfen, warum nach etwa 50jähriger Forschung kaum verlässliche, also reproduzierbare Ergebnisse über die Eigenschaften des Spritzbetons vorliegen und somit Wege aufgezeigt, wie ein Rezeptspritzbeton mit definierter Qualität hergestellt werden kann.

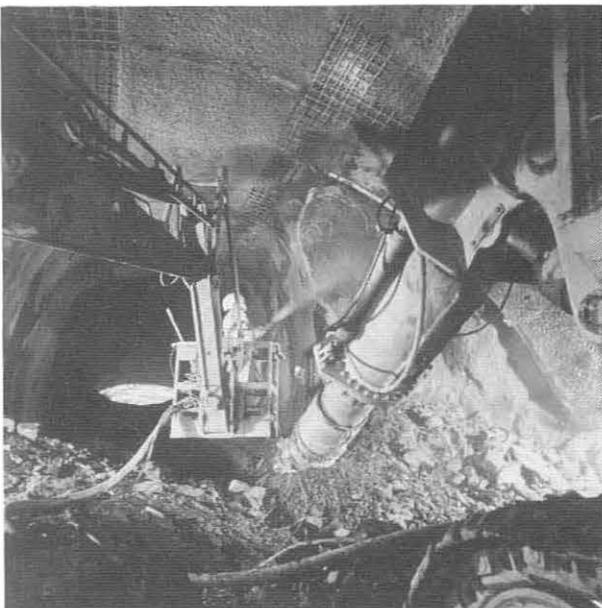


Abb.1. Tunnelvortrieb entsprechend der NÖT.

Bei vielen wissenschaftlichen Untersuchungen ist der Förderdruck an der Maschine ein Kriterium für die Beurteilung von interessierenden Eigenschaften. Aus einer eigenen vergleichenden Untersuchung mit fünf Spritzmaschinentypen läßt sich erkennen, daß bei gleichem Schlauchdurchmesser und gleicher Förderlänge der Druck an der Spritzmaschine als Regelgröße nicht geeignet ist (Abb.2).

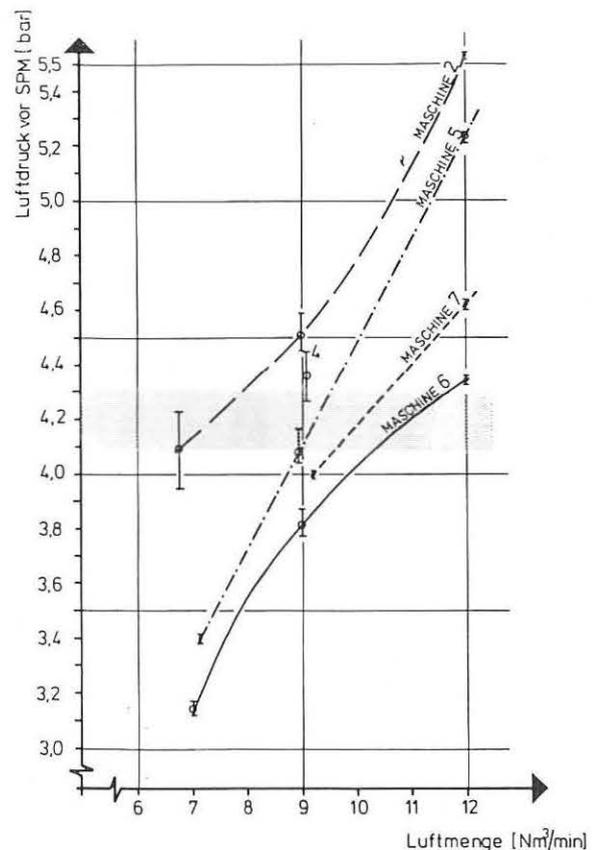


Abb.2. Beziehung zwischen eingebrachter Luftmenge und sich ergebendem Luftdruck vor der Spritzbetonmaschine in Abhängigkeit verschiedener Maschinentypen.

Das Kernproblem der Forschung ist die Vielfalt der Parameter. Welche Möglichkeiten sind gegeben, um verlässliche Aussagen zu erhalten und somit ungewollte Schwankungen in den Einflußfaktoren auszuschalten?

Dieses soll hier erläutert werden. Die im Folgenden angesprochenen Steuer- und Überwachungsmechanismen sind in den Spritzbetonversuchsstand der Ruhr-Universität Bochum integriert.

