
Einfluss der Klebrigkeit des Nass - Mischgutes auf die Festigkeitseigenschaften von Spritzbeton

EFFECTS OF THE STICKINESS OF WET-MIX ON SOME PROPERTIES OF SPRAYED CONCRETE

CHRISTOPH NIEDEREGGER, DIETMAR THOMASETH

Die Einhaltung einer definierten Spritzbetonqualität, wie z.B. gesicherte Früh- und Endfestigkeit, muss im Tunnelbau ständig überwacht und durch periodische Prüfungen laufend kontrolliert werden. Infolge dieser baubegleitenden Untersuchungen kann auf wechselnde Bedingungen flexibel reagiert und eine laufende Optimierung der Spritzbetonherstellung durchgeführt werden. Technische Anforderungen, wie eine definierte Festigkeitsentwicklung, Gleichmäßigkeit, Dichtheit und Dauerhaftigkeit, und wirtschaftliche Kriterien, wie Rückprall, Auftragsleistung und Energieverbrauch, sind Schlüsselstellen für Spritzbeton im Vortrieb.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Problematik einer zu hohen Klebrigkeit des Nass - Mischgutes. Trotz des Erreichens von Konsistenzklassen größer F59 durch die Zugabe von Fließmittel auf Polycarboxylatbasis wird speziell die Frühfestigkeitsentwicklung, bedingt durch eine starke Klebrigkeit und in Folge dessen durch eine nicht konstante Einmischung des Beschleunigers in das Spritzgut oft sehr beeinträchtigt, wobei es stellenweise zu unzureichend beschleunigten Bereichen an der Tunnelwandung kommen kann.

Es ist festzustellen, dass die Problematik der Klebrigkeit nicht nur vom Fließmittel und seiner Polymerstruktur abhängt, sondern auch die Kombination aus Fließmittel, Bindemittel und Gesteinskörnung einen großen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons und in Folge dessen auf Wasseranspruch und die Klebrigkeit hat. Der Einfluss der Bindemittel in Bezug auf die Verarbeitbarkeit liegt vor allem im Wasseranspruch. Eine Senkung des Wasseranspruchs hat eine Senkung der benötigten Fließmittelmenge zur Folge.

Es werden Anwendungsbereiche herausgearbeitet, die bei Einhaltung eine sichere und wirtschaftliche Lösung für Spritzbeton im Tunnelbau ergeben. Ziel war es ferner eine Methode zu entwickeln, mit der man die Klebrigkeit einfach quantifizieren kann, wobei in Folge dessen durch das Ermitteln von Vergleichswerten eine objektive Beurteilung vorgenommen werden kann.

Adherence to a defined quality in the sprayed concrete – including a guarantee of stable early and final strength – has to be constantly monitored in tunnel construction, and must be subject to ongoing controls on the basis of periodic examination. Analysis of the material properties in parallel to the progress of construction work makes it possible to respond flexibly to changing conditions, so that the sprayed concrete production process can be continually optimized. Technical specifications like a defined pattern

of strength development, uniformity, impermeability and durability, as well as economic criteria such as rebound, throughput and energy consumption, are all key points for sprayed concrete in tunnel construction.

The present work is concerned with the problems that arise when the wet mix is excessively sticky. Even in cases where a consistency class of F59 (spread mean value 590 mm) or higher has been achieved as a result of the addition of superplasticizers on a polycarboxylate base, the early strength properties of the material in particular are often severely impaired when it is unduly sticky, as this can lead to irregular distribution of the accelerator in the sprayed application. In consequence there may be areas of the tunnel wall where the strength development of the concrete is not speeded up to a sufficient degree.

It may be asserted that the problems arising from stickiness of the materials are not just dependent on the superplasticizer and its polymer structure – over and above this, the combination of superplasticizers, binding agents and aggregate grading taken together adds up to a major influence on the rheological properties of fresh concrete, and consequently on the required amount of water and the degree of stickiness.

The influence of the binding agents with reference to the workability of the material is above all to be seen in relation to the water requirement of the binding agent. A lowering of the water requirement leads to a reduction in the quantity of superplasticizer that is needed.

The present work's analysis of application range will lead, when its recommendations are observed, to a safe and economical solution for the use of sprayed concrete in tunnel construction. A further aim of the study was to develop a simple method for the quantification of stickiness, on the basis of which it should be possible, by determining comparative values, to arrive at an objective judgment.

1. Klebrigkeit des Mischgutes

Starke Schwankungen in den Frühfestigkeiten können Qualitätseinbußen des Spritzbetons hervorrufen und sollen tunlichst verhindert werden. Die Schwierigkeit in der Erzielung von konstanten Frühfestigkeiten liegt in deren Abhängigkeit von vielen unterschiedlichen Faktoren.

Die Klebrigkeit des Nass-Mischgutes ist ein Parameter, welchem bisher wenig Beachtung geschenkt wurde, wobei jene einen teilweise erheblichen Einfluss auf die Konstanz der Festigkeitsentwicklung aufweist.

Aussagekräftige Ergebnisse konnten in Bezug auf die Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons bis zu einer Stunde gewonnen werden, wobei folgende Parameter zusätzlich untersucht wurden:

- Beschleunigerdosierung
- Anrechenbarer Bindemittelgehalt
- Gesamtwassergehalt bzw. Wasser/Bindemittel-Wert
- Mischguttemperatur bei Verarbeitung
- Mischgutsalter bei Verarbeitung
- Gerätschaften und Maschineneinstellungen

Die Messungen sollten in erster Linie Grenznutzwerte deutlich machen und unwirtschaftliche Dosierungen verhindern.

