

Einfluss der Rohstoffauswahl auf die Eigenschaften von hüttensandhaltigen Zementen

Von Joachim Bruckmann, Dortmund

1 Einleitung

Mit einem Marktanteil von fast 80 % war Portlandzement über viele Jahrzehnte hinweg die dominierende Zementart in Deutschland. Lediglich im Ruhrgebiet – dem deutschen Stahlstandort schlechthin und daher reich mit Hüttensand gesegnet – konnten schon frühzeitig Hochofen- und Portlandhüttenzemente (zu jener Zeit noch Eisenportlandzement) als Standardzemente etabliert werden, insbesondere im Bereich der Transportbetonindustrie. In anderen Regionen Deutschlands blieb Portlandzement lange Zeit die einzige in relevanten Mengen vermarktete Zementart. Dass sich dies in den vergangenen Jahren grundlegend geändert hat, ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Dabei ist ein verändertes Umweltbewusstsein ebenso zu erwähnen wie etwa die kontinuierliche Weiterentwicklung der Produktionstechnik oder steigende anwendungstechnische Anforderungen der Zementverarbeiter.

Im Folgenden wird erläutert, wie in hüttensandhaltigen Zementen die einzelnen Komponenten zusammenwirken, wie sich Veränderungen der auf natürlichen Rohstoffen beruhenden Hauptbestandteile in deren Reaktivität wiederfinden und letztlich, wie dieses Wissen syste-

matisch genutzt werden kann, um ein gleichmäßiges Produkt mit konstanten Eigenschaften herstellen zu können.

2 Hüttensandproduktion

In den Hochöfen von Hüttenwerken wird neben Roheisen als dem eigentlichen Hauptprodukt auch Schlacke erzeugt. Diese Schlacke erfüllt im Verhüttungsprozess eine wichtige metallurgische Rolle und unterliegt daher bereits im Hochofen einer

kontinuierlichen Qualitätsüberwachung. In einem dem Abstich nachgeschalteten Produktionsschritt wird die glutflüssige Schlacke durch Eindüsen von Wasser schlagartig abgekühlt (Bild 1) und dadurch in einen glasigen Zustand überführt. Das Produkt dieses als Granulation bezeichneten Verfahrensschritts heißt Hüttensand. Anders als etwa bei der alternativ möglichen Herstellung von Stückschlacke für den Straßenbau kommt es bei der Hüttensandproduktion zu keinen umweltrelevanten Emissionen, da dieser Prozess in geschlossenen Anlagen erfolgt.

Nicht zuletzt aufgrund dieser hohen Umweltverträglichkeit der Produktion von Hüttensand werden in Deutschland von den Hochofenbetreibern in zunehmendem Maße Granulationsanlagen errichtet. Hierdurch wird die Menge des produzierten Hüttensands in den nächsten Jahren weiter ansteigen, während die Menge des gleichzeitig erzeugten Roheisens weitgehend konstant bleibt.



Bild 1: Spritzkopf in einer Granulationsanlage

Ziel einer umweltverantwortlich handelnden Industrie muss es sein, diese Stoffströme zu hochwertigen Produkten zu veredeln und somit natürliche Ressourcen zu schonen und unnötige Emissionen zu vermeiden. Hüttensand kann aufgrund seiner latent hydraulischen Eigenschaften zur Herstellung von Normzementen verwendet werden und entsprechend der Zementnorm DIN EN 197-1 bis zu 95 M.-%

des Portlandzementklinkers substituieren. Das schont die zur Portlandzementklinker-Herstellung benötigten Rohstoffe (Kalkstein, Ton und Mergel) sowie die zum Brennen des Klinkers erforderliche Energie. Jede Tonne Hüttensand, die für die Herstellung von Zement eingesetzt wird, reduziert den Verbrauch an natürlichem Kalkmergel um etwa 1,6 Tonnen. Gleichzeitig nimmt die mit der Zementher-

stellung verbundene CO₂-Emission nicht zuletzt wegen der entfallenden Kalksteinsäuerung drastisch ab (Bild 2), [1]. Die Entwicklung der Zementartenstatistik der letzten Jahre zeigt, welche Erfolge die deutsche Zementindustrie in den zurückliegenden Jahren in ihrem Bemühen erzielt hat, den Anteil an Portlandzement (CEM I) zugunsten von umweltfreundlicheren Zementen zurückfahren (Bild 3).

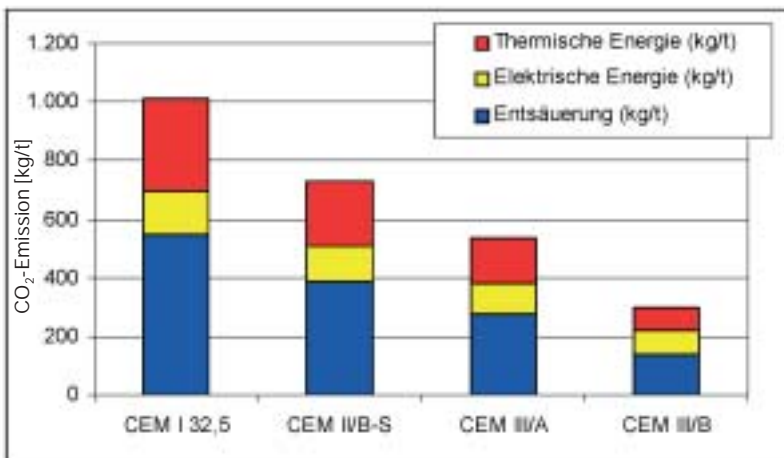


Bild 2: CO₂-Emission bei der Zementherstellung in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt (nach [1])

3 Einfluss der Hauptbestandteile

3.1 Glasstruktur von Hüttensand

Der thermodynamisch stabile Zustand der Hochofenschlacke ist die kristalline, mineralogisch differenzierte Stückschlacke. Hüttensand hingegen erhält seine glasige Struktur durch eine geeignete Temperaturbehandlung in Form des Granulationsprozesses. Glas ist als unterkühlte Schmelze eine Flüssigkeit, die mit fortschreitender Temperaturabsenkung immer zäher wird und schließlich vollständig erhärtet, ohne jedoch Kristalle auszubilden. Neben dem eigentlichen Glas ist Bitumen ein bekanntes Beispiel für ein derartiges Verhalten. Anders sieht es z.B. bei Wasser aus, das bei Unterschreitung seines Gefrierpunktes Eiskristalle ausbildet und damit seinen Flüssigkeitscharakter vollständig verliert.