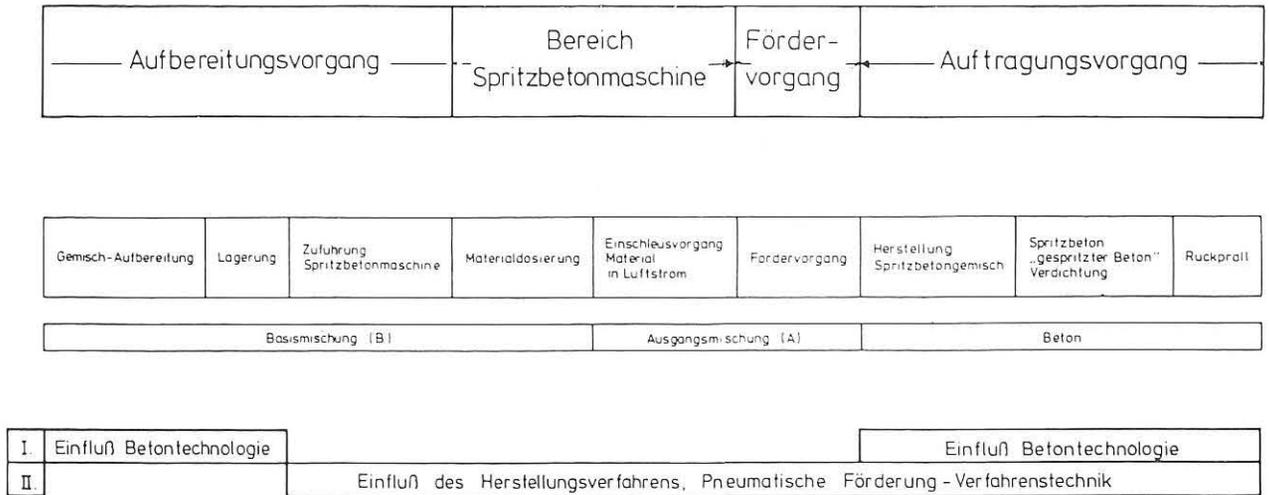


Abb.3. Einflüsse auf die Herstellung von Beton im Trockenspritzverfahren.

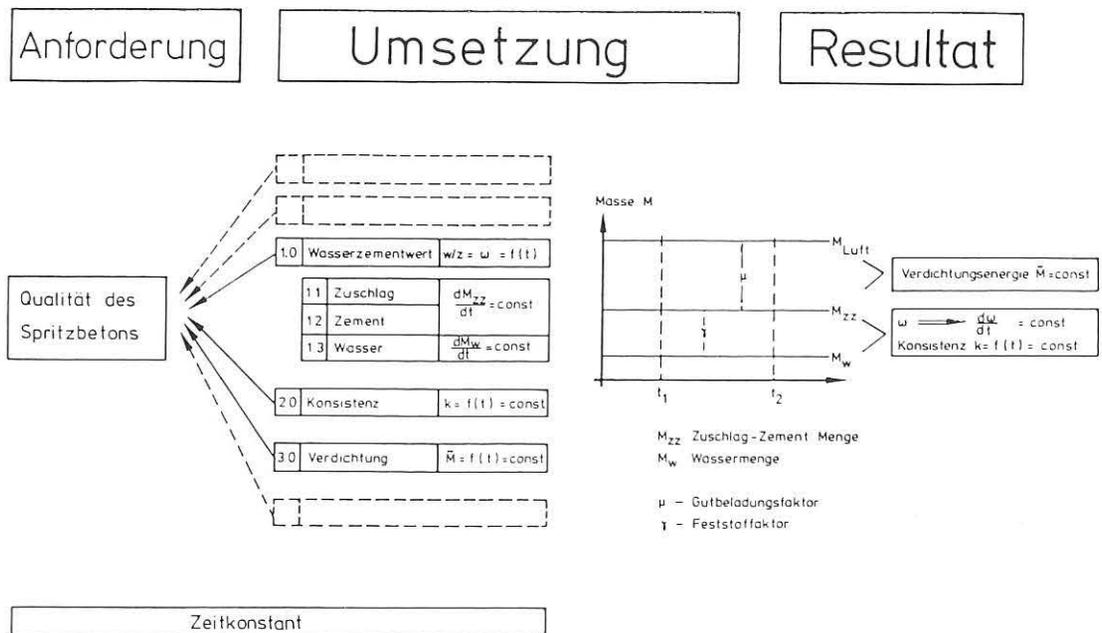


Abb.4. Einflüsse auf die Qualität von Spritzbeton.

2. EINFLUSSFAKTOREN

Das Trockenspritzen von Beton wird von zwei großen Bereichen beeinflusst, nämlich der Betontechnologie und dem Herstellungsverfahren. Beide Bereiche überlagern und beeinflussen sich gegenseitig (Abb.3).

Die betontechnologischen Gegebenheiten sind bekannt und werden hier nicht weiter behandelt.

Der Einfluß des Herstellungsverfahrens beginnt bei der Zuführung der Basismischung in die Spritzbetonmaschine.