Im modernen Betonbau ist die Verwendung von Hochleistungsverflüssigern nicht mehr weg zu denken. Die Entwicklung von SCC- und Hochleistungsbetonen ab den 90er Jahren ermöglichten die Herstellung feingliedriger Bauteile, architektonisch komplizierter Formen und Betonoberflächen hoher Qualität. Neben all den betontechnologischen Vorteilen, die moderne Fließmittel mit sich bringen, sind in der Praxis Probleme bezüglich der Verarbeitbarkeit bekannt, welche sich auch im Bereich des Spritzbetons bemerkbar machen können. Sowohl die einwandfreie Pumpbarkeit der Betone als auch eine konstante Festigkeitsentwicklung über den gesamten Tunnelquerschnitt kann beim Einsatz solcher Zusatzmittel, trotz Erreichens eines großen Ausbreitmaßes, oft nicht erreicht werden.

Unter Berücksichtigung der durchgeführten Untersuchungen, ist festzustellen, dass die Verarbeitbarkeit und die teilweise negativen Einflüsse auf die Frühfestigkeitsentwicklung aber nicht nur vom Fließmittel und seiner Polymerstruktur allein abhängen,

sondern dass viel mehr auch die Kombination aus Fließmittel, Bindemittel, Gesteinskörnungen und dem dazugehörigen Wasseranspruch einen großen Einfluss auf die rheologischen¹⁾ Eigenschaften des Nassspritzgutes und in Folge dessen auf die Klebrigkeit hat.

Der Grund für eine wechselnd hohe Klebrigkeit des Nass - Mischgutes und der daraus resultierenden Problematik einer streuenden Festigkeitsentwicklung liegt in einer "quantitativ unkonstanten Einmischung des Erstarrungsbeschleunigers an der Düse"

Die Auswirkungen daraus sind:

- unterschiedliche Festigkeitsentwicklungen (Bereiche mit Über- und Unterdosierungen)
- geringere Endfestigkeiten (Reduktion der Endfestigkeit durch Überdosierungen)
- Spannungsrisse durch unterschiedliches Schwindverhalten zur Zeit der Frühfestigkeitsentwicklung. Daraus kann wiederum eine geringere Dauerhaftigkeit bei Eindringung von sulfathaltigen Gergirsgewässern folgen.

2. Frühfestigkeitsentwicklung am jungen Spritzbeton

Die Messergebnisse in *Bild 1* stellen Festigkeitsentwicklungen von jungem Spritzbeton an zwei Tunnelbauslosen dar, welche durch annähernd gleiche Spritzbetonrezepturen eine gewisse Vergleichbarkeit der aufgezeichneten Messergebnisse rechtfertigen. So stellen die Messungen Aufzeichnungen von Be-

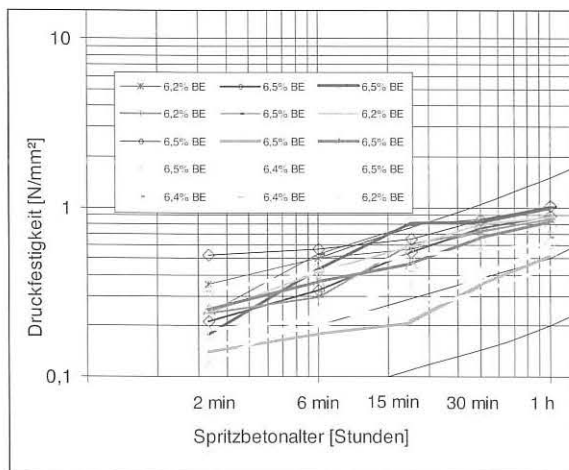


Bild 1: Unterschiedliche Frühfestigkeitsentwicklungen bis zu einer Stunde bei annähernd konst. BE - Dosierung (6,2 % - 6,5 %) und vergleichbaren Randbedingungen

tonrezepturen dar, welche sich in erster Linie durch eine unterschiedlich hohe Klebrigkeit des Nassspritzgutes unterscheiden, wobei

- verwendetes Bindemittel,
 - Zusatzstoffe,
 - anrechenbarer Bindemittelgehalt,
 - Spritzbetonalter bei Verarbeitung,
 - Betontemperatur,
 - Lufttemperatur,
 - BE - Typ bzw. Hersteller,
 - BE - Temperatur,
 - BE - Dosierung ,
 - Maschineneinstellungen (Pumpenfüllgrad, BE - Dichte, Bindemittelseinstellungen)
- annähernd konstant blieben.

Bild 2 zeigt repräsentative Messungen, welche deutlich unterschiedliche Festigkeitsentwicklungen innerhalb einer Betoncharge (Charge A) aufweisen. Die Charge A wurde optisch als sehr klebrig bewertet. Über den Tunnelquerschnitt wurden pro Charge insgesamt 10 Frühfestigkeitsaufzeichnungen durchgeführt, wobei innerhalb der Charge A Bereiche gemessen wurden, welche von Anfang an im J3-Bereich lagen (Charge A, Messung "High"), benachbarte Bereiche aber unterhalb der J2-Grenze starteten (Charge A, Messung "Low"). Der Mittelwert der 10 Frühfestigkeitsentwicklungen der klebrigen Charge A (Charge A, Messung "Middle") liegt dabei deutlich unter dem Mittelwert der Frühfestigkeitsentwicklung einer Charge B (Charge B, Messung "Middle"), welche optisch als nicht klebrig befundet wurde. Die Festigkeitsentwicklung der Charge B, welche am selben Tag verarbeitet wurde und durch

