

# Verwertung von Müllverbrennungsrückständen zur Herstellung zementgebundener Baustoffe

Von Michael Schmidt, Düsseldorf\*)

## 1. Einleitung

Die Umweltverträglichkeit sogenannter Sekundärstoffe — das sind verwertbare industrielle Nebenprodukte und nutzbare Abfallstoffe — kann durch eine sachgerechte Verfestigung mit Zement erheblich verbessert werden. Umweltrelevante Bestandteile — wie z. B. Schwermetalle — werden physikalisch und teilweise auch chemisch so gebunden, daß sie nicht mehr oder nur noch in sehr kleinen Mengen löslich sind [1].

Ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt für die Verfestigung von Sekundärstoffen mit hydraulischen Bindemitteln sind ihre meist geringen Stoffeigenschaften, die sie für eine bautechnische Verwertung ohne Bindemittel oft ungeeignet machen. Vielfach sind sie nicht ausreichend fest, zu wenig dauerhaft oder nicht ausreichend raumbeständig. Mit hydraulischen Bindemitteln können diese Eigenschaften bei einigen Stoffen so verbessert werden, daß sie als hydraulisch gebundene Baustoffe für bestimmte Anwendungsbereiche verwendet werden können. Sie können dort hochwertige natürliche Rohstoffe ersetzen, deren Vorkommen begrenzt sind, und brauchen gegebenenfalls nicht deponiert zu werden. Dies ist sowohl ein Beitrag zum Umweltschutz als auch zur Wirtschaftlichkeit des Bauens.

## 2. Entwicklung eines Verwertungskonzeptes für Müllverbrennungsrückstände

### 2.1 Müllverbrennungsrückstände

Ein Sekundärstoff, bei dem sowohl die Verbesserung der Stoffeigenschaften als auch der Umweltverträglichkeit für eine Verfestigung mit hydraulischen Bindemitteln sprechen, sind die etwa 3 bis 4 Mio. Tonnen Verbrennungsrückstände, die jährlich bei der Verbrennung von Hausmüll in Müllverbrennungsanlagen anfallen. Rund 90% davon sind im allgemeinen gröbere Rostbetaschen mit einem Größtkorn bis zu rd. 45 mm. Sie bestehen überwiegend aus mineralischen Verbrennungsprodukten, aus Glas- und Keramik-

\*) Erweiterte Fassung eines Vortrages auf der Technisch-wissenschaftlichen Zementtagung '88 des VDZ am 20./21. Januar 1988 in Düsseldorf

Tafel 1 Hauptbestandteile der verwendeten Rostasche aus der Müllverbrennungsanlage Düsseldorf

Müllverbrennungs-Rostasche	
Hauptbestandteile	Anteil in Gew.-%
Schlacke	53
Glas	26
Keramik	6
Metall	12
Unverbranntes	<1
Sonstiges	6



Bild 1 Rostasche aus der Müllverbrennungsanlage Düsseldorf

scherven, metallischen Bestandteilen wie Stahl und Aluminium und aus unverbrannten Resten. Die Hauptbestandteile sind in Tafel 1 am Beispiel einer Müllverbrennungsrostasche aus Düsseldorf aufgeführt. Die Rostaschen ähneln — wie Bild 1 zeigt — einem feinkornreichen Zuschlag, sind aber im allgemeinen deutlich weniger fest als natürliche, dichte Mineralstoffe. Sie neigen stark dazu, Wasser aufzusaugen, und ihr Frostwiderstand ist in der Regel gering. Sie können kleinere Mengen an löslichen umweltrelevanten Schadstoffe enthalten. Ihre bautechnische Verwertung ohne Bindemittel ist damit auf untergeordnete Bereiche beschränkt.

Die restlichen 10% der Müllverbrennungsrückstände, d. h. bis zu rd. 350000 Tonnen pro Jahr, sind die in Bild 2 zusammen mit der Rostasche dargestellten sehr feinen, staubförmigen Müllverbrennungsflugaschen. Sie werden mit dem Rauchgas ausgetragen und oft zusammen mit den Reaktionsrückständen der Rauchgasreinigung in Elektrofiltern aufgefangen. Diese Flugaschen enthalten außer Spuren an Schwermetallen auch nennenswerte Mengen an Sulfat, Chlorid und Kalk, die im ungebundenen Zustand leicht löslich sind. Weil ein umweltsicheres Verwertungskonzept fehlt, dürfen die