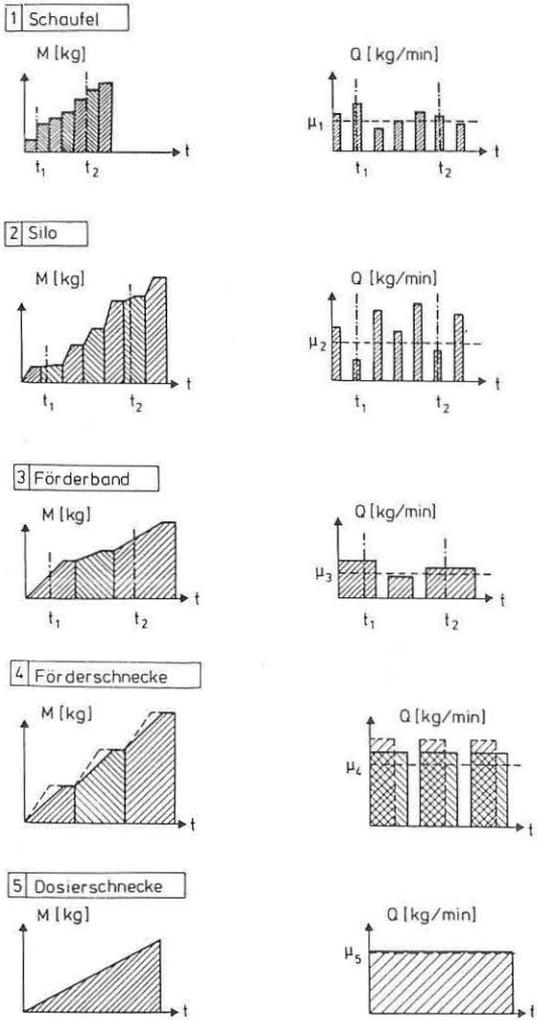
Die wichtigsten Faktoren, die die Qualität eines Spritzbetons beeinflussen, sind der W/Z-Wert, die Konsistenz und die Verdichtung. Das besondere an diesen Größen ist ihre zeitabhängige Veränderlichkeit (Abb.4).

Der W/Z-Wert beschreibt das Verhältnis der Wassermenge zur Zuschlag/Zement-Menge, also der Basismischung. Die Überführung der Basismischung in die Ausgangsmischung ist im wesentlichen ein Problem der Beschickung der Spritzbetonmaschine und der Anpassung an die Förderleistung.

Verschiedene Beschickungssysteme mit Angabe der Massenzunahme, der Beschickungsleistung und der jeweiligen Mittelwerte sind in Abbildung 5 dargestellt.

Es gibt die Möglichkeiten der Beschickung durch

- eine Schaufel (Abb.6)
- ein Förderband (Abb.7)
- eine Förderschnecke (Abb.8) und
- eine Dosierschnecke (Abb.9).



$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_{SBM}$$

$$\mu_5 = \mu_{SBM}$$

SBM = SPRITZBETONMASCHINE

Abb.5. Beschickungsleistung von Spritzbetonmaschinen.



Abb.6. Schaufelbeschickung bei der Spritzbetonmaschine.

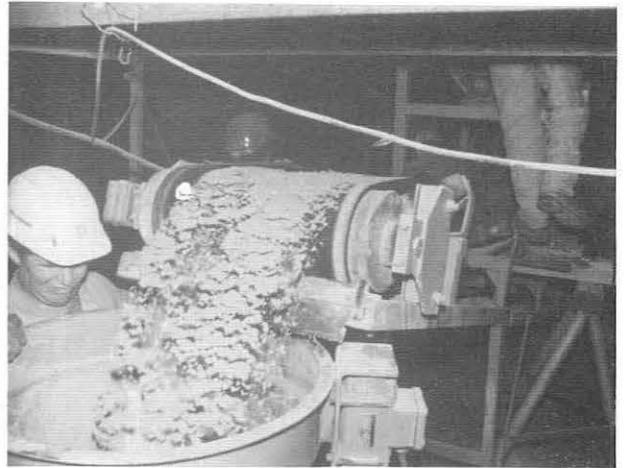


Abb.7. Beschickung durch ein Förderband.



Abb.8. Beschickung durch eine Förderschnecke.

