

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung: VDZ gGmbH
IGF-Vorhaben-Nr.: 18642 N
Bewilligungszeitraum: 01.04.2015 – 30.09.2017

Forschungsthema:

Einflüsse von Temperatur auf Wechselwirkungen zwischen Fließmittel und Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Wirkung von Fließmitteln wurde bislang nahezu ausschließlich bei Normaltemperatur, d. h. rd. 20 °C, und vorrangig in Kombination mit Portlandzement untersucht. Eine Vielzahl an Berichten aus Wissenschaft und Praxis belegt jedoch, dass Wechselwirkungen zwischen Fließmitteln und Zementen durch unterschiedliche Temperaturen wesentlich beeinflusst werden. In der Baupraxis sind 20 °C weniger die Regel als die Ausnahme und Fließmittel werden dem Beton i. Allg. bezogen auf die Zementmasse zugegeben. Heutzutage werden vorrangig Zementen mit einem durch weitere Hauptbestandteile verringerten Klinkeranteil und so deutlich reduzierter spezifischer CO₂-Emission verwendet. Bei von 20 °C abweichenden Temperaturen und insbesondere in Kombination mit Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen kann so ein und dieselbe Fließmittelart und -zugabemenge zu unerwünschten Reaktionen im Beton, wie bspw. zu unplanmäßig schnellem Konsistenzverlust, starker Nachverflüssigung mit ggf. Entmischung oder Verzögerung der Zementhydratation, führen. Damit verbunden ist meist ein Verlust der Verarbeitbarkeit des Frischbetons sowie ggf. auch eine verringerte Dauerhaftigkeit des Festbetons und somit eine verminderte Leistungsfähigkeit des Baustoffs Beton.

Zunehmend wird in Deutschland eine möglichst jahreszeitunabhängige Bautätigkeit angestrebt. Dies stellt an heißen Sommer- bzw. kalten Wintertagen eine Herausforderung für die Transportbetonindustrie dar, da Beton gemäß DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-3 beim Einbringen ohne weitere Maßnahmen eine Temperatur von mindestens +5 °C bis höchsten +30 °C aufweisen muss. Um bei extremen Außentemperaturen oder bei zeitweise auftretenden starken Schwankungen der Temperatur möglichst gleichbleibende Frischbetontemperaturen bzw. -eigenschaften zu gewährleisten, müssen dann die Betonausgangsstoffe und/oder der

Frischbeton temperiert werden. Dies ist allerdings mit erhöhtem logistischem, energetischem und finanziellem Aufwand sowie unternehmerischem Risiko verbunden.

Die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) erschweren sogar teilweise den Einsatz von PCE, denn gemäß der ZTV-ING Teil 3 – Massivbau, Abschnitt 1: Beton, Abschnitt 3.3 dürfen diese Fließmittel nur mit den gleichen Betonausgangsstoffen, mit denen die Erstprüfung durchgeführt wurde und nur in den Beton-temperaturbereichen, die der Erstprüfung zugrunde lagen, verwendet werden. PCE werden seit nunmehr fast 20 Jahren in Europa erfolgreich eingesetzt. Es existieren mittlerweile sicherlich ausreichend baupraktische, empirische Erfahrungen. Dennoch wird gefordert, in der Erstprüfung den in der Praxis zu erwartenden Temperaturbereich abzu prüfen.

2 Ziel und Umfang der Untersuchungen

Ziel des Forschungsvorhabens war es, grundlagenorientiert Einflüsse der Temperatur auf Wechselwirkungen zwischen Fließmittel und Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen zu bestimmen. Praxisgerecht wurden die Untersuchungen bei der für Frischbeton ohne weitere Maßnahmen zulässigen Mindest- und Maximaltemperatur von 5 °C und 30 °C sowie bei 20 °C als Referenz durchgeführt.

Die Untersuchungen umfassten sechs Arbeitspakete. Im Arbeitspaket 1 wurden die Ausgangsstoffe ausgewählt, beschafft und charakterisiert. Das Arbeitspaket 2 umfasste die Herstellung und Analyse von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen. In den Arbeitspaketen 3 bis 5 wurden systematisch Einflüsse der Prüftemperaturen von 5 °C, 20 °C und 30 °C auf Wechselwirkungen zwischen Fließmitteln und Portlandzement sowie Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen in einer Temperaturkammer bestimmt. Je Prüftemperatur wurden

- die Zusammensetzung der Porenlösung und das Zetapotenzial von Zementleim,
- rheologische Eigenschaften und die Konsistenz von Zementleim bzw. Beton,
- die Sorption und verflüssigende Wirkung der Fließmittel sowie
- die zeitabhängige Sorption der Fließmittel und deren Verflüssigungsdauer

untersucht. Die aus umfangreichen Untersuchungen an Zementleimen ermittelten Ergebnisse wurden in Betonversuchen im Arbeitspaket 6 überprüft.

