

Donald J. Janssen¹, Julie M. Vandenbossche², Amir Koubaa²

¹ Civil Engineering University of Washington, Seattle/USA

² Civil and Environmental Engineering University of Pittsburgh, Pittsburgh/USA

Optimierter Einsatz von feinzerkleinertem Recyclingbeton in Schlackenzement*

Zusammenfassung: Gemahlener Hüttensand kann zu einem recht hohen Anteil mit gewöhnlichem Portlandzement gemischt werden, um ein Produkt mit ausgezeichneten Langzeitfestigkeitseigenschaften herzustellen. Dadurch werden sowohl der Anteil der für die Produktion erforderlichen Energie wie auch die Menge des freigesetzten Kohlendioxids reduziert. Allerdings ist die anfängliche Reaktionsgeschwindigkeit gering, wenn hohe Anteile von Schlacke (25 bis 40 % oder mehr) eingebracht werden. Die Zugabe von feinzerkleinertem Recyclingbeton zu zugemahlenem Schlackenzement gestattet eine weitere Verringerung des Anteils von Portlandzement im Endgemisch und verbessert in einigen Fällen die Anfangsreaktionsgeschwindigkeit des Gemisches.

Optimizing the use of recycled concrete fines in slag-cement*

Summary: Ground granulated blast furnace slag (GGBFS) can be blended at fairly high proportions with ordinary Portland cement to produce a material with excellent long-term strength properties. This combination has the advantage of reducing both the amount of energy required for production as well as the amount of carbon dioxide released. Unfortunately, when high proportions of slag (> 25 to 40 % or more) are used, the early rate of reaction is slow. The addition of recycled concrete fines to interground slag-cement allows for the further reduction of Portland cement in the final mixture, and in some cases improves the early reaction rate of the blend.

1 Einleitung

Portlandzement ist ein vielseitig einsetzbarer Baustoff, der für eine moderne Infrastruktur, wie z. B. Gebäude, Brücken, Straßen und Dämme, wichtig ist. Die Produktion von Portlandzement erfordert eine beachtliche Menge an Energie (0,2 bis 0,35 kWh/kg Zement). Fortschritte in der Technologie haben bereits den Energieverbrauch im Zusammenhang mit der Zementproduktion reduziert, und weitere technologische

* Beitrag basiert auf einem Vortrag, präsentiert auf der ibausil 2006; mit freundlicher Genehmigung der Organisatoren.

1 Introduction

Portland cement is a versatile construction material that is essential for modern infrastructure such as buildings, bridges, roads and dams. The production of Portland cement requires considerable energy (0.2 to 0.35 kWh/kg cement). Advances in technology have reduced the energy consumption associated with cement production and continued technological advances promise to continue this trend. Even with technological

* Contribution is based on a presentation at the ibausil 2006, permission for printing by the organisers is gratefully acknowledged.

Verbesserungen versprechen eine Fortsetzung dieses Trends. Trotz technologischen Fortschritts ist die Zementproduktion immer noch ein energieintensiver Prozess.

Der Energieverbrauch ist jedoch nicht der einzige wichtige Faktor bei der Herstellung von Portlandzement. Kalkstein ist einer der Rohstoffe für die Produktion von Portlandzement. Bei der Umwandlung des Kalksteins von Calciumcarbonat zu Calciumoxid werden beträchtliche Mengen von Kohlendioxid freigesetzt. Diese Menge freigesetzten Kohlendioxids zusammen mit dem bei der Energieerzeugung für die Herstellung von Portlandzement freigesetzten Kohlendioxid ergibt eine Gesamtmenge an freigesetztem Kohlendioxid von bis zu 1 kg CO₂ pro kg produzierten Zements [1]. Es wird geschätzt, dass die Weltzementproduktion für ca. 5–8 % der gesamten Kohlendioxidemissionen verantwortlich ist [2].

Eine Reihe von alternativen Rohstoffen werden bereits als Zusatzstoffe zu Portlandzement verwendet, um die Menge des tatsächlich benötigten Zements (und damit die Menge des freigesetzten Kohlendioxids) zu reduzieren. Flugasche und gemahlener Hüttensand sind zwei der wichtigsten dieser Zusatzstoffe. Flugasche ist ein Nebenprodukt von Kohlekraftwerken, und gemahlener Hüttensand fällt als Nebenprodukt beim Frischen von Eisen an. Gemahlener Hüttensand hat an sich bereits latent hydraulische Eigenschaften und benötigt zur Hydratation sowohl Wasser als auch entweder Natriumhydroxid oder Kalziumhydroxid. Da Portlandzement einen Überschuss an Kalziumhydroxid produziert, kann ein Gemisch aus Portlandzement und gemahlenem Hüttensand ein gut verwendbares Bindemittel sein, sogar bei 40 % und mehr Zementersatz.

Leider ist bei vielen Anwendungen von Beton mit Portlandzement in der Hochbauindustrie eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit in den ersten Tagen nach dem Einbringen des Betons erforderlich. Das ist vor allem deswegen wichtig, um einen Verzug beim Baugeschehen zu vermeiden. Die Auftraggeber wollen oft, dass die Schalung innerhalb von zwei bis drei Tagen nach Einbringen des Beton entfernt wird, um mit einem anderen Teil des Gebäudes fortzufahren. Der Beton muss daher eine geeignete Festigkeit haben, um sein eigenes Gewicht beim Entfernen der Verschalung zu tragen. Andere Bauverfahren, wie z. B. das Vorspannen von Kabeln mit nachträglichem Verbund, erfordern ebenfalls eine Frühfestigkeit. Die meisten Mischungen aus Portlandzement und gemahlenem Hüttensand (besonders bei einem hohen Prozentsatz von Zementersatz) neigen dazu, wesentlich langsamer als Portlandzement allein zu reagieren. Daher muss ein kostengünstiges Verfahren gefunden werden, um die Geschwindigkeit des Frühfestigkeitsgewinns zu beschleunigen, um Gemische aus Portlandzement und gemahlenem Hüttensand für die meisten Hochbauvorhaben akzeptabel zu machen.