Die Art und Weise der Temperaturabsenkung hat wesentlichen Einfluss auf die atomare Struktur eines Glases, auf gegebenenfalls auftretende Entmischungen oder Inhomogenitäten, welche unmittelbar die Eigenschaften des Glases beeinflussen. Daher ist es grundsätzlich problematisch, anhand der Eigenschaften von Hüttensanden aus unterschiedlichen Produktionsstandorten absolu-

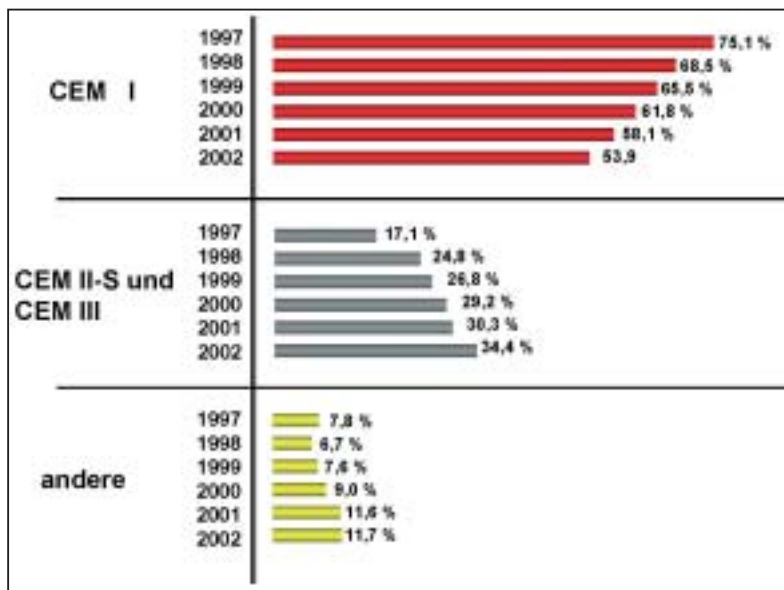


Bild 3: Zementartenstatistik (Inlandsversand in Deutschland)

te Aussagen zu Abhängigkeiten etwa zwischen Chemismus und Hütten-sandreaktivität zu machen.

3.2 Ausgangsstoffe

3.2.1 Hütten-sand

Hütten-sand wird in einem großtech-nischen Prozess erzeugt, der in Ab-hängigkeit von den eingesetzten natürlichen Rohstoffen sowie auf-grund metallurgischer Erfordernisse des Hochofenprozesses selbst gewis-sen Schwankungen unterliegt. Die-se Schwankungen werden zwar im Interesse einer gleichmäßigen Pro-zessführung möglichst gering ge-halten, können aber im praktischen Betrieb nie ausgeschlossen werden. Für die systematische Untersuchung des Einflusses der chemischen Zusam-mensetzung auf die Reaktivität von Hütten-sand wurden daher in einem umfangreichen Forschungsprojekt ge-zielt Hütten-sande produziert, die sich in ihrem Chemismus deutlich von-einander unterschieden. Grundsätz-lich neu an dem hierbei gewählten Vorgehen war, dass alle Hütten-sande in demselben Hochofen produziert wurden und nicht Hütten-sande von verschiedenen Hochofen miteinan-der verglichen wurden. Somit konn-ten erstmals andere Einflüsse wie z.B. Abstichtemperatur, Schlackenfüh-rung, Granulationsanlage usw. als die der chemischen Zusammensetzung

und der damit in Verbindung stehen- den physikalischen Eigenschaften auf die Hütten-sandreaktivität weitgehend ausgeschlossen werden. Insgesamt wurden fünf verschiedene Hütten-sande in großtechnischem Maßstab gezielt produziert, wobei für jeden einzelnen dieser Hütten-sande mehre-re tausend Tonnen Möller (so wird der Rohstoffmix genannt, mit dem der Hochofen beschickt wird) modifiziert werden mussten. **Tafel 1** gibt einen Überblick über die so hergestellten Hütten-sande.

3.2.2 Klinker

Neben dem Hütten-sand ist in Hüt-tenzementen Portlandzementklin-ker der zweite Hauptbestandteil; er muss bei einer systematischen Untersuchung der Hütten-sandeigen-schaften entsprechend einbezogen werden. Hierzu wurden gezielt 15 Klinkerqualitäten produziert, die sich sowohl hinsichtlich ihrer charakte-ristischen Kennwerte unterschieden (z.B. Kalkstandard oder Sulfatisie-rungsgrad der Alkalien) als auch aus unterschiedlichen Produktionsver-fahren (Lepolofen, Trockenverfahren) stammten.

3.3 Untersuchungen zur Glas- struktur der Hütten-sande

Voraussetzung dafür, dass Hütten-sand aktiv zur Festigkeitsbildung im

Hochofenzement beiträgt, ist eine gewisse Instabilität seiner Glasstruk-tur gegenüber einem basischen An-griff, wie er durch die Porenlösung von Zement gegeben ist. Daher ist die Kenntnis der strukturellen Ei-genschaften des Hütten-sands von grundlegender Bedeutung.

Mit Hilfe modernster Analysemetho-den aus Festkörperchemie und Fest-körperphysik konnte im Rahmen des Forschungsprojekts gezeigt werden, dass die Stabilität der Hütten-sand-Glasstrukturen letztlich den aus der klassischen Glasstheorie bekann-ten Abhängigkeiten folgt. Zum Ver-ständnis der Reaktivität ist es somit nicht mehr grundsätzlich erforder-lich, z.B. von Entmischungen inner-halb der Glasstruktur als zwingender Voraussetzung auszugehen.