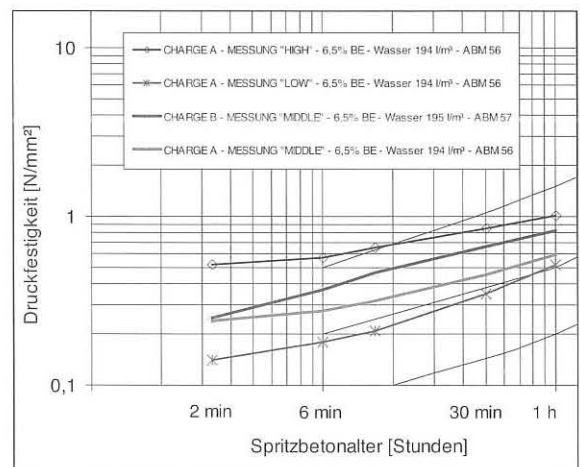


Bild 2: Unterschiedliche Festigkeitsentwicklungen bis zu einer Stunde bei konst. BE - Dosierung

¹⁾ Das Wort Rheologie leitet sich aus dem griechischen Wort rheos = fließen ab. Damit ist Rheologie als die Wissenschaft vom Fließen zu verstehen. Das Fließen ist eine fortwährende Deformation eines Materials unter Einwirkung äußerer Kräfte.

eine unterschiedliche Mischungskomposition hinsichtlich Zusatzmittelchemie und Sieblinie eine geringe Klebrigkeit aufwies, zeigt eine konstante Frühfestigkeitsentwicklung innerhalb der 10 Messreihen über den gesamten Tunnelquerschnitt (Charge B, Messung "Middle").

Die oben angeführten relevante Parameter waren bei beiden Chargen annähernd konstant. Die Chargen unterschieden sich also lediglich durch die Art der Zusatzmittelchemie, deren Dosierung und in der Sieblinienzusammensetzung im Feinteilbereich.

Es scheint also einen Zusammenhang zwischen Festigkeitsentwicklung des jungen Spritzbetons und der Klebrigkeit des Nassspritzgutes zu geben. Prinzipiell deuten die Aufzeichnungen darauf hin, dass eine zu hohe Klebrigkeit des Nassmischgutes eine konstante Einmischung des BE's an der Spritzdüse beeinträchtigt. In Folge dessen kommt es zu unterbeschleunigten Bereichen an der Tunnelwandung, welche aufgrund einer zu niedrigen Festigkeitsentwicklung in den ersten Minuten zu Rückfall des Spritzbetons in den Tunnelinnenraum neigen. Gleichzeitig wurden überbeschleunigte Bereiche beobachtet, was wiederum eine mengenmäßig unkonstante Einmischung des BE's aufgrund einer sehr hohen Klebrigkeit bestätigt.

3. Einflussfaktoren auf die Klebrigkeit und das Fließverhalten

Die unterschiedliche Klebrigkeit wird also, wie bereits angesprochen, in erster Linie durch Zusatzmittelchemie (Art und Dosierung), das Wechselspiel Zusatzmittelchemie - Bindemittel, sowie den Wasseranspruch des Bindemittels und der Gesteinskörnung beeinflusst.

Eine Bewertung der Klebrigkeit im Vorfeld sollte über

- die Quantität und die Qualität des Fließmittels sowie über
- die Bewertung des Wasseranspruchs des Bindemittels und der Gesteinskörnung erfolgen.

3.1 Bindemittel

Mit zunehmender Zementleimmenge sinkt die Fließgrenze der Mörtel und Betone. Diesen Effekt kann man sich folgendermaßen erklären. Der Zementleim füllt die Hohlräume zwischen den Zuschlagskörnern und drückt diese bei weiterer Erhöhung auseinander. Diese Schicht erleichtert das Gleiten der Zuschlagspartikel und erhöht die Fließfähigkeit. Allerdings kann durch eine größere Zementleimmenge der Wasseranspruch erhöht werden, was eine Anhebung der Fließgrenze zur Folge hat. Wird

gleichzeitig die Fließmittelmenge erhöht, um das Ausbreitmaß konstant zu halten, erhöht sich in gleicher Masse die Klebrigkeit. Eine optimierte Korngrößenverteilung des Bindemittels senkt den Wasseranspruch und die Klebrigkeit.

3.2 Gesteinskörnung

Je feiner die Gesteinskörnung zusammengesetzt ist, desto größer ist seine spezifische Oberfläche, und damit steigen auch die Anziehungskräfte zwischen den Feststoffpartikeln im Nass-Mischgut. Die Folge ist eine Vergrößerung der Fließgrenze. Des Weiteren muss eine größere Fläche vom Zementleim benetzt werden, was zu einer Erhöhung des Wasseranspruches führt.

Die Sieblinie der Korngruppe 0/4 und ihr mengenmäßiger Anteil bei einer Betonrezeptur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Wirkungsweise der Fließmittel bzw. Verflüssiger. Insbesondere der Mehlkornanteil (Korngrößen $< 0,125$ mm) ist nicht unwesentlich verantwortlich für den Wasseranspruch und somit auch für den Fließmittelbedarf von Mörteln bzw. Betonen.

3.3 Korngrößenverteilung (KGV) von Bindemittel und Gesteinskörnung

In der Bindemittel- bzw. Betontechnologie ist für die Erreichung technologischer Werte der W/B - Wert eine wesentliche Komponente. Der im Gemisch Gesteinskörnung-Bindemittel vorhandene Wassergehalt beeinflusst darüber auch die Verarbeitungseigenschaften des Produktes.

Derzeit werden zur Absenkung des Wasseranteils chemische Zusatzmittel (Hochleistungsverflüssiger) dem Gemisch beigegeben. Dadurch lassen sich Reduktionen - bei gleicher Konsistenz - von 5 - 25 % erreichen. Der Einsatz der hochwirksamen Fließmittel kann aber neben zusätzlichen Kosten technisch den Nachteil haben, dass der Beton eine erhöhte Klebrigkeit aufweist.