3 Ergebnisse

3.1 Portlandzement

Mit von 30 °C auf 5 °C sinkender Prüftemperatur verringerte sich die Reaktivität der zwei untersuchten Portlandzemente. Aufgrund dessen wurde ein geringerer Anteil des Zugabewassers in/an erste Hydratphasen gebunden bzw. stand ein größerer Anteil zur Verflüssigung der Zemente zur Verfügung. Die Konsistenz der Zementleime wurde weicher.

Infolge der mit sinkender Prüftemperatur weicher werdenden Konsistenz bzw. der sich verringern den Zementreaktivität war weniger Fließmittelwirkstoff zur Verflüssigung erforderlich. Die Sättigungsdosierungen der Kombinationen mit Portlandzement und einem Fließmittel auf der Basis von Naphthalinsulfonat waren bei den drei Prüftemperaturen von 30 °C, 20 °C und 5 °C jeweils größer als die der zwei geprüften Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylat-ether (PCE). Je Prüftemperatur und Portlandzement wies das PCE zur Verwendung in Transportbeton größere Sättigungsdosierungen auf als das PCE für Beton für Fertigteile.

Das Naphthalinsulfonat verflüssigte die Leime mit Portlandzement unabhängig von der Prüftemperatur moderat. Die Verflüssigung ließ zeitnah nach. Steigende Temperaturen verstärkten den Rückgang der Verflüssigung. Das PCE für Transportbeton ermöglichte vergleichsweise unabhängig von der Prüftemperatur und dem Portlandzement eine moderate Verflüssigung von Zementleim sowie eine sehr lange Verflüssigungsdauer. Diese ließ mit steigender Prüftemperatur geringfügig stärker nach. Das PCE für Fertigteilbeton zeigte in Kombination mit beiden Portlandzementen jeweils ein ausgeprägt temperaturabhängiges Verhalten. Die verflüssigende Wirkung verringerte sich mit sinkender Prüftemperatur und die Dauer der Verflüssigung nahm deutlich zu. So wirkte dieses PCE bei 5 °C eher wie ein Transportbeton-PCE.

3.2 Portlandhütten- und Hochofenzemente

Steigende Anteile an Hüttensand im Zement führten bei 20 °C zu weicherer Konsistenzen von Zementleim, da sich die Wasseransprüche der Zemente verringerten und bei gleichem Wasserzementwert mehr Wasser zur Verflüssigung von Zementleim zur Verfügung stand. Dieser Effekt war bei 30 °C ausgeprägter als bei 5 °C. Bei 5 °C wirkten sich steigende Hüttensandanteile, aufgrund der geringen Zementreaktivität nicht wesentlich auf die Konsistenz der Zementleime aus.

Das Naphthalinsulfonat war auch in Kombination mit den hüttensandhaltigen Zementen weniger wirksam als die PCE. Je Fließmittel und Prüftemperatur verringerten sich die Sättigungsdosierungen von Zementleim mit steigender Substitution des Klinkers (reaktive, temperaturabhängige Komponente) im Zement durch den in der frühen Phase der Hydratation noch inaktiven Hüttensand. Dadurch dass der Hüttensand in der frühen Hydratationsphase noch inaktiv und somit von der Temperatur wenig beeinflusst ist, war die Sättigungsdosierung je Fließmittel ab einem Anteil an Hüttensand im Zement von 55 M.-% von der Prüftemperatur vergleichsweise unabhängig. Die in umfangreichen Untersuchungen an Zementleimen erhaltenen Ergebnisse wurden mit dem Zement mit 55 M.-% Hüttensand und den beiden PCE bei 5 °C sowie 30 °C in Betonversuchen überprüft und bestätigt.