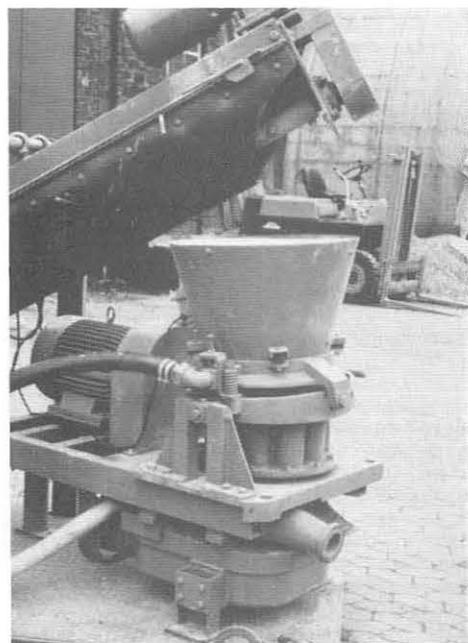


Abb.9. Beschickung durch eine Dosierschnecke.

- Typ I Druckkessel, man. Zuteilung, Zweikammermaschine
- Typ II Druckkessel, mech. Zuteiler, Einkammermaschine
(Weiterentwicklung von I)
- Typ III Rotormaschine, vertikale und horizontale Achse

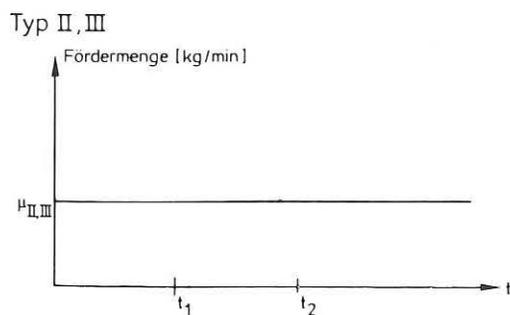
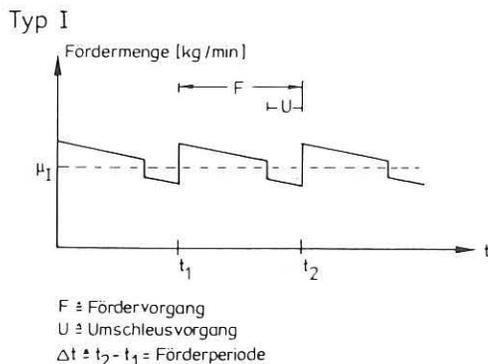


Abb.10. Fördercharakteristika von Spritzbetonmaschinen.

Man erkennt, daß einzig eine Dosierschnecke konstante Beschickungsleistungen erbringt.

Die Fördercharakteristika von Spritzbetonmaschinen lassen sich in drei Systeme unterteilen (Abb.10):

- Typ I als Druckkessel mit manueller Zuteilung der Förderkammer, also eine Zweikammermaschine
- Typ II als Druckkessel, hier aber mit mechanischer Zuteilung und
- Typ III als Rotormaschine mit vertikaler und horizontaler Achse.

Aufgrund von Bauartunterschieden ergeben sich unterschiedliche Förderverläufe, wobei bei Typ II und III der Förderprozeß zeitlich konstant ist.

Bei der Anpassung der Basismischung an die Förderung der Ausgangsmischung ergeben sich folgende Möglichkeiten (Abb.11):

Ist der Ausgangsmischungsstrom größer als der Basismischungsstrom, so liegt ein hoher Luftanteil vor. Daraus ergibt sich eine zu geringe Gutbeladung mit den verbundenen Kriterien, wie ein großer Rückprallanteil, unwirtschaftliche Energiekosten und eine nicht angepaßte Leistung. Ein größerer Basismischungsstrom ist nur für minimale Zeitabschnitte möglich. Es ergeben sich aufgrund der wechselnden Materialsäulen unterschiedliche Fördermengen.

I	$\bar{B} > \bar{A}$	hoher Luftanteil — unwirtschaftlich hohe Kosten hoher Rückprallanteil keine 100% Leistung SBM
II	$\bar{B} = \bar{A}$	opt. Leistung, angepasst
III	$\bar{B} < \bar{A}$	nur für kleine Δt techn. möglich unregelmäßige Förderung wie I durch Materialsäule im Maschinentrichter
\bar{B} ≙ Mittelwert Basismischungsstrom \bar{A} ≙ Mittelwert Ausgangsmischungsstrom SBM ≙ Spritzbetonmaschine		

Abb.11. Anpassung von Basismischung an die Förderung der Ausgangsmischung.

Eine optimale Anpassung zwischen Basismischungs- und Ausgangsmischungsstrom ist dagegen aus wirtschaftlichen und verfahrenstechnischen Gründen erstrebenswert.

Eine Gesamtbeurteilung der Beschickungs- und Fördersysteme von Spritzbetonmaschinen läßt erkennen, daß eine Kombination zwischen Förderschnecke und Dosierschnecke einerseits und Maschinentyp II und III andererseits wünschenswert ist (Abb.12).

Beschick- system Förder- syst. SBM	1	2	3	4	5
	-	-	o	o	+
I.	-	-	-	-	-
II.	o	o	o	+	++
III.	+	o	o	+	++

Abb.12. Beurteilung von Beschickungs- und Fördersystemen.