Ein anderer Weg ist es über die Kornzusammensetzung des Zement/Bindemittels den Wasseranspruch zu senken, sodass im gleichen Maße die FM - Dosierung reduziert werden kann. Durch definierte Mahlung des Klinkers, bzw. durch die Zugabe von Feinstoffen, kann die Kornzusammensetzung im Feinstbereich verändert bzw. gesteuert werden.

Eine solche Optimierung beruht auf einer möglichst geringen Abweichung der Summenfunktion der verwendeten Bindemittel im Bereich bis $192 \mu\text{m}$ be-

zogen auf eine optimale Summenfunktion in Anlehnung an die Fullerkurve. Die Fullerkurve ist als empirisches Instrument zum Aufbau dichter Schüttungen von kugeligem Körper zu verstehen.

Außerdem muss die Korngrößenverteilung derart sein, dass Körner von gleicher Größe nicht zusammenliegen, sondern jedes Korn ohne jede Ordnung reichlich von kleineren Körnern umgeben ist. Dadurch wird die Haufwerksporosität minimiert. In diesem Hohlraumvolumen kann im Zuge des Betonmischvorganges Wasser "eingeschlossen" werden, welches einerseits nicht mehr zur Konsistenzsteigerung zur Verfügung steht und andererseits beim Verbleiben im Gemisch zu erhöhter Porenbildung und erhöhter Schwindneigung führen kann.

Bild 3 zeigt das Optimierungspotential hinsichtlich FM - Reduktion bei Modifikation der Korngrößenverteilung.

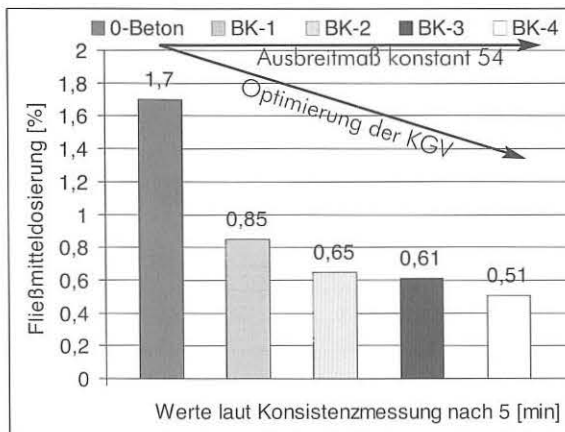


Bild 3: Erforderliche Fließmitteldosierungen von Betonen unterschiedlicher Kornzusammensetzung zum Erreichen von 54 [cm] Ausbreitmaß - Optimierungspotential bei Modifikation der Korngrößenverteilung

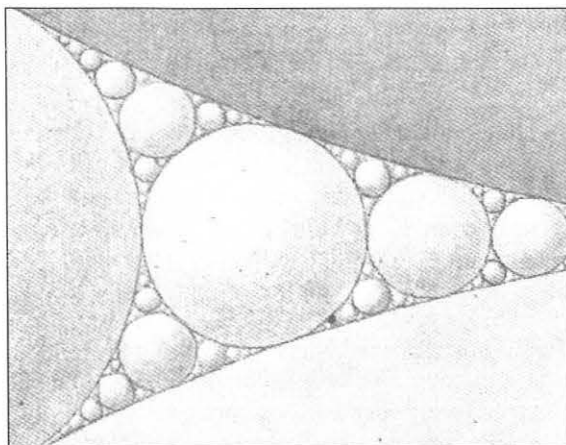


Bild 4: Aufbau einer Kugelpackung mit Einlagerungskugeln maximaler Größe

Dem Ausgangsbinder (0-Beton) wurden Aschen, Schlacken bzw. Steinmehle nach einer mathematischen Modellannahme zugegeben (BK1 - BK4) und somit sukzessive die Korngrößenverteilung optimiert. Dadurch lässt sich der Wasseranspruch, die Fließmitteldosierung um bis zu 70 % und infolgedessen auch die Klebrigkeit deutlich reduzieren. Die Senkung des Wasseranspruches ist dabei nahezu unabhängig von der Menge der zugegebenen Zusatzstoffe sondern hängt nur von der Verteilung der Feinteile, speziell unter 192 µm, ab.

3.4 Zusatzmittel

Zurzeit werden hauptsächlich Hochleistungsverflüssiger auf Polycarboxylatbasis zur Herstellung einer breiten Palette von Betonprodukten verwendet. Weiters ist der Trend zu Niedrigdosierungen der FM's zu beobachten, was eine starke verflüssigende Wirkung dieser Fließmittel voraussetzt. Diese Fließmittelarten können jedoch eine starke Klebrigkeit des Frischbetons hervorrufen.

3.5 Zusammenwirken von Fließmittel und Bindemittel

Das Fließmittel ist in seiner Wirkung auch von der Art und Menge der restlichen Betonkomponenten abhängig. Die Wahl des Bindemittels ist dabei von primärer Bedeutung. Die Zementarten unterscheiden sich vor allem in der Geschwindigkeit und Intensität ihrer hydrothermalen Reaktion. Das Potential der Bindemittel in Bezug auf die Verarbeitbarkeit liegt vor allem in ihrem Wasseranspruch. Eine Senkung des Wasseranspruches hat eine Senkung der benötigten Fließmittelmenge zur Folge. Dadurch wird eine geringere Klebrigkeit erreicht.

4. Bewertungsmöglichkeiten

Diverse Untersuchungen zur Klebrigkeit werden großteils anhand von Mörtelmischungen, mittels Rheometer, durchgeführt. Die bei solchen Messungen erhaltenen Ergebnisse können zwar tendenzielle Entwicklungen aufzeigen, jedoch eindeutige Erkenntnisse lassen sich lediglich durch Betonmischungen ermitteln.