Das Naphthalinsulfonat verflüssigte auch die Leime mit hüttensandhaltigem Zement moderat und die Wirkung ließ ebenfalls zeitnah nach. Steigende Anteile an Hüttensand vergleichmäßigten die Konsistenzhaltung der Zementleime mit dem Naphthalinsulfonat, insbesondere bei der Prüftemperatur von 30 °C. Das PCE für Transportbeton ermöglichte unabhängig vom Hüttensandanteil im Zement und vergleichsweise unabhängig von der Prüftemperatur eine moderate Verflüssigung von Zementleim sowie eine sehr lange Verflüssigungsdauer. Diese ging mit steigender Prüftemperatur geringfügig eher und etwas stärker zurück. Das PCE für Beton für Fertigteile wies auch in Kombination mit den hüttensandhaltigen Zementen das mit dem Portlandzement (gleiche Klinker- und Sulfatkomponente) festgestellte, ausgeprägte temperaturabhängige Verhalten auf. Der Einfluss der Prüftemperatur auf die Wirkung dieses PCE verringerte sich mit steigendem Anteil an Hüttensand im Zement.

3.3 Zemente mit Flugasche

Die für die hüttensandhaltigen Zemente beschriebenen Zusammenhänge gelten grundsätzlich auch für Zemente mit bis zu 55 M.-% puzzolanisch reagierender, zum Untersuchungszeitpunkt ebenfalls noch inaktiven bzw. von der Temperatur wenig beeinflussten kieselsäurereichen Flugasche. Bei Verwendung des Zements mit 55 M.-% Flugasche war, infolge der größeren spezifischen Oberfläche der Flugasche verglichen mit dem Hüttensand (Kapitel 3.2), infolge unspezifischer Sorption etwas mehr Wirkstoff zur Verflüssigung von Zementleim bzw. zur Erreichung des Sättigungspunkts erforderlich als bei gleichem Anteil an Hüttensand im Zement.

Das PCE für Transportbeton ermöglichte eine moderate Verflüssigung der Zementleime mit flugaschehaltigen Zementen. Diese ließ mit steigender Prüftemperatur in etwas stärkerem Maße nach als die Wirkung in der Kombination mit Portlandzement bzw. hüttensandhaltigen Zementen. Das PCE für Beton für Fertigteile wies auch in Kombination mit dem Zement mit Flugasche das mit den hüttensandhaltigen Zementen und mit dem Portlandzement Z11 festgestellte, ausgeprägte temperaturabhängige Verhalten auf. Auch in Kombination mit Flugasche vergleichmäßigten steigende Anteile im Zement die temperaturabhängige Wirkung dieses PCE.

3.4 Zemente mit getempertem Ton

Aufgrund der relativ großen spezifischen Oberfläche von getempertem Ton führten steigende Anteile zu größeren Wasseransprüchen der Zemente und so zu steiferen Konsistenzen der Zementleime. Dies wirkte sich insbesondere bei 5 °C, aufgrund der verringerten Zementreaktivität, deutlicher aus.

Die zur Verflüssigung von Zementleim mit Zementen mit getempertem Ton erforderliche Menge an Naphthalinsulfonat erhöhte sich mit dem Anteil an getempertem Ton, infolge dessen großer spezifischer Oberfläche, insbesondere bei 5 °C. Die entsprechende Menge an Naphthalinsulfonat war stets größer als die an PCE. Der erforderlichen Wirkstoffmengen an Fertigteil-PCE erhöhten sich nur geringfügig mit steigendem Anteil an getempertem Ton im Zement und mit steigender Prüftemperatur. Die zur Verflüssigung erforderlichen Mengen an Transportbeton-PCE änderten sich bei den Prüftemperaturen von 5 °C und 20 °C mit steigendem Anteil an getempertem Ton im Zement nur unwesentlich. Sie verringerten sich jedoch mit dem Anteil an getempertem Ton bei 30 °C.

Das Naphthalinsulfonat verflüssigte auch die Leime mit den Zementen mit getempertem Ton moderat und die Wirkung ließ ebenfalls zeitnah nach. Steigende Anteile an getempertem Ton im Zement verringerten dies insbesondere bei der Prüftemperatur von 30 °C. Das PCE für Transportbeton ermöglichte unabhängig vom Anteil an getempertem Ton im Zement und vergleichsweise unabhängig von der Prüftemperatur eine moderate Verflüssigung von Zementleim sowie eine lange Verflüssigungsdauer. Diese ließ mit steigender Prüftemperatur geringfügig früher und in etwas stärkerem Maße nach. Steigende Anteile an getempertem Ton im Zement vergleichmäßigten die temperaturabhängige Wirkung des PCE für Beton für Fertigteile.