Für eine Beurteilung der Anpassung lassen sich Kriterien angeben. Diese werden durch den Anpassungsfaktor α und den Korrekturfaktor β beschrieben (Abb.13).

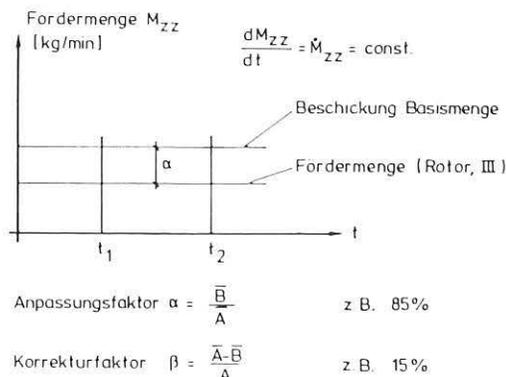


Abb.13. Beurteilungskriterien.

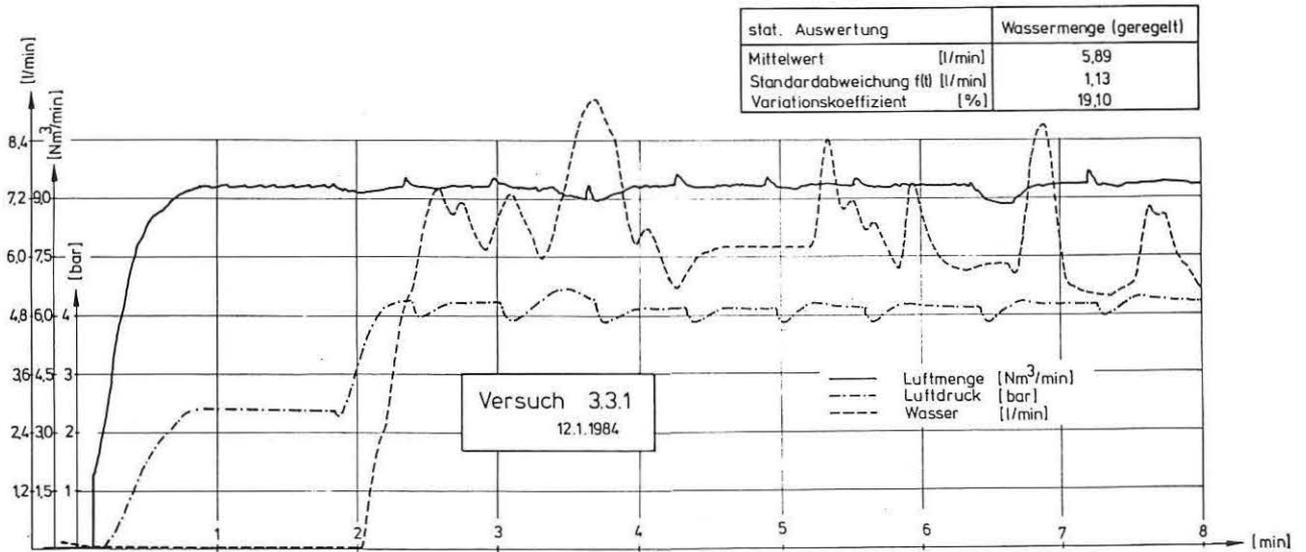


Abb.13. Aufzeichnung und Auswertung einer händisch zugegebenen Wassermenge durch den Düsenführer.