Es ist seit langem bekannt, dass feingemahlene Partikel von hydratisiertem Portlandzement eine stark beschleunigende Wirkung auf die Hydratation von Beton mit Portlandzement haben [3]. Man nimmt an, dass diese Wirkung vor allem auf die hydratisierten Partikel zurückzuführen sind, die als Kristallisationszentren wirken und damit die Hydratationsreaktion erleichtern. Geringfügige Beschleunigungseffekte können auch auf das Kalziumhydroxid und/oder Alkalien im hydratisierten Portlandzement zurückgeführt werden. Während das Mischen, die Nachbehandlung und das Mahlen von Portlandzementpaste

advances cement production is still an energy intensive process.

Energy consumption, however, is not the only concern with Portland cement production. Limestone is one of the primary raw materials used in Portland cement production, and the conversion of limestone from calcium carbonate to calcium oxide releases considerable carbon dioxide. This carbon dioxide release, combined with the carbon dioxide released by the energy production for Portland cement manufacturing results in the total release of up to a kg of carbon dioxide for every kg of cement produced [1]. Cement production worldwide is estimated to account for approximately 5–8 % of the total carbon dioxide emissions [2].

A number of by-product materials have been used as additives to Portland cement in order to reduce the amount of actual cement required (and therefore the amount of carbon dioxide released). Principal among these additives are fly ash and ground granulated blast furnace slag (GGBFS). Fly ash is a by-product of coal-burning power plants, and GGBFS is a by-product of iron refining. GGBFS is somewhat cementitious on its own, and requires both water and either sodium hydroxide or calcium hydroxide to hydrate. Since Portland cement produces excess calcium hydroxide, a blend of Portland cement and GGBFS can be an effective cementitious material even at cement replacements of 40 % and higher.

Unfortunately, many applications for Portland cement concrete in the building industry require rapid reaction rates during the first few days after the concrete is placed. This is primarily important in order to avoid delaying the construction process. Contractors often want to remove formwork within two or three days after concrete has been placed in order to proceed with another part of the building. The concrete must have adequate strength to support its own weight during the form-removal process. Other construction processes, such as stressing post-tensioning cables, also require strengths at early ages. Most Portland cement-GGBFS blends (especially at higher cement replacement levels) tend to react significantly more slowly than Portland cement alone, and some cost-effective method must be found to accelerate the rate of early strength gain to make Portland cement-GGBFS blends acceptable for most building construction.

It has long been known that finely-ground particles of hydrated Portland cement can have a significant accelerating effect on the hydration rate of Portland cement concrete [3]. This effect is believed to be primarily due to the hydrated cement particles acting as nucleation sites, making it easier for the hydration reaction to take place. Minor accelerating effects may also be due to calcium hydroxide and/or alkalies in the hydrated Portland cement. While mixing, curing and then grinding Portland cement paste would not be a cost-effective method of producing the desired acceleration, hydrated Portland cement is already present in some materials that would otherwise be considered waste.

One waste material source for hydrated cement paste is the recycling of Portland cement concrete by crushing. Crushing Portland cement concrete produces a considerable amount of fine material (referred to as recycled concrete dust, or RCD), including particles of hydrated cement paste. The actual amount

kein kostengünstiges Verfahren zum Erreichen der gewünschten Beschleunigung darstellt, ist hydratisierter Portlandzement bereits in einigen Materialien vorhanden, die man sonst als Abfall betrachten würde.

Eine Quelle von Abfallmaterial für hydratisierte Zementpaste stellt das Recycling von Beton mit Portlandzement mit Hilfe der Hartzerkleinerung dar. Beim Zerkleinern von Beton mit Portlandzement wird eine beachtliche Menge an Feingut (als wiederaufbereitetes Betonmehl oder RCD bezeichnet) und Partikeln hydratisierter Zementpaste produziert. Die tatsächliche Menge an hydratisierter Zementpaste im RCD hängt sowohl vom Ausgangsbeton als auch vom Zerkleinerungsverfahren ab. Die optimale Menge, die einem Gemisch aus Portlandzement und gemahlenem Hüttensand beizugeben ist, um die gewünschte Beschleunigung zu erreichen, muss für jeden Recyclingvorgang neu bestimmt werden.

Eine weitere Quelle von Abfallmaterial ist das Material, das anfällt, wenn Betonfahrzeuge (und andere Ausrüstungen für Beton, wie z. B. Mischer) gewaschen werden. Die Zuschlagstoffe können zwecks Wiederverwendung aus dem ausgewaschenen Material (washed-out fines, WOF) ausgesiebt werden, aber das ausgespülte Feingut, das in Absetzbecken oder mit Hilfe anderer Gewinnungsmethoden gesammelt wird, gilt generell als Abfallstoff. Dieses ausgewaschene Feingut enthält hydratisierte Zementpartikel. Die tatsächliche Menge an hydratisierten Zementpartikeln hängt stark von dem Beton ab. Daher muss die optimale Menge an ausgewaschenem Feingut bei jeder Quelle neu bestimmt werden.