Um beispielsweise die Veränderung des Chemismus von Hütten-sand so-wie die Zusammensetzung der sich neu bildenden Phasen während ei-nes basischen Angriffs zu ermitteln, wurde die Sekundärneutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS) ein-gesetzt. Hiermit ist es möglich, die räumliche und zeitliche Entwicklung der Reaktionsschichten element-spezifisch in Abhängigkeit vom ein-gesetzten Korrosionsmedium zu beobachten (Elementtiefenprofile). Als Korrosionsmedium, das modell-

Tafel 1: Kennwerte der großtechnisch hergestellten Hütten-sande zur Herstellung der verschiedenen Hütten-sandmehle (HSM)

	Chemische Analyse [M.-%]									Basizitäts-Kennziffern		
	C/S	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	S	MnO	Fe	TiO ₂	F-Wert ^{*)}	(C+M)/S	(C+M+A)/S
HSM 0	1,07	11,5	10,1	38,8	36,2	1,2	0,3	0,1	0,5	1,52	1,39	1,67
HSM 1	1,07	11,2	11,9	38,0	35,4	1,3	0,3	0,2	0,6	1,57	1,39	1,72
HSM 2	1,17	10,9	9,8	41,2	35,3	1,6	0,2	0,2	0,4	1,61	1,48	1,75
HSM 3	1,15	11,1	11,3	39,6	34,5	1,6	0,2	0,1	0,7	1,65	1,47	1,80
HSM 4	1,14	7,3	10,6	41,9	36,8	1,5	0,2	0,2	0,7	1,54	1,34	1,62

^{*)} (CaO+0,5·MgO+Al₂O₃+0,5·S) / (SiO₂+MnO)

haft die basische Porenlösung simuliert, wurde u.a. Kaliumhydroxid (KOH) verwendet, das dem Hüttensandmehl bei vergleichsweise hohen w/z-Werten zugegeben wurde.

Unter diesen Bedingungen konnte experimentell beobachtet werden, dass die Hüttensand-Reaktion unmittelbar nach der KOH-Zugabe einsetzt, indem Calciumoxid (CaO) aus den oberflächennahen Bereichen herausgelöst wird. **Bild 4** zeigt die Veränderung der CaO-Gehalte zu verschiedenen Zeiten zwischen einer Stunde und sieben Tagen in Abhängigkeit von der Probtiefe im Vergleich zur unbehandelten Probe. Gleichzeitig diffundiert Kalium in das Hüttensandkorn ein. Da MgO im hochbasischen Milieu praktisch unlöslich ist, reichert es sich in dieser Auslaugungsschicht relativ an. Nach mehreren Stunden Reaktionszeit wird auch SiO₂ mobilisiert. Al₂O₃ verhält sich auch in diesem Stadium ausgesprochen reaktionsträge und geht nur in geringen Mengen in Lösung. Sobald das Lösungsmedium an Calcium und Silizium übersättigt ist, werden entsprechende Calciumsilicathydrat-Phasen (das sind die festigkeitsbildenden Minerale des Zementsteins) auf der Oberfläche der Hüttensandkörner auskristallisiert. Aufgrund des geschilderten

Löslichkeitsverhaltens enthalten diese Phasen etwas Al₂O₃, aber kaum MgO. MgO befindet sich nach wie vor an seinem ursprünglichen Ort und beteiligt sich dort an der Bildung neuer Mineralphasen, z.B. Hydrotalcit. In **Bild 5** ist dargestellt, welche relativen Elementkonzentrationen sich nach einer Reaktionszeit von sieben Tagen eingestellt haben.

Durch vergleichende Untersuchungen an mehreren Hüttensandmehlen konnte nachgewiesen werden, dass Reaktivitätsunterschiede zwischen Hüttensanden nur in der Frühphase der Reaktion zu beobachten sind. In dem Maße, wie sich auf der Oberfläche des Hüttensandkorns neue Phasen abscheiden, geht der für den weiteren Verlauf der Hydratation erforderliche Stofftransport zwischen Porenlösung und Hüttensandkorn zurück. Die Instabilität der Hüttensand-Glasstruktur ist somit nicht mehr der geschwindigkeitsbestimmende Schritt, vielmehr läuft nun eine diffusionskontrollierte Reaktion ab.

3.4 Untersuchungen an Mörteln

Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss des Hüttensands auf die Zementeigenschaften zu untersuchen. Daher wurden auf Basis der bereitgestellten Hauptbestandteile Hoch-

ofenzemente vom Typ CEM III/B mit 75 M.-% Hüttensand hergestellt. Um auch hier eine möglichst enge Anbindung an praktische Gegebenheiten sicherzustellen, wurden die Hüttensande großtechnisch auf dem gleichen Mühlensystem auf gleiche Feinheit vermahlen. Die Herstellung der Mörtel und die Durchführung der entsprechenden Untersuchungen erfolgte entsprechend der Zementnorm DIN EN 196.

Die 2-Tage-Druckfestigkeiten der unterschiedlichen Mörtel sind in **Bild 6** dargestellt. Bemerkenswert ist die systematische Abhängigkeit der Druckfestigkeiten sowohl vom verwendeten Hüttensand als auch vom Klinker. Im Rahmen der zur Verfügung stehenden Ausgangsstoffe betragen sowohl die durch Variierung des Klinkers als auch die durch Variierung des Hüttensands gemessenen Druckfestigkeitsveränderungen etwa 2 N/mm² bis 3 N/mm². Im Verhältnis zu den zu diesem Prüftermin bestimmten absoluten Festigkeiten ist dies eine enorme Bandbreite und zeigt die Möglichkeiten auf, die durch eine geeignete Auswahl der Zementhauptbestandteile erzielt werden kann. Es wird auch deutlich, dass Hüttensand bereits zu frühen Prüfterminen einen relevanten eigenständigen Festigkeitsbeitrag liefert.

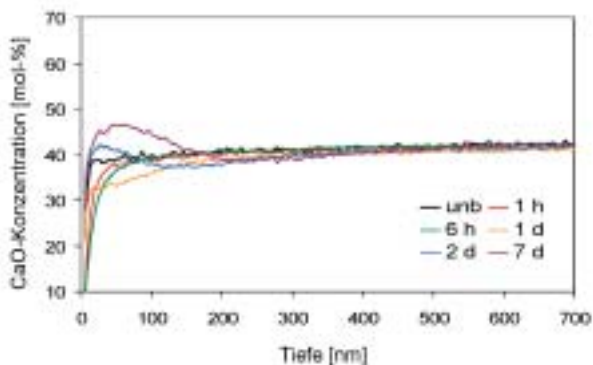


Bild 4: CaO-Gehalte in Abhängigkeit von der Probtiefe zu unterschiedlichen Messzeiten