3.5 Portlandkalksteinzement

Vergleichbar mit der Klinkersubstitution durch 35 M.-% getempertem Ton wirkten sich 35 M.-% an Kalkstein mit hohem Anteil an tonigen Bestandteilen (spezifische BET-Oberfläche des verwendeten Kalksteinmehls rd. 68101 cm²/g) auf den Wasseranspruch des Zements, die Konsistenz von Zementleim und die Fließmittelwirkung aus.

Das Naphthalinsulfonat ermöglichte bei der Prüftemperatur von 30 °C eine moderate Verflüssigung des Leims mit Portlandkalksteinzement. Diese ließ mit der Versuchsdauer in gleicher Weise nach wie kombiniert mit dem Zement mit 35 M.-% getempertem Ton bzw. etwas stärker als in Kombination mit dem Portlandzement. Mit dem PCE für Transportbeton war bei allen drei Prüftemperaturen eine moderate Verflüssigung des Leims mit Portlandkalksteinzement einstellbar. Sie ließ mit steigender Prüftemperatur in etwas stärkerem Maße nach als in Kombination mit dem Portlandzement bzw. dem Zement mit 35 M.-% getempertem Ton. Das PCE für Beton für Fertigteile wies wiederum ein ausgeprägtes temperaturabhängiges Verhalten auf.

4 Zusammenfassung

Die Wirkung von Fließmitteln wird in Forschungsvorhaben häufig nur bei Normaltemperatur, d. h. rd. 20 °C, bestimmt. Ziel des Forschungsvorhabens war es daher, grundlagenorientiert Wechselwirkungen zwischen Fließmittel und Zementen bei der Prüftemperatur von 30 °C (Sommerbetonage) und 5 °C (Winterbetonage) zu bestimmen.

Die Reaktivität bzw. Hydratation von Portlandzement verringerte sich mit von 30 °C auf 5 °C sinkender Temperatur. Infolgedessen war bei 5 °C weniger Zugabewasser an/in erste Hydratphasen gebunden bzw. ein größerer Anteil des Zugabewassers stand zur Verflüssigung der Zemente zur Verfügung und somit stellten sich weichere Konsistenzen der Portlandzementleime ein. Mit sinkender Prüftemperatur bzw. Zementreaktivität verringerten sich die zur Verflüssigung der Leime mit Portlandzement erforderlichen Mengen an Fließmittelwirkstoff sowie die Sättigungsdosierungen, da mehr freies Wasser vorhanden war und weniger Hydratphasen mit Wirkstoff zu belegen waren. Unabhängig von der Prüftemperatur musste zur gleichen Verflüssigung von Zementleim bzw. zur Erreichung der Sättigungsdosierung mehr Fließmittel auf der Basis von Naphthalinsulfonat als Polycarboxylatether (PCE) zugegeben werden. Die verflüssigende Wirkung eines PCE für Fertigteilbeton war unabhängig von der Prüftemperatur und vom Portlandzement stets größer als die eines PCE für Transportbeton.

Der Einfluss der Prüftemperatur auf die erforderlichen Fließmittelzugabemengen und die Sättigungsdosierungen sowie die Zementreaktivität verringerte sich mit steigender Substitution des Klinkers (reaktive, temperaturabhängige Komponente) im Zement durch die in der frühen Phase der Hydratation noch inaktiven und somit von unterschiedlichen Temperaturen deutlich weniger beeinflussten weiteren Hauptbestandteile Kalkstein, getempertem Ton, Flugasche oder Hüttensand. Deren Eigenschaften, insbesondere die granulometrischen, bestimmten dann in steigendem Maße die Konsistenz von Zementleim sowie die zur Verflüssigung erforderlichen Wirkstoffzugabemengen und die Sättigungsdosierungen.