2 Forschungsmethodik

Die Forschung zur Entwicklung einer optimalen Kombination von Portlandzement, gemahlenem Hüttensand und entweder RCD oder ausgewaschenem Feingut zum Erreichen einer akzeptablen Frühfestigkeit sowie einer guten Langzeitfestigkeit wurde in drei Richtungen vorangetrieben. Der erste Teil bestand darin, eine zusammen vermahlene Mischung aus Portlandzementklinker und gemahlenem Hüttensand herzustellen, deren Kohlendioxidemission beträchtlich reduziert war (gemessen durch den Ersatz von Zementklinker) und die dennoch eine gute Langzeitfestigkeit aufwies. Der zweite Teil bestand aus einem Machbarkeitsbeweis um zu belegen, dass hydratisierte Zementpaste aus einem Abfallprodukt die frühe Reaktionsgeschwindigkeit beschleunigen kann. Der dritte und letzte Teil befasste sich mit der Entwicklung einer Methode der Optimierung der Menge des Abfallmaterials, das hydratisierte Zementpaste enthielt und das dem Gemisch aus Portlandzement und gemahlenem Hüttensand zugegeben wird, um eine gute Frühfestigkeit zu erreichen. Diese Optimierungsmethode musste schnell, relativ einfach zu handhaben und in der Lage sein, mehrere Abfallstoffgehalte gleichzeitig zu erfassen, so dass die optimale Dosierung eines Abfallmaterials in einem Schritt bestimmt werden konnte.

Die bei diesen Arbeiten verwendeten Materialien waren Portlandzementklinker, der zur Herstellung von Zement Typ I eingesetzt wird, gemahlener Hüttensand mit einem Glasehalt von mehr als 95 % (auf der Grundlage optischer Eigenschaften, die unter einem Durchlichtpolarisationsmikroskop betrachtet wurden), RCD (durch Sieben des Materials mit einer Größe von weniger als 75 µm nach dem Mahlen des Portlandzement

of hydrated cement paste in the RCD depends upon both the original concrete and the crushing process. The optimal amount of RCD to be added to a Portland cement-GGBFS blend to provide the desired acceleration would need to be determined for each recycling operation.

Another waste material source is the material that is obtained when concrete trucks (and other concrete handling equipment such as mixers) are washed out. The aggregates can be screened out of the wash-out material for re-use, but the wash-out fines (WOF) that are collected in settling ponds or other extraction methods are generally waste materials. These WOF contain hydrated cement particles, and the actual amount of hydrated cement particles depends upon the concrete being used. The optimal amount of WOF would need to be determined for each WOF source.

2 Research Approach

The research to develop an optimal combination of Portland cement, GGBFS and either RCD or WOF for producing acceptable early strength as well as good long-term strength was conducted in three parts. The first part consisted of producing an interground blend of Portland cement clinker and GGBFS that resulted in considerably reduced carbon dioxide emissions (as measured by cement clinker replacement) while still providing good long-term strength. The second part was a proof-of-concept to verify that hydrated cement paste from a waste product could accelerate the early reaction rate, and the final part was to develop a method to optimize the amount of hydrated cement paste-containing waste material to add to the Portland cement-GGBFS blend to provide good early strengths. This optimization method would need to be quick, relatively easy to use, and able to accommodate multiple waste-material contents at once so that the optimal waste material content could be determined in a single step.

The materials used in this work included Portland cement clinker used to produce Type I cement, GGBFS with a glass content greater than 95 % (based on optical properties viewed under a transmitted light polarizing microscope), RCD (obtained by sieving the minus 75-µm material after crushing Portland cement concrete that had been moist-cured for more than 28 days) and WOF (obtained from a settling pond at a concrete batch plant). Microscopic examination of the RCD indicated that it contained 70–75 % hydrated cement and 2–4 % unhydrated cement. Analysis of the WOF showed 90–94 % hydrated cement and 2–3 % unhydrated cement.

3 Portland Cement-GGBFS Blend

Various combinations of Portland cement clinker (with gypsum added) and GGBFS were interground to produce the cementitious material. The material was ground in a laboratory ball-mill and checked every 500 revolutions for fineness by mechanical sieving. Once the material had at least 93 % passing the 75-micron sieve, it was wet sieved to verify that at least 80 % passed the 45-micron sieve. Once these two criteria were met, grinding was considered complete. Due to the harder nature of the GGBFS, mixtures with larger amounts of GGBFS required more grinding. The mixture with no GGBFS required 2500 revolutions in the ball mill, while the 60 % clinker–40 % GGBFS required 3500 revolutions.

enthaltenden Betons und das mehr als 28 Tage mit Feuchtigkeit nachbehandelt wurde) sowie ausgewaschenes Feingut (aus einem Absetzteich einer Betondosieranlage). Die mikroskopische Untersuchung des RCD ergab, dass es 70–75 % hydratisierten Zement und 2–4 % nicht hydratisierten Zement enthielt. Die Analyse des ausgewaschenen Feinguts ergab 90–94 % hydratisierten Zement und 2–3 % nicht hydratisierten Zement.