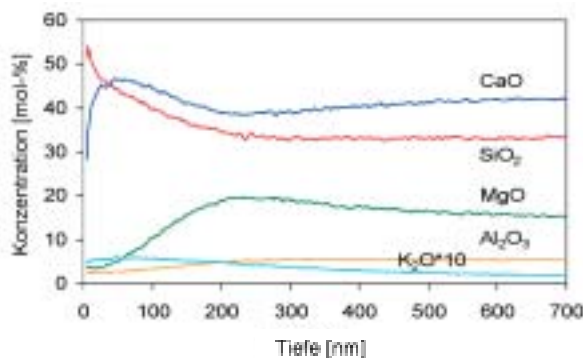


Bild 5: Relative Elementgehalte in Abhängigkeit von der Probtiefe nach einer Reaktionsdauer von 7 Tagen

Nach 28 Tagen zeigten sich etwas andere Verhältnisse (Bild 7): Durch Variierung des Klinkers – obwohl nur 25 M.-% des Zements – ließen sich deutlich größere Veränderungen der Druckfestigkeit erreichen als durch Variierung der Hüttensandkomponente. Allerdings waren die Festigkeitsunterschiede geringer als zu den früheren Prüfterminen. Die Feststellung, dass sich die unterschiedlichen Reaktivitäten von Hüttensanden zu frühen Prüfterminen stärker auswirken als zu späteren Prüfterminen, bestätigt die im Rahmen der Untersuchungen zur Glasstruktur gemachten Beobachtungen, dass sich im Laufe der Hydratation des Zements diffusionshemmende Reaktionsschichten bilden.

Zwischen den in Tafel 1 aufgeführten chemischen Parametern der Hüttensande sowie den in Bild 6 dargestellten Mörteldruckfestigkeiten können folgende Abhängigkeiten hinsichtlich der Reaktivität von Hüttensand im Zement festgestellt werden: Steigende Gehalte an Calciumoxid (CaO), Aluminiumoxid (Al₂O₃) sowie Magnesiumoxid (MgO) bewirken eine Zunahme der Reaktivität, während hohe Siliziumoxid-Gehalte (SiO₂) die Reaktivität verringern.

Wesentlichen Einfluss auf den Festigkeitsbeitrag von Klinker im Hochofenzement hat auch die Leistungsfähigkeit des Klinkers. Sie hängt wesentlich von der Menge der Klinkermineralphase Alit (C₃S) ab und somit vom Kalkstandard des Klinkers. Der Zusammenhang zwischen den 2-Tage-Mörteldruckfestigkeiten, die ein Klinker in einem CEM I und in einem CEM III/B erbringt, kann Bild 8 entnommen werden. Es wird deutlich, dass ein Klinker, der einen leistungsfähigen Portlandzement ergibt, diese Leistungsfähigkeit auch bei Verwendung im Hochofenzement zeigt.

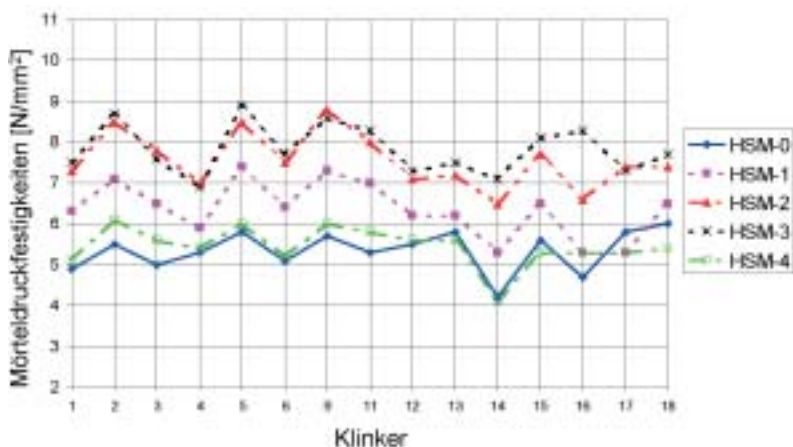


Bild 6: Druckfestigkeiten von Mörtelprismen mit CEM III/B (75 M.-% Hüttensandmehl [HSM]) im Alter von 2 Tagen

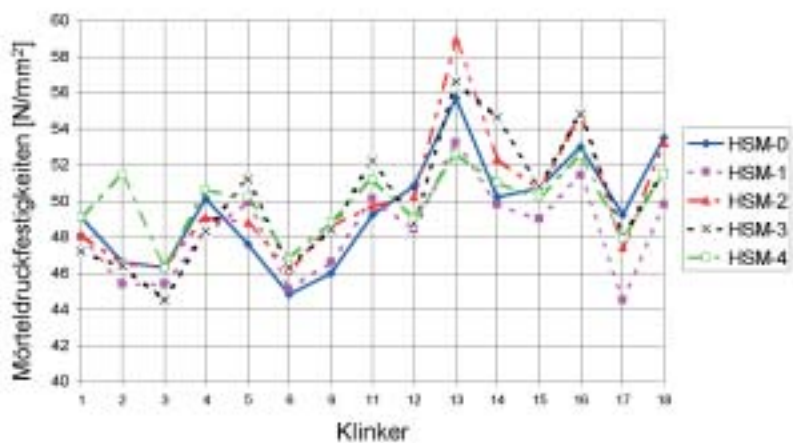


Bild 7: Druckfestigkeiten von Mörtelprismen mit CEM III/B (75 M.-% Hüttensandmehl [HSM]) im Alter von 28 Tagen

Bild 8 zeigt aber auch, dass ein hoher Sulfatisierungsgrad der Alkalien einen positiven Einfluss auf die 2-Tages-Festigkeiten von Hochofenzementen hat. Der Sulfatisierungsgrad der Alkalien kann als Maß dafür genommen werden, wie schnell Alkalien (Natrium und Kalium) in der Porenlösung und damit für Löse- sowie Diffusionsprozesse im Hüttensand zur Verfügung stehen. Somit ist es durchaus möglich, mit einem in CEM I eher leistungsschwachen Klinker einen leistungsfähigen Hochofenzement herzustellen.