Die bisherige Bewertungsgröße hinsichtlich der Verarbeitung von Betonen stellte das Ausbreitmaß dar. Allerdings ist die unangefochtene Aussagekraft durch eine alleinige Messgröße "Ausbreitmaß" durch den Einsatz von Hochleistungsverflüssigern und der damit verbundenen Problematik nicht mehr gegeben, da man keine lückenlose Aussage mit dieser Messgröße zur Verarbeitbarkeit, zur Pumpbarkeit und vor allem zur Klebrigkeit erhält.

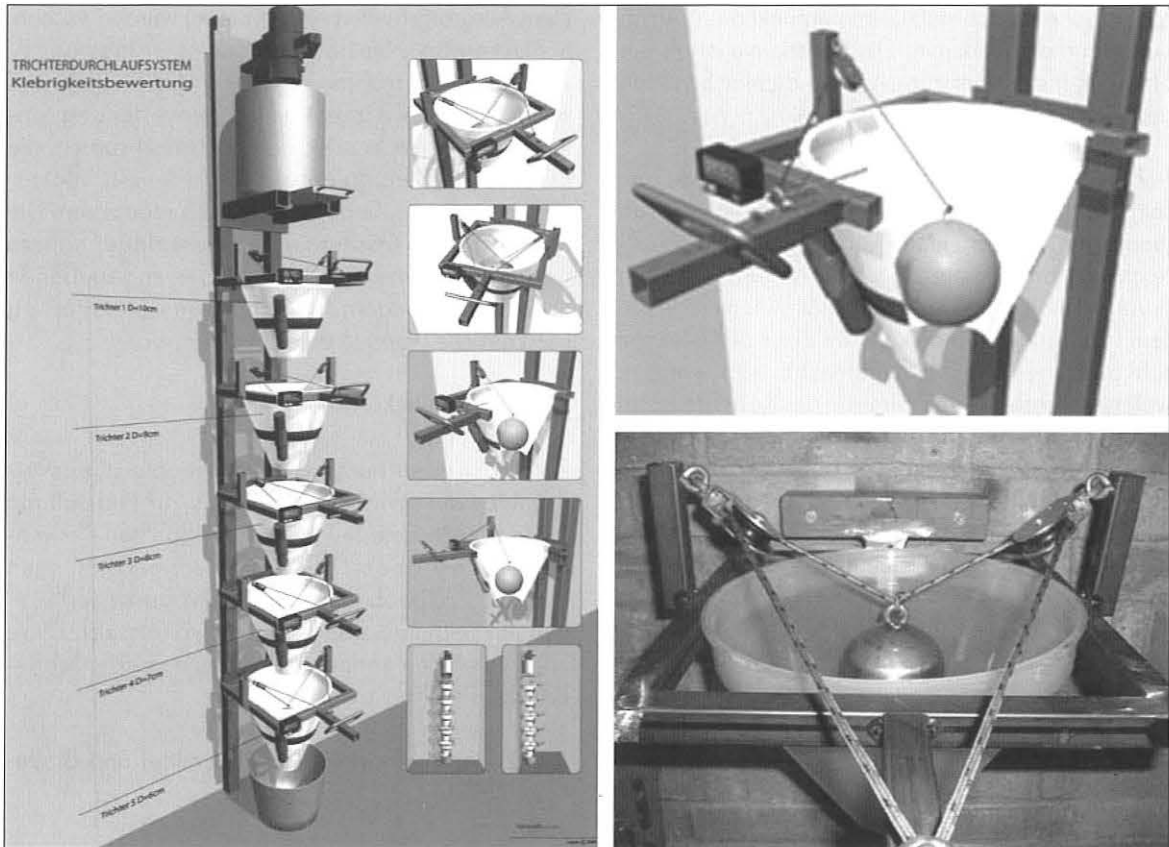


Bild 5: Darstellung des Trichterdurchlaufsystems

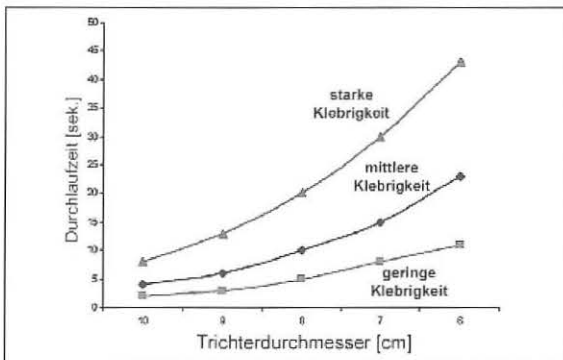


Bild 6: Klebrigkeitsbewertung - Trichterdurchlaufsystems (Schematische Bewertungsdarstellung)

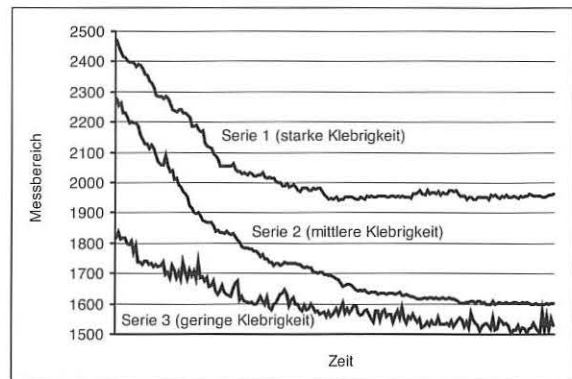


Bild 8: Klebrigkeitsbewertung - Kraft-Widerstandssystem (Schematische Bewertungsdarstellung)