3 Gemisch aus Portlandzement und gemahlenem Hüttensand

Verschiedene Kombinationen von Portlandzementklinker (mit Gipszusatz) und gemahlenem Hüttensand wurden zusammen vermahlen, um ein zementartiges Material herzustellen. Das Material wurde in einer Laborkugelmühle gemahlen und durch mechanisches Absieben nach jeweils 500 Umdrehungen hinsichtlich der Feinheit geprüft. Wenn wenigstens 93 % des Materials das Sieb von 75 µm passierten, wurde es nassgesiebt, um nachzuweisen, dass wenigstens 80 % das Sieb von 45 µm passierten. Wenn diese beiden Kriterien erfüllt waren, wurde der Mahlvorgang als beendet betrachtet. Da gemahlener Hüttensand härter ist, benötigt man für das Mahlen von Mischungen mit größeren Anteilen gemahlenen Hüttensands mehr Zeit. Für ein Gemisch ohne gemahlenen Hüttensand waren 2500 Umdrehungen in der Kugelmühle erforderlich, während für ein Gemisch aus 60 % Klinker und 40 % gemahlenem Hüttensand 3500 Umdrehungen gebraucht wurden.

Die Mischungen wurden mit einem Wasserzementfaktor von 0,485 zubereitet. Als Zuschlagstoff wurde Normenquarzsand (98 % Siebdurchgang bei 600 µm und 2 % bei einem Sieb mit 150 µm) mit einem Sandzementfaktor von 2,75 verwendet. Für die Festigkeitsprüfung wurden 50 Würfel hergestellt. Die Ergebnisse der Untersuchung der Druckfestigkeit zeigten, dass diese nach 1, 3 und 7 Tagen bei Mischungen mit einem Anteil von mehr als 40 % gemahlenem Hüttensand im Vergleich zu anderen Mischungen mehr abnahm. Daher wurde eine Mischung von 60 % Portlandzement und 40 % gemahlenem Hüttensand als zementartiges Material für die restlichen Untersuchungen eingesetzt, über die in diesem Beitrag berichtet wird.

4 Machbarkeitsnachweis

Wie vorher beschrieben, wurden drei zementartige Materialien in 50-mm-Würfeln für die Festigkeitsprüfung vorbereitet. Das zementartige Standardmaterial bestand aus 60 % Portlandzement und 40 % gemahlenem Hüttensand. 5 % RCD (Masseprozent) wurden dem zementartigen Standardmaterial zugegeben um zu bestimmen, ob RCD die Frühfestigkeit verbessern kann. Diese Menge wurde willkürlich gewählt als Annahme einer Menge, die den Festigkeitsgewinn beschleunigt ohne die Langzeitfestigkeit zu verringern. Das Gemisch bestand dann real aus 57 % Portlandzement, 38 % gemahlenem Hüttensand und 5 % RCD. Es wurde ein drittes Gemisch mit 100 % gemahlenem Klinker als zementartiges Material zu Vergleichszwecken vorbereitet. Die Druckprüfung wurde nach 1 und nach 3 Tagen durchgeführt (Tabelle 1).

Der Zusatz von 5 % RCD erhöhte die Festigkeit im Vergleich zur Mischung 60:40 sowohl nach 1 als auch nach 3 Tagen. Der Wert nach einem Tag ist noch nicht so gut wie bei Portlandzement allein, aber nach drei Tagen ist der Unterschied bereits

Mixtures were prepared using a water-cementitious ratio (w/cm) of 0.485. Standard silica sand (98 % passing a 600 µm sieve, 2 % passing a 150 µm sieve) was used as the aggregate at a sand-cementitious ratio of 2.75, and 50-mm cubes were prepared for strength testing. Compressive strength results indicated that the decrease in strength at ages of 1, 3 and 7 days was more pronounced for mixtures with greater than 40 % GGBFS. Therefore, a 60 % Portland cement–40 % GGBFS blend was used as the cementitious material for the remaining testing reported in this paper.

4 Proof of Concept

Three cementitious materials were prepared for strength testing using 50-mm cubes, as described previously. The standard cementitious material was 60 % Portland cement and 40 % GGBFS. 5 % RCD (by mass) was added to the standard cementitious material for determining if RCD could improve early strength. This amount was arbitrarily selected as a guess of an amount that would accelerate strength gain without reducing long-term strength. This resulted in a mixture that actually had 57 % Portland cement, 38 % GGBFS and 5 % RCD. A third mixture was prepared with 100 % ground clinker as the cementitious material for comparison purposes. Compression tests were conducted at ages of 1, and 3 days (Table 1).

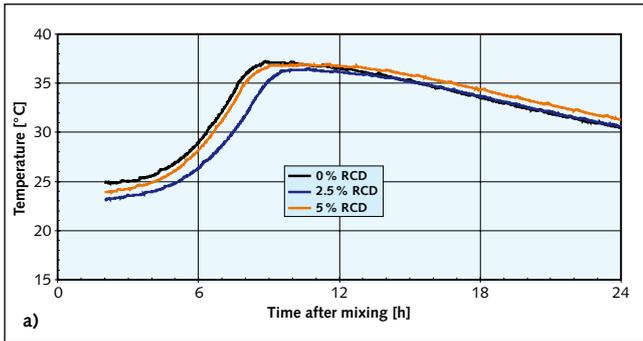
The addition of 5 % RCD increased strength at both early ages tested, when compared to the 60–40 mixture. The performance at one day is still not as good as Portland cement alone, but the difference is very small at three days. This is especially promising since the RCD was counted in the cementitious material when w/c ratio was determined. Also, the addition of RCD effectively lowers the Portland cement content in the mixture.

5 RCD Optimization

Early heat of hydration was determined to be an appropriate parameter to measure and to evaluate the optimal RCD content. Mixtures were prepared as mentioned previously, and samples of approximately 400 g were placed in small Styrofoam cups. These samples had a thermocouple inserted into the centre of the mortar, and they were then individually insulated. Samples were prepared with RCD substitution rates of 0.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 and 12.5 % by mass of total cementitious material. Approximately three hours total was required to prepare mixtures and specimens for the six mixtures. The thermocouples were connected to an automated data recording system, and temperatures were monitored for a period of three days. Since the specimens were individually insulated, temperature recording was started before all of the mixtures were prepared.