Die Mörteluntersuchungen haben gezeigt, dass sowohl durch Hüttensand als auch durch Klinker deutliche Veränderungen der Zement-eigenschaften bewirkt werden können. Sicherlich fallen in der Praxis an ein und derselben Produktionslinie (Klinkerofen oder Hochofen) die Schwankungen üblicherweise geringer aus als bei der Bandbreite der untersuchten Komponenten. Dennoch sind sie vorhanden und werden heute im Zementwerk durch ein Bündel geeigneter Maßnahmen ständig korrigiert. Derartige Korrekturen

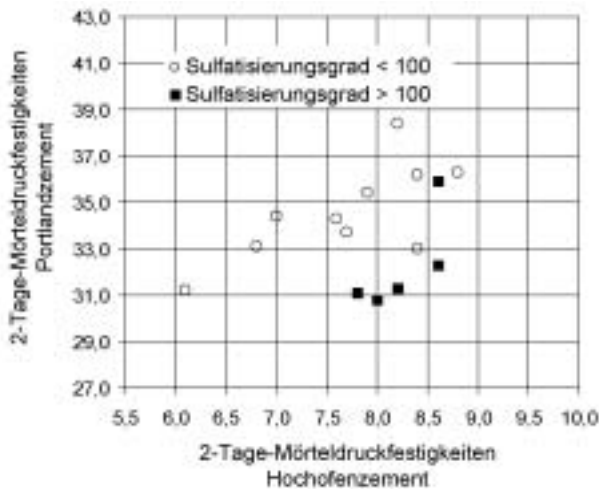


Bild 8: 2-Tage-Mörteldruckfestigkeiten von CEM I im Vergleich zu CEM III/B (75 M.-% Hüttensandmehl), hergestellt aus dem gleichen Klinker

sind z.B. eine geringfügige Veränderungen der Zementzusammensetzung hinsichtlich des Verhältnisses Klinker/Hüttensand, die Optimierung des Sulfatträgers (Art und Menge) aber auch die Variierung der Mahlfineinheit oder des Aufbaus des Kornbands. Ziel ist es stets, Zement mit gleichmäßigen Festigkeits- und Verarbeitungseigenschaften herzustellen. Diese Eingriffsmöglichkeiten sind in ihrer vollen Bandbreite allerdings nur einsetzbar, wenn die Ausgangsstoffe im Zementwerk verarbeitet werden. Bei Zusammenführung der einzelnen Bestandteile im Betonwerk reduzieren sich die entsprechenden Möglichkeiten drastisch.

3.5 Untersuchungen an Betonen

Neben den mörteltechnischen Untersuchungen wurden auch entsprechende Betonuntersuchungen durchgeführt. Sie spiegeln im Wesentlichen die an den Mörteln festgestellten Einflüsse der Hüttensande und Klinker wider.

Interessant war es, mit den gemessenen Mörteldruckfestigkeiten (= Zementdruckfestigkeit nach DIN EN 196-1) die entsprechenden

Betondruckfestigkeiten aus den Walzkurven zu ermitteln und diese mit den tatsächlich gemessenen Betondruckfestigkeiten zu vergleichen. Auffallend hierbei war, dass die beiden so ermittelten Werte systematisch voneinander abwichen. Dabei zeigte sich, dass die Abweichungen nicht nur in Abhängigkeit vom Hüttensand unterschiedlich ausfielen, sondern dass auch das Herkunftswerk des verwendeten Klinkers einen systematischen Einfluss hatte.

Aufgrund der festgestellten, nicht erklärbaren Walz-Differenzen wurden weiterführende Untersuchungen durchgeführt, in denen die unterschiedlichen Einflussparameter gezielt variiert wurden. Dies beinhaltete die Lagerungsbedingungen ebenso wie den Wasserzementwert, die Art der verwendeten Zemente oder die Betonzusammensetzungen unter Einbeziehung von Flugaschen. In mehreren Laboren wurden unabhängige Vergleichsuntersuchungen der Betoneigenschaften durchgeführt. Als Kenngröße für die Dichtheit von Beton einschließlich der Beschaffenheit der Kontaktzone Matrix/Gesteinskörnung wurde der Chlorid-Migrationskoeffizient herangezogen.

Fazit dieser umfangreichen Untersuchungen ist, dass die Allgemeingültigkeit der Abhängigkeiten zwischen Normmörtel- und Betondruckfestigkeiten, wie sie in der Vergangenheit anhand der Walzkurven als praxisrelevant betrachtet werden konnten, in der bisherigen Form nicht aufrecht erhalten werden kann. Das Zusammenwirken der Einflussparameter, die für die letztendlich im Beton erreichten Festigkeiten verantwortlich sind, lässt sich nicht generell auf eine derart vereinfachende Abhängigkeit reduzieren, wie sie in den Walzkurven in der Vergangenheit vorgenommen wurde.

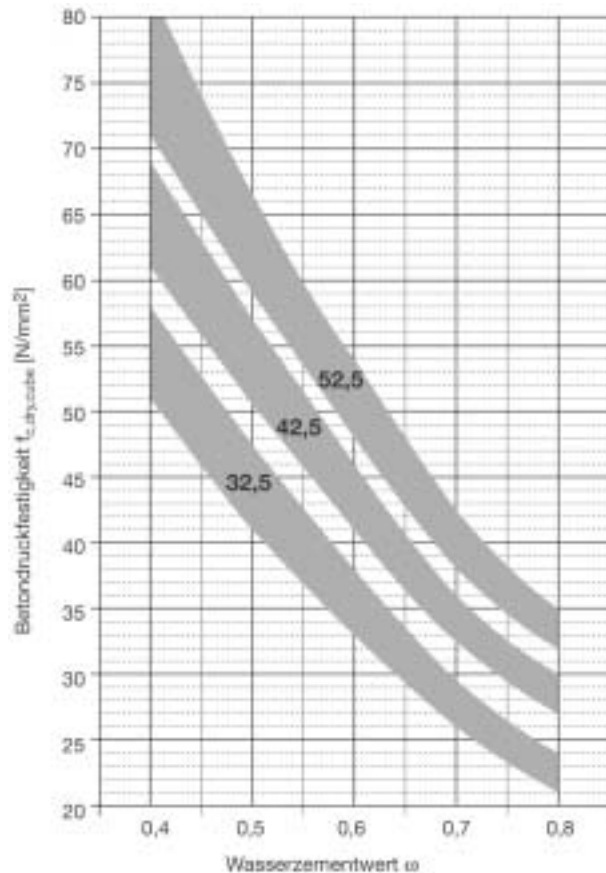
Die durch die vorliegenden Untersuchungen angestoßene Diskussion hatte zum Ergebnis, dass in neueren Veröffentlichungen die Abhängigkeit zwischen Mörtel- und Betondruckfestigkeiten nicht mehr anhand von „linienförmigen“ Walzkurven sondern vielmehr durch entsprechend breite Kurvenbänder dargestellt wird (Bild 9) [2].