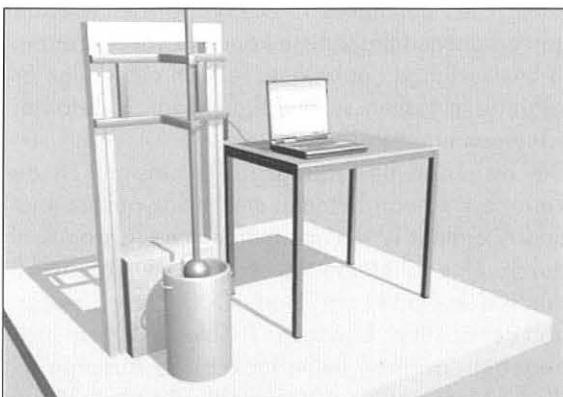


Bild 7: Kraft - Widerstandssystem

Zur Bewertung der Verarbeitbarkeit von solchen Betonen weicher Konsistenz, die auch für die Bewertung der Klebrigkeit geeignet sind, stellen beispielsweise folgende Versuchseinrichtungen dar:

- L-Box
- Blockierring

Diese Versuchseinrichtungen sind aber nur, wie bereits angeführt, für Betone mit einer sehr weichen bis selbstverdichtenden Konsistenz geeignet. Um jedoch auch eine Bewertung der Betone mit steifer bzw. mit mittlerer Konsistenz zu ermöglichen, bedarf es neuer Versuchseinrichtungen.

Die Entwicklung solcher Vorrichtungen gestaltet sich als sehr schwierig, da eine klare Definition der Klebrigkeit derzeit noch nicht vorliegt. Nach diversen durchgeführten Untersuchungen erscheinen zum derzeitigen Stand folgende neuentwickelte Versuchseinrichtungen als durchaus aussagekräftig:

- das Trichterdurchlaufsystem
- die Kraft-Widerstandsmethode

4.1 Das Trichterdurchlaufsystem

Die Messvorrichtung besteht aus einem 5-stufigen, übereinander stehenden Trichtersystem, wobei sich die einzelnen Trichteröffnungen nach unten verjüngen. Zur Bewertung herangezogen wird die Durchlaufgeschwindigkeit des Frischbetons durch die einzelnen Trichter, welche Aufschluss über die Klebrigkeit bzw. die Verarbeitbarkeit des Betons geben kann.

Zur Bewertung von steiferen Betone werden Oberflächenrüttler mit definierter Leistung an die Trichter angebracht, welche ein gleichmäßiges Durchlaufen des Betons ermöglichen.

Nach Abschluss von durchgeführten Voruntersuchungen hat sich herausgestellt, dass dieses neu entwickelte System als durchaus aussagekräftig zu betrachten ist.

4.2 Kraft-Widerstandssystem

Ein weiteres Bewertungssystem stellt das Kraft-Widerstandssystem dar. Der Grundgedanke des Meßsystems basiert auf der Wechselwirkung zwischen Kraft und Widerstand. Es gilt die Kraft bzw. den Widerstand zu messen, welche notwendig ist, um einen Körper in die Suspension einzutauchen bzw. aus der Suspension herauszuziehen. Je höher die Klebrigkeit der Suspension ist, desto höher ist der Kraftaufwand um den Körper aus der Masse herauszuziehen.

Das neu entwickelte System zeigt anhand der durchgeführten Untersuchungen, dass mit dieser Methode zur Klebrigkeitsbewertung genaue Werte erreicht werden. Als Ergänzung zur entwickelten Klebrigkeitsmessmethode sollte eine Luftporenmessung an den Proben durchgeführt werden. Die Entstehung von Luftporen im Gemisch hängt mit der Kombination bestimmter Fließmittel und Bindemittel zusammen. Diese Luft einschließen haben eine Senkung der Klebrigkeit (siehe Literatur: Luftporen beeinflussen die Viskosität) zur Folge und verzerren somit die Messergebnisse.

4.3 Mathematische Ansätze zur Voraussage des Wasseranspruches

Packungen und deren geometrische Eigenschaften spielen unter anderem eine Rolle im Zusammenhang mit der Untersuchung gewisser physikalischer Eigenschaften von festen Materialien, Flüssigkeiten oder granularen Stoffen, wie dies auch Bindemittel / Zemente darstellen. Zur Simulation derartiger Packungen wurden theoretische Rechenmodelle entwickelt und verwendet. Allerdings war es bisher notwendig, diese Modelle durch geometrisch idealisierte Annahmen stark zu vereinfachen, um überhaupt zu verwertbaren Aussagen zu gelangen oder um einem allzu hohen Bedarf an Rechenleistung und Speicherkapazität vorzubeugen.

So liegt beispielsweise der bekannte Fullercurve zur Ermittlung einer optimalen Korngrößenverteilung für möglichst dichte Packungen ein Modell zugrunde, in dem die einzelnen Partikel als regelmäßig angeordnete Kugeln angenommen werden.

Diese Annahme ist jedoch keineswegs immer gerechtfertigt. Die Partikelform kann beträchtlich von der Kugelform abweichen.

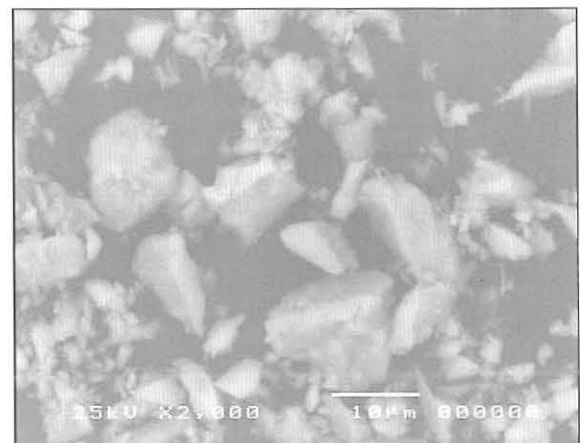


Bild 9: REM - Aufnahme CEM I

Außerdem ordnen sich Partikel unter natürlichen Bedingungen nicht immer regelmäßig an.