Tabelle 1: Druckfestigkeit von Mischungen mit und ohne 5 % RCD
Table 1: Compressive strengths for mixtures with and without five percent RCD

Alter/Age [Tag/Day]	Druckfestigkeit/Compressive Strength [MPa]		
Tag Days	100 % Portland- zement/PC	60 % Portland- zement/PC, 40 % gemahlener Hüttensand/GGBFS	57 % Portlandzement/PC, 38 % gemahlener Hüttensand/GGBFS, 5 % RCD
1	13	6	8
3	18	16	17



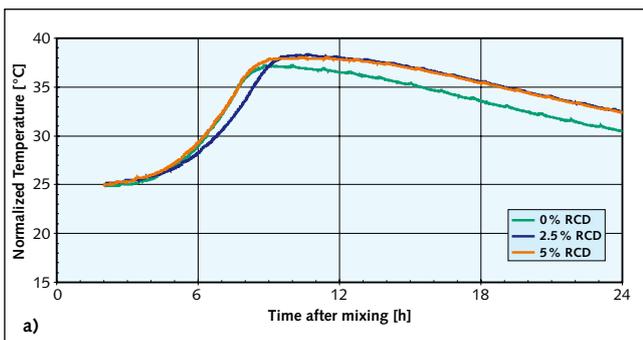
1 Temperaturverlauf bei Mischungen mit a) 0,0, 2,5 und 5 % RCD und b) 5,0, 7,5 und 10,0 % RCD

sehr gering. Das ist besonders vielversprechend, da RCD dem Bindemittel bei der Bestimmung des Wasserzementfaktors zugeordnet wurde. Der Zusatz von RCD senkt somit ebenfalls effektiv den Gehalt von Portlandzement im Gemisch.

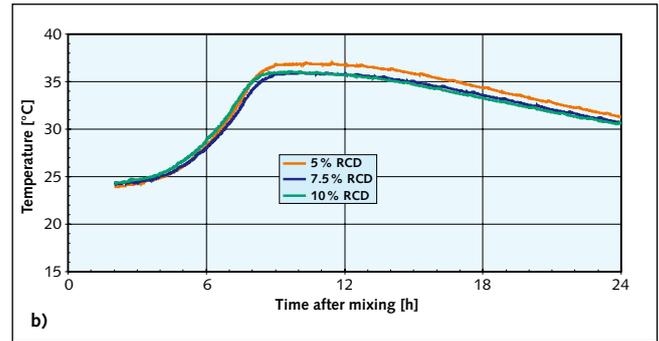
5 Optimierung von RCD

Die Anfangshydratationswärme erwies als geeigneter Parameter für das Messen und Bewerten des optimalen Gehalts an RCD. Die Mischungen wurde wie oben beschrieben zubereitet, und Proben von ca. 400 g wurden in kleine Becher aus Styrofoam (extrudierter Polystyrol-Hartschaum) gegeben. Bei diesen Proben war in der Mitte des Mörtels ein Thermoelement eingesetzt worden. Anschließend wurden sie einzeln isoliert. Die Proben wurden mit Ersatzmengen von RCD von 0,0, 2,5, 5,0, 7,5, 10,0 und 12,5 % (Masseprozent bezogen auf das Gesamtgewicht des zementartigen Materials) zubereitet. Zur Vorbereitung der Mischung und der Probekörper für sechs Gemische wurden insgesamt etwa drei Stunden benötigt. Die Thermoelemente wurden an eine automatische Datenerfassungsanlage angeschlossen, und die Temperaturen wurden in einem Zeitraum von drei Tagen überwacht. Da die Probekörper einzeln isoliert worden waren, konnte man mit der Temperatureaufzeichnung beginnen, bevor alle Mischungen fertig zubereitet waren.

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen in den ersten 24 Stunden werden in **Bild 1** gezeigt. Der Übersichtlichkeit halber werden die Temperaturverläufe in zwei getrennten Diagrammen dargestellt. Der Temperaturverlauf für die Mischung mit 5 % RCD ist in beiden Diagrammen zu Vergleichszwecken dargestellt. Der Beginn war jeweils zwei Stunden



2 Temperaturverlauf bei Mischungen mit a) 0,0, 2,5 und 5 % RCD und b) 5,0, 7,5 und 10,0 % RCD mit einer normalisierten Betonanfängstempertur von 25 °C

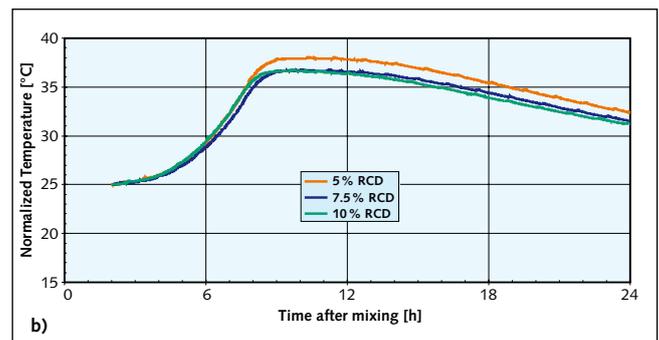


1 Temperature histories for a) 0.0, 2.5 and 5.0 % and b) 5.0, 7.5 and 10.0 and RCD mixtures

Results of the temperature measurements for the first 24 hours are shown in **Figure 1**. The temperature histories are presented in two separate graphs for clarity. The temperature history for the 5 % RCD mixture is shown on both graphs for comparison purposes. The 12.5 % RCD mixture is omitted for clarity. The starting time shown is two hours after each individual mixture was mixed. These graphs show that there were some differences in the initial mixture temperatures. These temperature differences make visual comparisons of the histories difficult. The information in Figures 1a and 1b is repeated in **Figures 2a** and **2b**, with the initial mixture temperatures normalized to 25 °C.