3.6 Hüttensande aus Laborgranulation und Übertragung auf weitere großtechnische Versuche

In Anbindung an die großtechnisch vorgenommenen Variationen der Hüttensandzusammensetzung wurden in einer Laborgranulationsanlage weitere Variationen des Hüttensandchemismus vorgenommen. So ist in Bild 10 der systematische Einfluss des Gehalts von Titandioxid (TiO_2) im Hüttensand auf die Leistungsfähigkeit im Hochofenzement dargestellt. Dieses zunächst exotisch anmutende Element findet sich in einigen Hüttensanden in erhöhtem Maße, da dem Hochofen zur Schonung des Feuerfestmaterials phasenweise titandioxidhaltige Stoffe – wie etwa das natürliche Mineral Ilmenit – zugegeben wird.

In weiterführenden Laboruntersuchungen wurde auch der Frage nachgegangen, inwieweit man die Kenntnis um die Zusammenhänge zwischen Chemismus und Reaktivität eines Hüttensands nutzen kann, um eine aus Hochofenbetriebstechnischen Gründen notwendige, aber für die Festigkeitsentwicklung im Hochofenzement eher nachteilige Veränderung des Schlackenchemismus gezielt zu kompensieren. Hierzu wurden in Labordotierungen Hüttensande hergestellt, die gleichzeitig in zwei – hinsichtlich ihres Einflusses auf die Hüttensand-Reaktivität gegenläufigen – chemischen Parametern verändert wurden. Die mörteltechnischen Untersuchungen zeigten eindeutig den kompensatorischen Einfluss der relevanten Stellgrößen. So ist es z.B. bei einem in seinem TiO_2 -Gehalt auf 2,6 M.-% angehobenen Hüttensand möglich, durch gezielte Anhebung der Basizität und/oder des Al_2O_3 -Gehalts Druckfestigkeiten wie beim Ausgangshüttensand zu erhalten.

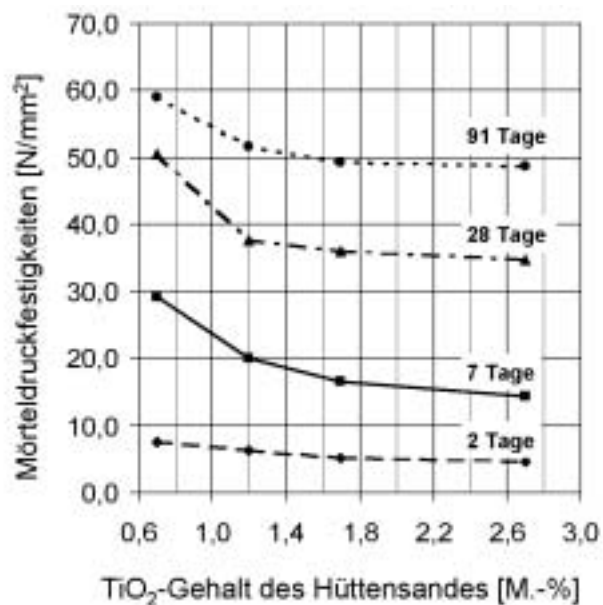
Bild 9: „Walzbänder“ beschreiben die Relation zwischen Wasserzementwert und Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Zementdruckfestigkeit als die früheren Walzkurven (nach [2])



In einem großtechnischen Versuch wurden diese Laborergebnisse bestätigt: Bild 11 zeigt die Mörtel-Druckfestigkeiten von zwei in ihrem Chemismus gezielt variierten, aber grundverschiedenen Hüttensanden. Trotz dieser Unterschiede ergeben beide Hüttensande einen CEM III/B gleicher Leistungsfähigkeit. Auch hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften zeigten sich keine relevanten Unterschiede.

Mit diesen Untersuchungen wurde eindeutig belegt, dass die Leistungsfähigkeit eines Hüttensands nicht an einem einzelnen Parameter festgemacht werden kann. Auch Diskussionen hinsichtlich eines absoluten Grenzwerts, jenseits dessen ein Hüttensand für die Zementerzeugung nicht mehr geeignet sei, sind somit nicht angebracht. Vielmehr muss stets der Gesamtchemismus betrachtet werden.

Bild 10: Einfluss des TiO_2 -Gehalts im Hüttensand auf die Mörtel-Druckfestigkeit (Hüttensand in einer Laborgranulation erzeugt)



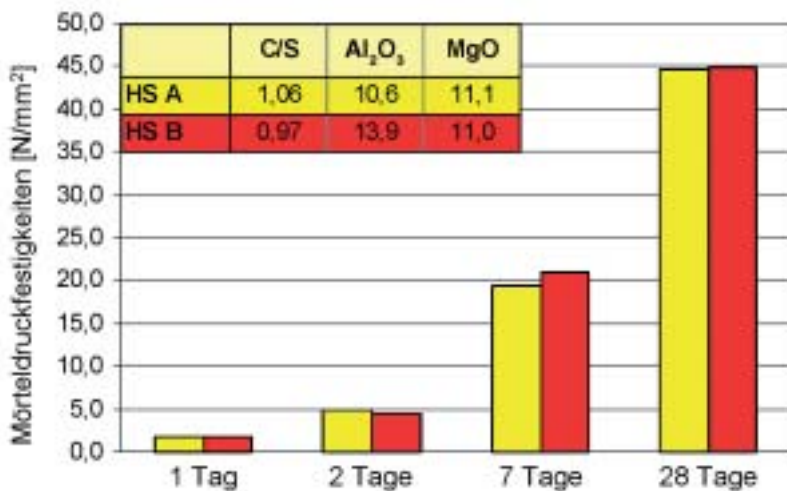


Bild 11: Kompensatorische Wirkung von Al₂O₃ gegenüber CaO/SiO₂ (C/S) (Hüttensand großtechnisch erzeugt)

4 Schlussbemerkung

Natürlich ist die Bandbreite der im Rahmen dieses Forschungsprojekts untersuchten Einflussfaktoren wesentlich größer, als an dieser Stelle dargestellt werden konnte. Denn neben den Hauptbestandteilen finden sich im Zement auch weitere Komponenten wie Sulfatträger, Anregersysteme oder auch Mahlhilfsmittel, deren Einfluss auf die Zementeigenschaften ebenso systematisch berücksichtigt werden muss. Auch konnte nur punktuell auf Einzelheiten der Untersuchungen zu Glasstruktur, Reaktionsmechanismen oder Ausbildung der Calciumsilikathydrat (CSH)-Phasen eingegangen werden. Dennoch konnte gezeigt werden, dass allein durch die Variation der Hauptbestandteile die Eigenschaften hüttensandhaltiger Zementen gezielt beeinflusst werden können. Dafür ist allerdings die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Rohstoffqualität und Produkteigenschaft von essenzieller Bedeutung.