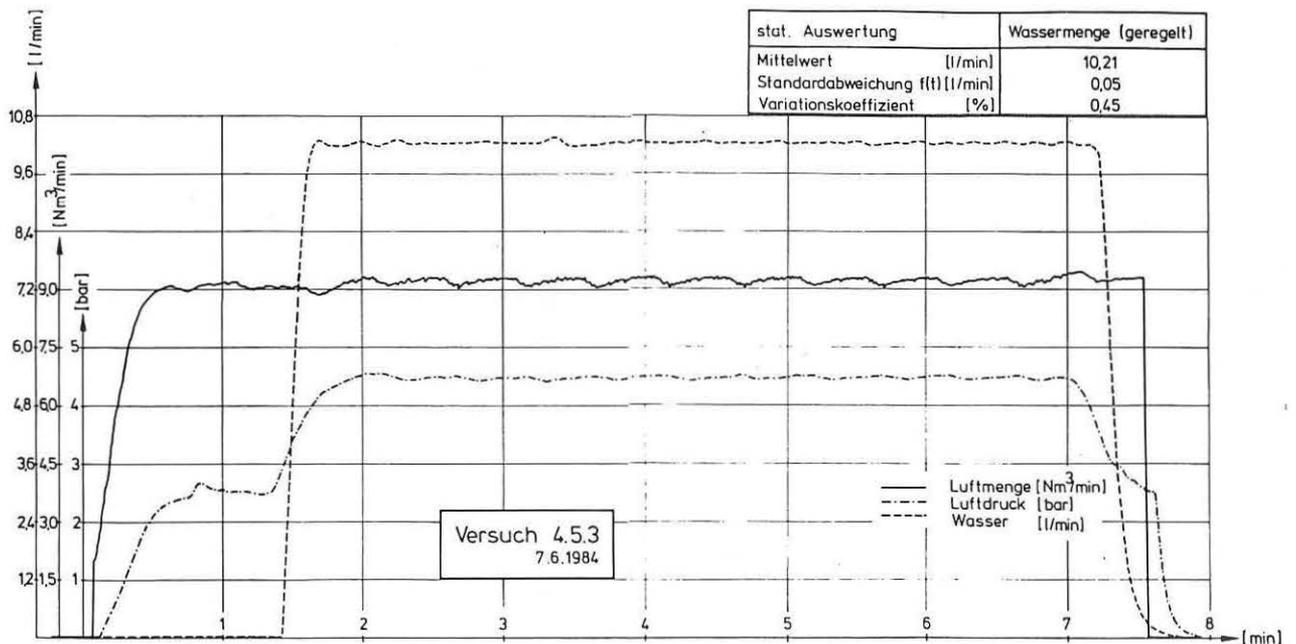


Abb.14. Aufzeichnung und Auswertung einer geregelten Zugabe der Wassermenge.

Wie oben angeführt, hat die Veränderung des W/Z-Wertes einen wesentlichen Einfluß auf die Qualität.

Nach der Behandlung von Möglichkeiten zur Gewährleistung einer kontinuierlichen Zugabe der Zuschlag/Zement-Menge soll auf die Dosierung der Wassermenge eingegangen werden.

Diese muß wie die Zugabe der Zuschlag/Zement-Menge zeitlich konstant sein, um einen zeitlich unabhängigen W/Z-Wert zu gewährleisten. Im Regelfall wird die Wassermenge vorn an der Düse zugegeben.

Zur Verdeutlichung sieht man auf Abbildung 14 die Aufzeichnung einer Wassermenge, die durch den Düsenführer zugegeben wurde. Dabei ist

anzumerken, daß die Eigenfeuchte der Basis-menge konstant war, und keinerlei sonstige Beeinflussungen z.B. durch Kluftwasser vorlagen.

Die Forderung nach einer zeitlich konstanten Zugabe der Wassermenge läßt sich durch eine entsprechende Meß- und Regelanlage realisieren. Das Resultat ihres Einsatzes ist in Abbildung 15 ersichtlich.

Während des gesamten Spritzvorganges kann die Zugabe der Wassermenge konstant auf dem erforderlichen Wert gehalten werden.

Unterzieht man diese beiden unterschiedlichen Systeme der Wasserzugabe durch den Düsenführer und auf mechanischem Wege durch ein Meß-

und Regelsystem einer statistischen Auswertung über die Zeit, so erkennt man, daß bei manueller Zugabe durch den Düsenführer eine Streuung von 19 % vorliegt, wohingegen die geregelte Zugabe eine Streuung von nur ca. 0,5 % bewirkt.

Die Meß- und Regeleinheit für die Wasserdosierung ist gekennzeichnet durch

- einen Ringkolbenzähler,
- einen Ist- und Soll-Wert-Regler und
- einen pneumatischen Stellungsregler mit Ventil.

Kombiniert man diese beiden Möglichkeiten einer zeitlich konstanten Zugabe der Zuschlag/Zementmenge und der Wassermenge, so ist damit ein zeitlich konstanter W/Z-Wert gewährleistet (Abb.4).

Somit ergibt sich hier ein zeitunabhängiges und verarbeitungstechnisch unabhängiges Qualitätsmerkmal.

Die Konsistenz eines Spritzbetons wird durch die unterschiedliche Wasserzugabe beeinflusst. Unter Einbeziehung des vorher Gesagten ist diese nur noch durch den Zementleimgehalt vom Zementanteil in der Basismischung veränderbar. Da die Zugabe der Zuschlag/Zementmenge durch die Konstanz der Basismischung nicht mehr veränderbar ist, ist auch die Konsistenz des aufgetragenen Spritzbetons zeitlich konstant.

Somit bleibt als letzter angesprochener Einflußfaktor die Verdichtung des Spritzbetons, in Abbildung 4 als Punkt 3.0 dargestellt.

Die Verdichtungsenergie wird hervorgerufen durch die Geschwindigkeit des aus der Düse austretenden Spritzbetons.