The 5 % RCD mixture produces more heat during the first 24 hours than the mixture containing no RCD (Fig. 2a). This figure also shows that while the 2.5 % RCD mixture displays approximately the same temperature increase as the 5 % RCD mixture, it heats up slightly slower. Neither the 7.5 % RCD nor the 10 % RCD mixtures produce as much heat in the first 24 hours as the 5 % RCD mixture.

This data can be further quantified by determining the areas under the temperature history curves, using units of C°-hours. By subtracting off the temperature at two hours (prior to noticeable temperature increase) prior to determining the areas, the values can be directly compared (**Table 2**, and plotted in **Fig. 3**). Figure 3 suggests that optimal amount of this RCD to use with the interground Portland cement-GGBFS material is approximately 4 % of the total cementitious material. This figure also shows that there is considerable increase in heat generation during the first 24 hours when RCD contents close to the optimal are used. Strength testing as part of the proof-of-concept results presented earlier indicates that there is an



2 Temperature histories for a) 0.0, 2.5 and 5.0 % and b) 5.0, 7.5 and 10.0 RCD mixtures, normalized to 25 °C initial concrete temperature

nach Fertigstellung der Mischung. Die Diagramme zeigen, dass es einige Unterschiede in den Anfangstemperaturen der Mischung gab. Diese Temperaturunterschiede gestalten einen visuellen Vergleich der Verläufe schwierig. Die Informationen in den Bildern 1a und 1b werden in den **Bildern 2a** und **2b** wiederholt, wobei die Anfangstemperaturen der Mischung auf 25 °C normalisiert wurden.

In der Mischung mit 5 % RCD wird in den ersten 24 Stunden mehr Wärme erzeugt als in der Mischung ohne RCD (Bild 2a). Dieses Bild zeigt auch, dass die Aufwärmung etwas langsamer verläuft, während der Temperaturanstieg sowohl in der Mischung mit 2,5 % RCD als auch in der mit 5 % RCD annähernd gleich ist. Weder die Mischungen mit 7,5 % RCD noch die mit 10 % RCD erzeugen in den ersten 24 Stunden soviel Wärme wie die Mischung mit 5 % RCD.

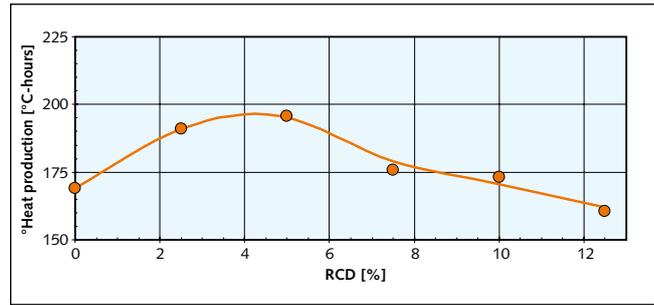
Diese Daten können noch weiter quantifiziert werden, indem die Bereiche unter den Temperaturverlaufskurven mit Hilfe der Einheit von C°-Stunden bestimmt werden. Durch das Subtrahieren der Temperatur nach zwei Stunden (vor einem bemerkbaren Temperaturanstieg) vor der Bestimmung der Bereiche können die Werte direkt verglichen werden (in **Tabelle 2** und in **Bild 3** dargestellt). In Bild 3 wird ausgesagt, dass die optimale Menge an RCD, die der Mischung aus Portlandzement und gemahlenem Hüttensand zugemahlen wird, etwa 4 % des gesamten zementartigen Materials beträgt. Dieses Bild zeigt auch, dass es eine beträchtliche Zunahme in der Wärmeerzeugung in den ersten 24 Stunden gibt, wenn der RCD-Gehalt dicht am Optimum liegt. Die Festigkeitsprüfung als Teil der Ergebnisse des bereits erwähnten Machbarkeitsnachweises zeigt, dass es auch eine Verbesserung der Frühfestigkeit gibt, wenn RCD mit nahezu optimalen Mengen eingesetzt wird.

6 Optimierung von ausgewaschenem Feingut

Ein ähnliches Experiment wurde mit ausgewaschenem Feingut (WOF) als Zementersatz durchgeführt. **Bild 4** zeigt die normalisierten Temperaturverläufe, die denen von RCD in den Bildern 2a und 2b ähnlich sind. Aufgrund der Umgebungsbedingungen im Labor (Umgebungstemperatur von 27 °C für die Herstellung von Mischungen mit ausgewaschenem Feingut gegenüber 23 °C bei den Mischungen mit RCD) und weil die Kombination aus Portlandzement und gemahlenem Hüttensand in getrennten Chargen für die Mischungen mit RCD und ausgewaschenem Feingut gemahlen wird, sollten direkte Vergleiche des Temperaturverlaufs zwischen ausgewaschenem Feingut und RCD nicht angestellt werden.