Die an dieser Stelle auszugsweise vorgestellten Ergebnisse sind Teil

eines inzwischen abgeschlossenen Forschungsprojekts der Readymix Hüttenzement GmbH, Dortmund, das mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 01 RK 9651 gefördert wurde [3].

Die nachstehenden Institute trugen in ihren jeweiligen Fachgebieten zu den vorgestellten Ergebnissen bei:

- ❑ Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, ibac
- ❑ Institut für Nichtmetallische Werkstoffe / Professur für Glas, TU Clausthal
- ❑ Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken e.V., Duisburg
- ❑ Verein Deutscher Zementwerke e.V. / Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf
- ❑ Readymix-Institut für Baustoffe, Ratingen
- ❑ Rüdersdorfer Zement GmbH, Rüdersdorf
- ❑ Readymix Westzement GmbH, Beckum

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

5 Literatur

- [1] Ehrenberg, A.; Geiseler, J.: Ökologische Eigenschaften von Hochofenzement. Lebenswegphase Produktion: Energiebedarf, CO₂-Emission und Treibhauseffekt. Beton-Informationen 37 (1997) H. 4, S. 51-63.
- [2] Weber, R.; Tegelaar, R.: Guter Beton – Ratschläge für die richtige Betonherstellung. 20. Auflage, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, 2001.
- [3] Nutzung von Hüttensand und Flugasche als Klinkersubstitut mit dem Ziel der Vermeidung von Emissionslasten. Readymix Hüttenzement GmbH, Dortmund. Abschlussbericht Forschungsvorhaben des BMBF, Förderkennzeichen 01 RK 9651.

Einsatz von Hochofenzement bereitet Vergnügen

Von Mathias Belke, Sötenich

1 Perfekte Illusion

Wie vielfältig die Einsatzmöglichkeiten von Hochofenzement sind, zeigt der Neubau dreier Fahrgeschäfte im Freizeitpark Phantasialand in Brühl bei Köln. Dort wurde unter Verwendung von Hochofenzement der Fantasy-Themenbereich „Wuze-Town“ (Bild 1) mit 90.000 m³ umbauten Raum als Attraktion und Publikumsmagnet fertig gestellt.

Allgemein gilt Zement als grau und eintönig, die eigentlichen Möglichkeiten erschließen sich in der Regel erst, wenn aus dem Zwischenprodukt fertiger Beton geworden ist. So auch in der neuen Attraktion des Vergnügungsparks Phantasialand. Dort, unter einem markanten Glaskuppelbau detailverliebt inszeniert, wurde eine Fantasiestadt mit drei aktionsreichen Fahrgeschäften geschaffen, dem „Para Turm“ und den beiden Achter-

bahnen „Winja's Fear“ und „Winja's Ride“.

2 Hinter den Kulissen

Um den hohen Anforderungen an den Betonbau gerecht zu werden, wurden bei diesem Projekt mehr als 15 verschiedene Betonzusammensetzungen verwendet, überwiegend mit einem neuen Hochofenzement CEM III/A 32,5 R-NW/NA. Aufgrund der im Vergleich zu üblichem Hochofenzement CEM III/A 32,5 N deutlich höheren Frühfestigkeit des Zements (Bild 2) konnten die für einen raschen Baufortschritt wichtigen relativ kurzen Ausschulfristen eingehalten werden, sogar im Winter bei niedrigen Temperaturen.

Auf den ersten Blick wirken die charakteristischen Merkmale eines

Zements CEM III/A 32,5 R-NW/NA widersprüchlich. Die beiden Eigenschaften „schnell erhärtend“ (R) und „niedrige Hydratationswärmeentwicklung“ (NW) scheinen sich gegenseitig auszuschließen und sind nur aufgrund einer besonderen Klinkermineralogie und eines abgestimmten Produktionsverfahrens gleichzeitig erreichbar (Tafel 1).

3 Betonbau

Bei dem Bauprojekt wurden rund 10.000 m³ Beton der Festigkeitsklassen B 15, B 25, B 35 und B 45 (entspricht nach neuer Betonnorm DIN EN 206-1/DIN 1045-2 den Festigkeitsklassen C12/15, C20/25, C30/37 und C35/45) eingebaut. Zahlreiche hohe und schlanke Stützen mit verlängerter Schalung mussten in Sichtbetonqualität betoniert und entsprechend nachbehandelt werden. Um dem negativen Effekt der Kaminwirkung bei hohen Bauteilen entgegenzuwirken, wurde bei der intensiv durchgeführten Nachbehandlung besonders auf eine sachgemäße und exakte Durchführung geachtet. So konnten die oberflächennahen Bereiche des Sichtbetons vor zu schneller Austrocknung geschützt und der Beton in Dauerhaftigkeit, Festigkeit und Ästhetik den Anforderungen gerecht werden.