Hierbei besteht eine Abhängigkeit zwischen der Geschwindigkeit der fliegenden Massenteile im Dünnstrom und des energetischen Mediums, der in die Förderleitung eingebrachten Luftmenge (Abb. 16).

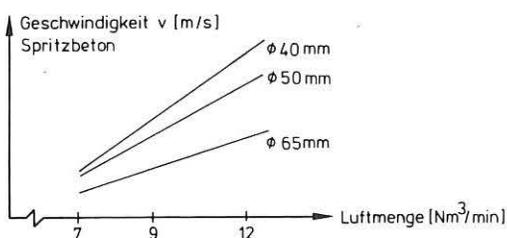


Abb.16. Qualitative Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeit des Spritzbetons und der eingebrachten Luftmenge.

Diese bewirkt in unterschiedlichen Durchmesser und Längen der Förderleitung verschiedene Materialgeschwindigkeiten.

Da, wie oben angeführt, der Luftdruck an der Spritzbetonmaschine bei gleicher Luftmenge verschieden ist, eignet sich der Förderdruck nicht als Regelgröße und somit auch nicht als Bezugskriterium für relevante Eigenschaften des Spritzbetons. Einzig und allein eignet sich hierfür die Materialgeschwindigkeit des auftretenden Spritzbetons und als realistisch zu erfassende und zu regelnde Hilfsgröße die in die Förderleitung eingebrachte Luftmenge.

Die Meß- und Regeleinrichtung für die Zugabe der Luftmenge besteht aus

- einer Meßstrecke mit Normblende,
- einem Druckmanometer mit Meßformer,
- einem Widerstandsthermometer zur Erfassung der Lufttemperatur,
- einem Ist-Sollwert-Regler,
- einem Korrekturrechner und
- einem pneumatischen Stellungsregler mit Ventil.

Einer statistischen Auswertung unterzogen ergibt sich bei der Betrachtung der Luftmenge eine Abweichung von 0,75 % bei einem Mittelwert von 9,2 Nm³/min (Abb.15).

Auch der gemessene Luftdruck an verschiedenen Stellen des Fördersystems schwankt nur um geringe Werte, hier um ca. 1,5 %.

Verbindet man diese Meß- und Regeleinrichtung für die Luftmenge mit der der Wassermenge unter Zugrundelegung einer konstanten Beschickung der Basismischung und Förderung der Ausgangsmischung, so ist damit eine zeitlich unveränderliche Einflußnahme auf die Faktoren der Qualitätsmerkmale bei der Herstellung von Spritzbeton gegeben.

Dabei wird nicht davon ausgegangen, daß die Werkstoffeigenschaften eines zu optimierenden Baustoffs von dem Urteilsvermögen bzw. den Fähigkeiten des Düsenführers und des Bedieners der Spritzbetonmaschine bestimmt werden.

Der Düsenführer ist, wie oben gezeigt wurde, aufgrund der hohen Materialgeschwindigkeit nicht in der Lage, das Zugabewasser der Förderung der Ausgangsmischung anzupassen.

Die Forderung nach einem Qualitätsspritzbeton mit nur unwesentlichen Unterschieden beim W/Z-Wert und Verdichtungsunterschieden, die maßgebend sind, z.B. für Festigkeitsunterschiede des hergestellten Spritzbetons, läßt sich nur mit dem oben beschriebenen Kontroll- und Steuerprozessen erfüllen.

So wird es möglich, die Kenntnisse von den Gesetzen der Betontechnologie auch auf den Spritzbeton uneingeschränkt zu übertragen und so einen Rezeptspritzbeton herzustellen, der bestimmten Qualitätsansprüchen genügt.

Die Kenntnisse von den Vorgängen bei der Herstellung von Spritzbeton haben dazu geführt, daß am Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum ein Versuchsstand für Spritzbeton aufgebaut wurde (Abb.17).

Die vorliegende Versuchsergebnisse zeigen, daß damit ein Spritzbeton mit nur minimalen Streuungen hergestellt werden kann. Als Maß der Beurteilung wird hier der Variationskoeffizient herangezogen. Dieser liegt z.B. bei den festgestellten Druckfestigkeiten unter 5 %.

Diese Streuung der Ergebnisse ist damit im Beurteilungsschema nach Rüscher u.a., die dieses Schema für Normalbeton aufgestellt haben, und auch nach der ACI Empfehlung für Spritzbeton als sehr gut zu bewerten.