Es kann aber auf dem gegenwärtigen Entwicklungsstand beschrieben werden, wie die theoretischen Ergebnisse und numerischen Algorithmen zur Optimierung von Bindemitteln eingesetzt werden können um auf Grundlage der Ergebnisse korngroßenoptimierte Zemente zu entwickeln, welche durch eine deutliche Reduktion des Wasseranspruches die Problematik einer zu hohen Klebrigkeit kompensieren können.

Für eine gegebene Partikelform (Klinker vgl. Bild 9, Flugasche, Schlacke) und eine gegebene Korngrößenverteilung der Einzelkomponenten (Ausgangszemente und AHWZ's) können anschließend auf numerischem Weg geeignete Packungen im Rahmen des Verwendungszweckes simuliert werden, welche sich durch einen deutlich reduzierten Wasseranspruch auszeichnen. Im Zuge dessen kann eine Reduktion der Zusatzmittelchemie (FM) vorgenommen werden, was zu einer deutlichen Reduktion der Klebrigkeit führen kann.

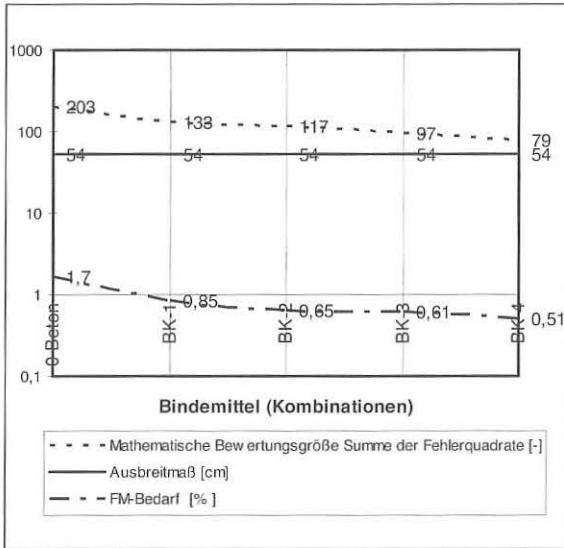


Bild 10: Mathematische Bewertungsgröße - Summe der Fehlerquadrate zur optimalen Summenfunktion

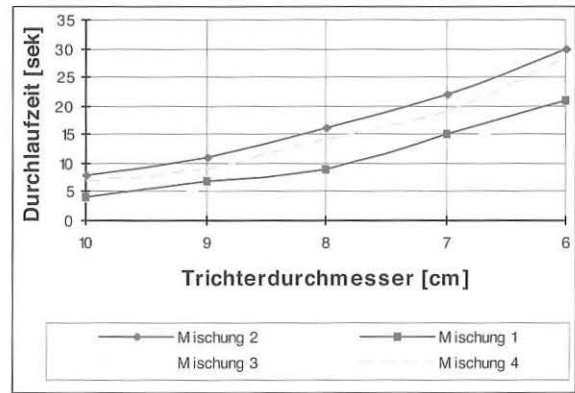


Bild 11: Ergebnis aus dem Kraftwiderstandssystem

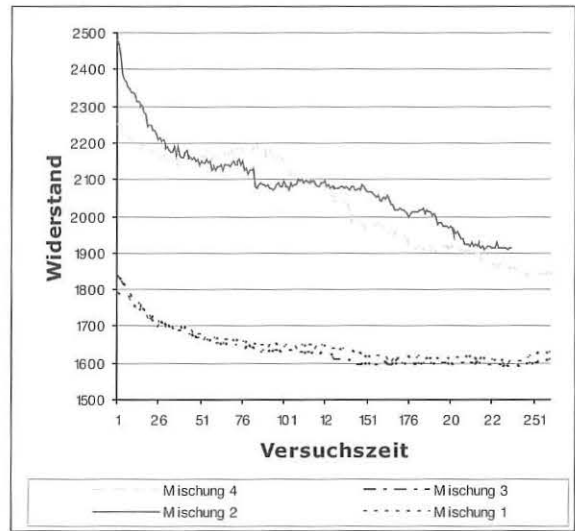


Bild 12: Ergebnis aus dem Kraftwiderstandssystem

	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4
Bindemittel	440 kg/m ³ CEM II A-S 42,5 R Hersteller A	440 kg/m ³ CEM II A-S 42,5 R Hersteller B	400 kg/m ³ CEM II A-S 42,5 R Hersteller A	400 kg/m ³ CEM II A-S 42,5 R Hersteller B
	0 kg/m ³ AHWZ	0 kg/m ³ AHWZ	50 kg/m ³ AHWZ	50 kg/m ³ AHWZ
Anrechenbarer Bindemittelgehalt	440 kg	440 kg	440 kg	440 kg
Zuschlag 70% 0/4, 30% 4/8	0/4	0/4	0/4	0/4
	4/8	4/8	4/8	4/8
Wasser	200 Liter	200 Liter	200 Liter	200 Liter
Summe der Fehlerquadrate (Bewertung des Wasseranspruches)	65 [-]	140 [-]	50 [-]	120 [-]
Fließmittel	0,43%	0,78%	0,38%	0,63%
Ausbreitmaß	53 cm	54 cm	54 cm	54 cm
Frischbetontemperatur	19,5 °C	19 °C	19 °C	19 °C
LP-Gehalt im Festbeton	2,0%	2,2%	2,2%	2,2%
Optische Bewertung der Klebrigkeit	Gering Klebrig	Klebrig	Gering Klebrig	Klebrig

Tab. 1: Mischungszusammensetzung

In Bild 10 wurde mit der Summe der Fehlerquadrate die Abweichung von 5 untersuchten Betonen von der dichtesten Packung dargestellt, es zeigt eine Optimierungsroutine der Bindemittel(kombinationen) für 5 Betone. Der 0-Beton wird durch Zugabe von abgestimmten AHWZ`s optimiert sodass infolge dessen durch eine deutliche Reduktion des Wasseranspruches eine Minimierung des Fließmittels durchgeführt werden kann. Als Endergebnis sinkt die Klebrigkeit deutlich.