Ein anderes Extrem ergab sich beim Betonieren von einseitigen, aufwendig herzustellenden Schalungen mit Dicken von bis zu 1 m für die Hangsicherung und die Unterkonstruktion. Hier waren bei warmen Sommertemperaturen gute Verarbeitungseigenschaften und eine niedrige Hydratationswärmeentwicklung von Bedeutung. Um die Rissgefahr zu minimieren, wurde auch hierfür Hochofenzement



Bild 1: Die Illusion in „Wuze Town“

Tafel 1: Anforderungen an CEM III/A 32,5 R-NW/NA und Prüfergebnisse

Eigenschaft		Anforderungen gemäß		CEM III/A 32,5 R-NW/NA
NW	Hydratationswärme nach 7 Tagen	DIN 1164	$\leq 270 \text{ J/g}$	220 J/g
NA	Na ₂ O-Äquivalent	DIN 1164	$\leq 0,95 \text{ M.-%}$ (Hüttensandgehalt $\leq 49 \text{ M.-%}$)	0,75 M.-%
32,5 R	Mörtelruckfestigkeit nach 2 Tagen	DIN EN 197-1	$\geq 10 \text{ N/mm}^2$	13 N/mm ²
	nach 28 Tagen		$\geq 32,5 \text{ N/mm}^2, \leq 52,5 \text{ N/mm}^2$	50 N/mm ²

verwendet und die Wärmeentwicklung der Betone im eingebauten Zustand ständig überwacht. Neben den guten Verarbeitungseigenschaften wurden bei diesem Bauprojekt die für Hochofenzemente typischen Eigenschaften einer deutlichen Nacherhärtung über den 28. Tag hinaus genutzt. Dieser Eigenschaft wurde schon bei der Zusammensetzung der Betone (Tafel 2) vorausschauend Rechnung getragen, um, in Abstimmung mit dem Bauträger, das Prüfalter von 28 auf 56 Tage zu verlängern.

4 Fahrgeschäfte mit Geschichte

Für das Design von Wuzetown zeichnet der Belgier Eric Daman verantwortlich, der nicht nur die Figuren und die Architektur entwickelte (Bild 3). Daman folgt mit der Entwicklung einer vollständig neuen Kultur und Soziologie der Phantasialand-Philosophie, einzelne Attraktionen nicht als isolierte Fahrgeschäfte zu konzipieren, sondern in einen gemeinsamen Themenkomplex einzubetten. Wer mit den Gondeln des Aussichtsturms „Tittle Tattle Tree“, auch Para Tower genannt, bis unters Dach der 20 Meter hohen, ganz aus Glas gestalteten Kuppel schwebt, kann die Eigenheiten der Fabelwesen, die „Wuzetown“ mit ihrer Königin „Winja“, in Wuzetown beobachten.

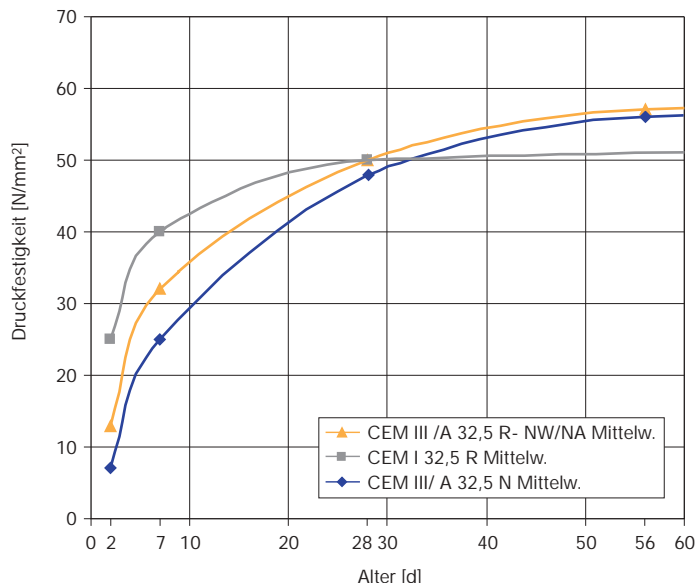


Bild 2: Vergleich der Festigkeitsentwicklung der Zemente CEM I 32,5 R, CEM III/A 32,5 R und CEM III/A 32,5 N



Bild 3: Eingang in den neuen Fantasy-Bereich „Wuzetown“

Tafel 2: Einige ausgewählte Betonzusammensetzungen

Betonfestigkeitsklasse (Prüfalter) besondere Eigenschaften	(Tage)	B 15 (28) -	B 25 (56) Wasserundurchlässigkeit	B 35 (56) Wasserundurchlässigkeit, hoher Frostwiderstand	B 35 (Fahrbahndeckenbeton) (28) Wasserundurchlässigkeit, hoher Frost- und Tausalzstand KP
Konsistenz		KR	KR	KR	KP
Zementart und Festigkeitsklasse Zementgehalt z	kg/m ³	CEM III/A 32,5 R-NW/NA 250	CEM III/A 32,5 R-NW/NA 250	CEM III/A 32,5 R-NW/NA 330	CEM I 42,5 R 360
Wassergehalt w/z-Wert (w/z) _{eq}	kg/m ³	175,5 - 0,67	162 - 0,59	176,5 - 0,51	173 0,48 -
Gesteinskörnung Art Größtkorn	mm	Sand, Kies 32	Sand, Kies 32	Sand, Kies 32	Sand, Kies 16
Zusatzstoff Art Gehalt	kg/m ³	Steinkohlenflugasche 30	Steinkohlenflugasche 70	Steinkohlenflugasche 40	-
Zusatzmittel Art Gehalt	% von z	-	BV 0,30	BV 0,30	LP 0,2

5 Mutprobe Achterbahn

Die beiden Achterbahnen verlaufen auf insgesamt 1.000 Meter Schienenslänge in gespiegelter Richtung mit ähnlichem Streckenverlauf (Bild 4). Schon die dämmrigen Aufgänge, detailliert gestaltet mit Betonverkleidungen (Bild 5), lassen die Spannung

steigen. Acht Fahrzeuge pro Bahn gehen im Abstand von 20 bis 30 Sekunden auf die Strecke. Mit einer Höchstgeschwindigkeit von über 70 km/h erlebt der Besucher eine rasante Fahrt durch zahlreiche Spezialeffekte, wobei die Chaisen zusätzlich mit bis zu 20 Umdrehungen pro Minute rotieren. Schnell wechselnde

Abfahrten und Steigfahrten beim Kamelrücken, Kurvenfahrten über Slalomschienen und Wenden auf 180°- Bögen sowie der „Immelmann-turm“ mit seinem vertikalen Kurvenverlauf erzeugen ein äußerst intensives Fahrgefühl. Mit Blick auf die Tragkonstruktion mag mancher Besucher denken: „Gut, dass es Beton ist“.



Bild 4: Eine der beiden Achterbahnen...



Bild 5: ...mit den detailliert gestalteten Aufgängen