Im einzelnen besteht der Versuchsstand aus

- einer Betonaufbereitungsanlage mit einem Zuschlag/Zementdepot und einem 250 l Zwangsmischer

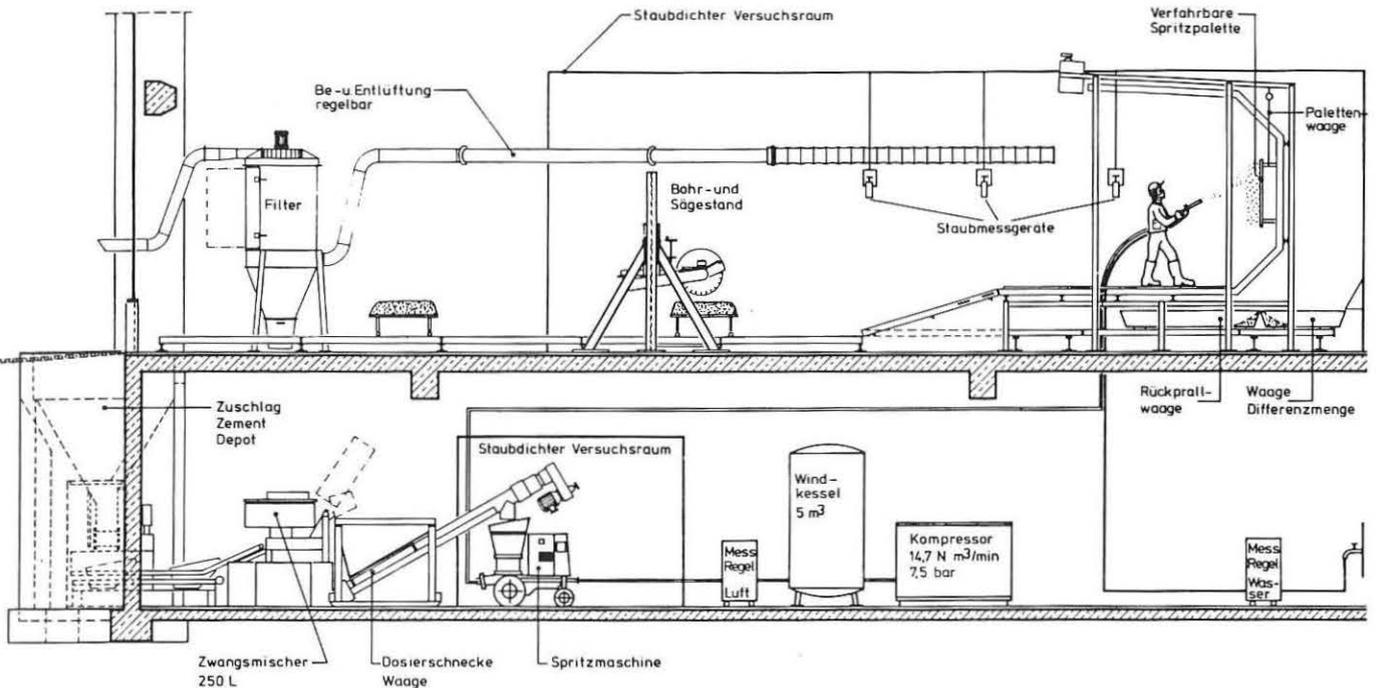


Abb.17. Schematischer Längsschnitt durch den Versuchsstand für Spritzbeton.

- einer Beschickungseinrichtung für die Basismischung mit Dosierung des Betonzusatzmittels
- einem definierten Versuchsraum für die Spritzbetonmaschine
- dem Kompressor mit Windkessel und der Meß- und Regelanlage für die Druckluft
- der Meß- und Regelanlage für das Zugabewasser und
- dem eigentlichen Spritzbetonstand mit den Wagemöglichkeiten für den aufgetragenen Spritzbeton, möglichst unter verschiedenen Neigungswinkeln, den anfallenden Rückprall und die Differenzmenge.

Die logischen Meß-, Kontroll- und Steuerfunktionen sind in Abbildung 18, S.30, schematisch dargestellt, so daß die vorher beschriebenen Mechanismen zu erkennen sind.

Sämtliche Meß- und Steuergrößen werden durch eine Datenverarbeitungsanlage erfaßt und für eine im Anschluß an die Versuchsdurchführung vorgenommene Auswertung vorbereitet.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Während man im herkömmlichen Betonbereich verfahrenstechnische Einflüsse in der Grundlagenforschung eingehend behandelt hat, sind diese Einflüsse auf die Eigenschaften des Spritzbetons meist unterschätzt und deshalb nur in vereinzelt Fällen untersucht worden.

Diese Untersuchungen führten teilweise zu Aussagen, die mit den betontechnologischen Gegebenheiten nicht vereinbar sind.

Durch die Konzeption und den Bau des Spritzbetonversuchsstands mit Methoden zur Überwachung und Steuerung des Herstellungsprozesses, deren Übertragung auch auf Baustellenverhältnisse denkbar ist, ist es nun möglich, den an einen Spritzbeton gestellten hohen Anforderungen zu genügen.