Wurde Klinker durch Flugasche oder Hüttensand ersetzt, stellten sich mit steigendem Anteil im Zement und insbesondere bei der Prüftemperatur von 30 °C weichere Konsistenzen und geringere erforderliche Wirkstoffzugabemengen bzw. Sättigungsdosierungen ein. Zurückge-

führt wird dies auf die verbesserte Partikelgrößenverteilung der flugasche- bzw. hüttensandhaltigen Zemente sowie auf die geringe spezifische Oberfläche des jeweiligen Zementhauptbestandteils im Vergleich zum hydratisierenden Portlandzement. Dies verringerte die Wasseransprüche der Zemente sowie die mit Wirkstoff zu belegende Oberfläche. Proben mit Zementen mit 55 M.-% Flugasche bzw. Hüttensand oder 80 M.-% Hüttensand wiesen so jeweils eine von der Prüftemperatur vergleichsweise unabhängige, geringe Sättigungsdosierung von Zementleim bzw. Beton auf. Aufgrund der geringeren spezifischen Oberfläche des Hüttensands war die Sättigungsdosierung von Zementleim mit hüttensandhaltigem Zement geringer als die von Zementleim mit Zement mit gleicher Menge an Flugasche. Unabhängig von den Zementen und der Prüftemperatur war zur gleichen Verflüssigung wiederum mehr Naphthalinsulfonat als PCE erforderlich. Die erforderliche Menge an Transportbeton-PCE verringerte sich mit steigendem Anteil an Flugasche oder Hüttensand im Zement auf die an PCE für Fertigteilbeton.

Getemperter Ton oder Kalkstein, der Tonminerale enthielt, führte mit steigendem Anteil im Zement, aufgrund der deutlich größeren spezifischen Oberfläche im Vergleich zum Hüttensand, zu steiferen Konsistenzen von Zementleim sowie je nach Art des Fließmittels insbesondere bei der Prüftemperatur von 5 °C zu teilweise höheren Sättigungsdosierungen und mehr Fließmittel war zur gleichen Verflüssigung erforderlich. Quellfähige Tonminerale in Kalkstein, in getempertem Ton oder in der Feinfraktion der Gesteinskörnung können die Wirksamkeit von PCE deutlich verringern. So war mit steigendem Anteil an getempertem Ton bzw. tonmineralhaltigem Kalkstein im Zement zur gleichen Verflüssigung von Zementleim mehr Fertigteil-PCE erforderlich. Die Menge an Transportbeton-PCE verringerte sich mit steigender Substitution der Portlandzementkomponente. Abermals weniger wirksam als die PCE war das Naphthalinsulfonat. Die Wirksamkeit des Naphthalinsulfonats verringerte sich mit steigendem Anteil an getempertem Ton im Zement insbesondere bei der Prüftemperatur von 5 °C. Der Portlandkalksteinzement beeinflusste die Wirksamkeit des Naphthalinsulfonats im Vergleich mit dem Portlandzement nicht wesentlich.

Mit dem PCE für Transportbeton konnte die angestrebte, moderate Verflüssigung von Zementleim bzw. Beton mit planmäßig langer Verflüssigungsdauer bis zu zwei Stunden vergleichsweise unabhängig vom Zement und von der Prüftemperatur eingestellt werden. Die verflüssigende Wirkung dieses PCE erhöhte sich bzw. die Verflüssigungsdauer verlängerte sich geringfügig mit von 20 °C auf 5 °C sinkender Prüftemperatur. Zu starker Nachverflüssigung kam es nicht. Bei der Prüftemperatur von 30 °C ließ die Verflüssigung etwas früher nach. Die verflüssigende Wirkung des PCE für Fertigteilbeton war hingegen deutlich von der Prüftemperatur abhängig. Mit von 20 °C auf 30 °C steigender Prüftemperatur war die Verflüssigung von Zementleim bzw. Beton ausgeprägter und die Verflüssigungsdauer kürzer. Bei der Prüftemperatur von 5 °C wirkte dieses PCE unplanmäßig, eher wie ein PCE für Transportbeton, indem es nur moderat verflüssigte und kaum ein Rückgang der Verflüssigung von Zementleim bzw. Beton mit der Versuchsdauer auftrat. Der Zement beeinflusste die jeweilige Wirkungsweise dieses PCE nicht wesentlich. Steigende Anteile an weiterem Hauptbestandteil neben Klinker im Zement vergleichmäßigten die temperaturabhängige Wirkungsweise dieses PCE. Das Naphthalinsulfonat wies stets die erwartete Wirkung (moderate Verflüssigung bei hoher Zugabemenge und moderate Verflüssigungsdauer) auf. Sie verlängerte sich geringfügig mit steigender Klinkersubstitution und mit sinkender Prüftemperatur.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 18642 N der Forschungsvereinigung VDZ gemeinnützige GmbH – VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.