5. Laboruntersuchungen

In der Tabelle 1 bzw. den Bildern 11 und 12 werden Ergebnisse dargestellt welche anhand von Labormischungen mit unterschiedlicher Klebrigkeit erreicht wurden.

In den durchgeführten Spritzversuchen wurden Ausgangsbindemittel verschiedener Hersteller (CEM II A-S 42,5R) verwendet, welche einen unterschiedlichen Wasseranspruch aufweisen und in Folge dessen unterschiedliche FM - Gehalte zur Einstellung einer konstanten Konsistenz benötigen. Durch den erhöhten FM - Gehalt wird die Klebrigkeit gesteigert (Mischung 1, Mischung 2).

Durch Zugabe von 50 kg AHWZ wird die KGV nach einem mathematischen Modell positiv modifiziert und die Klebrigkeit in Folge einer FM - Reduktion gesenkt (Mischung 3, Mischung 4). Es wurde je Mischung eine Spritzkiste hergestellt, welche bei einer Temperatur von 20 °C gelagert wurde.

In Bild 13 ist der unterschiedliche Festigkeitsverlauf aufgrund verschiedener Klebrigkeit der untersuch-

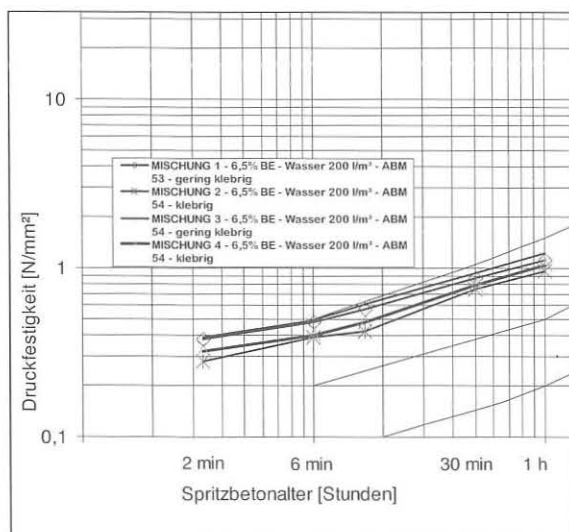


Bild 13: Frühfestigkeitsentwicklungen der Mischungen 1 - 4

ten Mischungen 1 - 4 (optische und anhand der Versuchseinrichtungen erhaltenen Bewertungen) ersichtlich.

Anhand der aus diesen Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse lässt sich ableiten, dass die im Labor erhaltenen Feststellungen durchaus mit den Ergebnissen aus der Praxis korrelieren. Eine zu hohe Klebrigkeit des Nassmischgutes kann eine reduzierte Frühfestigkeitsentwicklung durch quantitativ unkonstante Einmischung des BE`s bewirken.

6. Lösungsansätze

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen können zusammenfassend folgende Empfehlungen zur Verringerung der Klebrigkeit des Nass - Mischgutes gegeben werden:

- Verwendung von Bindemittel bzw. Bindemittelkombinationen, die durch Korngrößenoptimierung einen geringen Wasseranspruch und eine bessere Wirkung der Fließmittel bei geringerer Dosierung ermöglichen,
- Miteinbeziehung von Bindemittel, AHWZ`s und Feinteilen der Sieblinie in Wasseranspruchsrechnungen, wobei nicht die Quantität der vorliegenden Feinteile, sondern die Qualität (Verteilung) maßgeblichen Einfluss hat,
- Optimierung von Fließmittel im Bereich der Verarbeitbarkeit (Klebrigkeit) durch Entwicklung von Methoden zur objektiven Quantifizierbarkeit der Klebrigkeit.

7. Literatur

- [1] Ding, Y.; Thomaseth, D.; Niederegger, Ch.; Lukas, W.:
The investigation on the workability and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete. 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete. Varenna. Italy. Sept. 2004.
- [2] Niederegger, Ch.:
Dissertation. Technologische Eigenschaften von Betonen aus neuentwickelten Bindemitteln mit optimierten Bestandteilen. Dissertation, Universität Innsbruck. Oktober 2004.
- [3] Niederegger, Ch.; Thomaseth, D.:
Erhöhung der Dauerhaftigkeit durch optimierte Bindemittel. Sonderdruck Architektur & Bau Forum. Österreichische Bauzeitung. Sept. 2005.
- [4] Thomaseth, D; Niederegger, Ch.:
Bewertung der Klebrigkeit. Beton, Nov. 2005.

- [5] Niederegger, Ch.; Thomaseth, D.:
Zur Senkung des Wasseranspruches durch
korngroßenoptimierte Bindemittel. Concrete
Precast and Technology - CPI / BWI Springer
Verlag, 06/2005.
- [6] Sigloh, H.:
Technische Fluidmechanik. VDI Verlag, 3.
Auflage, Düsseldorf 1996.
- [7] Gehm, L.; Schelske-Gehm, J.:
<http://www.rheologie.de>, Mai 2005.