Bild 4a zeigt, dass der Unterschied in der Wärmeerzeugung zwischen den Mischungen mit 0 % und 2,5 % ausgewaschenem Feingut sehr gering ist. Bei der Mischung mit 5 % ausgewaschenem Feingut wird mehr Wärme erzeugt, auch wenn es keine höhere Spitzentemperatur gibt. Die Mischungen mit 7,5 und 10 % ausgewaschenem Feingut erzeugten in den ersten 24 Stunden beträchtlich weniger Wärme (Bild 4b). Die tatsächlich erzeugte Wärme ist in **Tabelle 3** enthalten. Das bei diesen Arbeiten verwendete ausgewaschene Feingut erwies sich als weniger wirkungsvoll hinsichtlich der Erhöhung der Anfangsgeschwindigkeit der Hydratation als RCD.

Bild 5 zeigt, dass die optimale Menge von ausgewaschenem Feingut in dem vermahlenden Gemisch aus Portlandzement und



3 Optimaler Gehalt an RCD für die Wärmeerzeugung in den ersten 24 Stunden
3 Optimum RCD content for first 24-hour heat production

improvement in early strength from using RCD at close to the optimal rate as well.

6 WOF Optimization

A similar experiment was conducted using WOF as the cementitious material replacement. Normalized temperature histories, similar to those shown for RCD in Figures 2a and 2b, are presented in **Figure 4**. Due to environmental conditions in the laboratory (ambient temperature 27 °C for preparation of the WOF mixtures versus 23 °C for the RCD mixtures) as well as the Portland cement-GGBFS combination coming being ground in separate batches for the RCD and WOF mixtures, direct comparisons between the WOF and RCD temperature histories should not be made.

Figure 4a shows very little difference in heat generation between the 0 % and the 2.5 % WOF mixtures, and more heat (though not a higher peak temperature) from the 5 % WOF mixture. The 7.5 and 10 % WOF mixtures produced considerably less heat in the first 24 hours (Fig. 4b). The actual heat produced is shown in **Table 3**. The specific WOF used in this work appears to be less effective at increasing the early rate of hydration than the RCD.

Figure 5 shows that optimal amount of this WOF to use with the interground Portland cement-GGBFS material is approximately 5 % of the total cementitious material. This figure also shows that the increase in heat generation during the first 24 hours when WOF contents close to the optimal are used is not very great, but that the heat output decreases considerably as the WOF content moves much beyond optimal.

Tabelle 2: Erzeugte Wärme in den ersten 24 Stunden bei unterschiedlichen Mengen an RCD

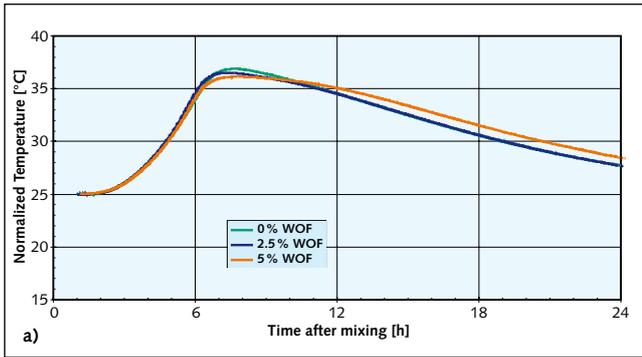
Table 2: Heat produced during first 24 hours for different amounts of RCD

Mischung/Mixture	0 %	2.5 %	5 %	7.5 %	10 %	12.5 %
C°-Stunden/hours	169	191	196	173	161	196

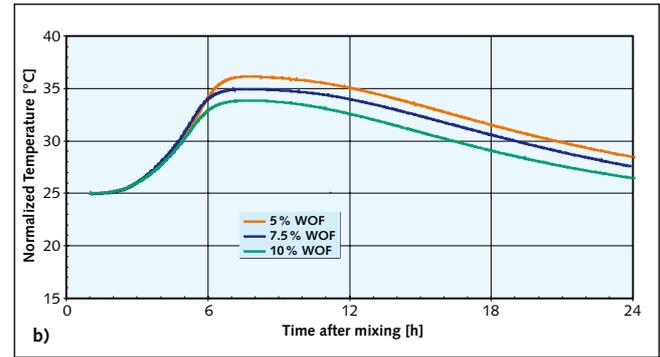
Tabelle 3: Erzeugte Wärme in den ersten 24 Stunden bei unterschiedlichen Mengen von ausgewaschenem Feingut

Table 3: Heat produced during first 24 hours for different amounts of WOF

Mischung/Mixture	0 %	2.5 %	5 %	7.5 %	10 %	12.5 %
C°-Stunden/hours	149	148	140	114	119	158



4 Temperaturverlauf bei Mischungen mit a) 0, 2,5 und 5 % ausgewaschenem Feingut und b) 5,0, 7,5, und 10,0 % ausgewaschenem Feingut mit einer normalisierten Anfangstemperatur von 25 °C



4 Temperature histories for a) 0, 2,5 and 5 % WOF mixtures and b) 5.0, 7.5 and 10.0 % WOF mixtures, normalized to 25 °C initial temperature

gemahlenem Hüttensand ca. 5 % des gesamten zementartigen Materials ist. Dieses Bild zeigt auch, dass die Zunahme der Wärmeerzeugung in den ersten 24 Stunden, wenn sich der Gehalt an ausgewaschenem Feingut nahe am Optimum bewegt, nicht sehr hoch ist. Danach sinkt jedoch die Wärmeleistung erheblich, da der Gehalt an ausgewaschenem Feingut weit unter dem Optimum liegt.

Für die Prüfung der Druckfestigkeit wurden Mörtelwürfel hergestellt, die einmal 60 % Portlandzement und 40 % gemahlene Hüttensand und zum andern 57% Portlandzement, 38 % gemahlene Hüttensand und 5 % Bindemittel aus ausgewaschenem Feingut enthielten. Es gibt fast keinen Unterschied in der Festigkeit der beiden Mischungen (Bild 6). Das Gemisch mit 5 % ausgewaschenem Feingut hat eine geringfügig höhere Festigkeit nach 7 und 28 Tagen. Obwohl keine wesentliche Zunahme der Frühfestigkeit beim Einsatz von 5 % ausgewaschenem Feingut zu verzeichnen war (auf der Grundlage der im Bild 5 gezeigten Wärmedaten wurde nur eine geringe oder keine Zunahme der Festigkeit erwartet), wurden diese Festigkeiten bei 3 % weniger Portlandzement und 2 % weniger gemahlenem Hüttensand erreicht.

7 Schlussfolgerungen

Es wurde ein Verfahren dargestellt zur Optimierung der Menge von Abfallmaterial, das staubförmige, hydratisierte Zementpaste enthält und Gemischen aus Portlandzement und gemahlenem Hüttensand zugegeben wird. Während die Verbesserungen der Frühfestigkeit nicht ganz die Werte erreichten, wenn Portlandzement allein verwendet wurde, so wurde die Festigkeit bei der Zugabe der zwei eingesetzten Abfallstoffe, nämlich RCD

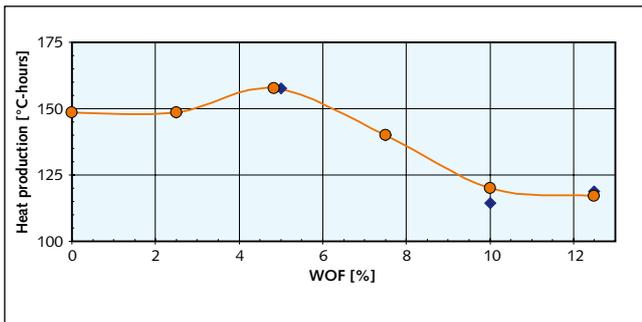
Compressive strength mortar cubes were prepared using the 60 % Portland cement, 40 % GGBFS as well as the 57% Portland cement, 38 % GGBFS, 5 % WOF binders. There is almost no difference in strength between the two mixtures (Fig. 6); the mixture with 5 % WOF had slightly higher strength at 7 and 28 days. Though there was no significant early strength increase from using the 5 % WOF (little or no strength increase was expected, based on the heat data presented in Figure 5), these strengths were produced by using 3 % less Portland cement and 2 % less GGBFS.

7 Conclusions

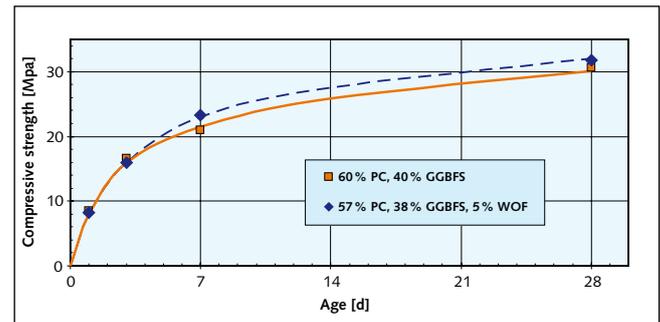
A procedure has been presented for optimizing the amount of waste material containing hydrated cement paste powder to be added to Portland cement-GGBFS blends. While the early strength improvements did not quite match strengths achieved when Portland cement was used alone, the addition of the two waste materials used, RCD and WOF, did not decrease strengths as compared to the Portland cement-GGBFS blend. This was true even when the mixtures used less Portland cement and less GGBFS. This procedure has the potential to make it easier to use waste materials such as RCD and WOF without hurting the strength (both early and long-term) of concrete.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Mascaro Sustainability Initiative of the University of Pittsburgh for providing funding for this work. They would also like to thank Nancy Whiting of the Minnesota Department of Transportation and Robert Shogren of LaFarge Cement for their assistance with this work.



5 Optimaler Gehalt ausgewaschenen Feinguts für die Wärmeerzeugung in den ersten 24 Stunden
5 Optimum WOF content for first 24-hour heat production



6 Festigkeiten von Mischungen mit und ohne 5 % ausgewaschenem Feingut
6 Strengths for mixtures with and without 5 % WOF

und ausgewaschenes Feingut, im Vergleich zu dem Gemisch aus Portlandzement und gemahlenem Hüttensand nicht reduziert. Dass war auch der Fall, wenn in den Mischungen weniger Portlandzement und weniger gemahlener Hüttensand verwendet wurde. Dieses Verfahren hat das Potenzial in sich, den Einsatz von Abfallmaterialien, wie z. B. RCD und ausgewaschenes Feingut, zu erleichtern, ohne sowohl die Frühfestigkeit als auch die Langzeitfestigkeit des Betons zu beeinträchtigen.

Danksagung

Die Autoren möchten der Mascaro Sustainability Initiative der Universität Pittsburgh für die Finanzierung dieser Arbeiten danken. Sie bedanken sich auch bei Nancy Whiting vom Minnesota Department of Transportation und bei Robert Shogren von LaFarge Cement für ihre Unterstützung.

Literaturverzeichnis/Literature

- [1] Bentur, A.: Cementitious Materials – Nine Millennia and a new Century: Past, Present, and Future, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Jan/Feb 2002, pp 2–21.
- [2] Nixon, P.J.: More Sustainable Construction – The Role of Concrete in Sustainable Concrete Construction (ed.) R.K. Dhir, T.D. Dyer, J.E. Halliday, published by Thomas Telford Publishing, London 2002.
- [3] Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D.: *Concrete*, Second Edition, Prentice Hall, p. 186, 2002.