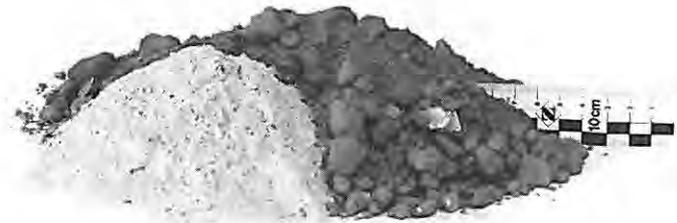


Bild 2 Rostasche und Flugasche mit Rauchgasrückständen der quasi-trockenen Rauchgasreinigung aus der Müllverbrennungsanlage Düsseldorf

Flugaschen ebenso wie Gemische aus Rostasche und Flugasche seit einiger Zeit nicht mehr als Baustoff verwendet werden. Sie werden mit erheblichem Aufwand deponiert. Dieser Aufwand wäre unnötig, wenn nicht nur die MV-Rostaschen, sondern beide Müllverbrennungsrückstände gemeinsam — und damit von ihrem Schadstoffgehalt gesehen praktisch 1 : 9 verdünnt, siehe Tafel 2 — mit hydraulischen Bindemitteln umweltsicher verwertet werden könnten.

Tafel 2 Verwertungsrelevante Hauptbestandteile des Gemisches aus Rostasche und 10 Gew.-% Flugasche aus der Müllverbrennungsanlage Düsseldorf mit quasi-trockener Rauchgasreinigung

Müllverbrennungs-Rostasche mit 10 Gew.-% MV-Flugasche	
Hauptbestandteile	Anteil in Gew.-% <sup>1)</sup>
SiO <sub>2</sub>	53
CaO	15
CaO (frei)	2
SO <sub>3</sub>	1
Cl	<1
Sonstiges	28

<sup>1)</sup> errechneter Summenwert MV-Rostasche plus MV-Flugasche

Die Entwicklung eines Gesamtkonzeptes für die Verwertung geeigneter und die umweltsichere Ablagerung nicht verwertbarer Müllverbrennungsrückstände unter Einsatz hydraulischer Bindemittel ist das Ziel einer im Forschungsinstitut der Zementindustrie Düsseldorf bearbeiteten und von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsgemeinschaften finanziell geförderten Forschungsarbeit. Die Untersuchungen zielen in erster Linie auf einen Einsatz der Müllverbrennungsrostaschen als Mineralstoffgemische für hydrau-

lich gebundene Tragschichten des Straßenbaus — kurz HGT genannt — ab [2,3]. Daneben wird ihre Eignung als Zuschlag für den Beton untergeordneter Bauteile untersucht. Orientierend werden in die umfangreichen Laborversuche auch Gemische aus Rostasche und Müllverbrennungsflugasche einbezogen. Nachfolgend wird zunächst über erste Ergebnisse der Untersuchung an HGT berichtet. Die Betonversuche werden zu einem späteren Zeitpunkt vorgestellt.

## 2.2 Beurteilungskriterien

Richtschnur bei der Entwicklung eines Verwertungskonzeptes für Sekundärstoffe mit hydraulischen Bindemitteln sind die wichtigsten bautechnischen Eigenschaften, die hydraulisch gebundene Baustoffe allgemein auszeichnen. Außerdem muß die Umweltverträglichkeit der erhärteten Baustoffe sichergestellt sein und das Verwertungsverfahren soll möglichst wirtschaftlich sein. Daraus ergibt sich das nachfolgende Anforderungsprofil, dessen Einzelkriterien je nach Anwendungsgebiet unterschiedlich zu wichten sind.

■ Hydraulisch gebundene Baustoffe müssen ausreichend fest sein und sollen sich bei äußerer Belastung überwiegend elastisch verformen. Als Maßstab können die Festigkeits- und Verformungseigenschaften der bewährten hydraulisch gebundenen Baustoffe dienen.

■ Die Baustoffe müssen im Gebrauchszustand einen ausreichenden Widerstand gegen Witterungseinflüsse aufweisen und raumbeständig sein. Auch hierfür können die bisherigen Erfahrungen als Maßstab dienen. Allerdings enthalten verschiedene potentiell geeignete Abstoffe Bestandteile, die möglicherweise die Dauerhaftigkeit des verfestigten Baustoffs nachteilig beeinflussen können. Bezogen auf die Verfestigung von Müllverbrennungsrückständen sind vier wichtige Gesichtspunkte besonders zu untersuchen:

1) Wie wirken sich die wenig festen, saugfähigen Feinsteile auf die Witterungsbeständigkeit aus?

2) Ist mit Alkalireaktionen des Glases zu rechnen?

3) Beeinträchtigen das Sulfat und das Chlorid in der MV-Flugasche die Raumbeständigkeit des verfestigten Baustoffs und

4) kommt es kurz- oder längerfristig zu nachteiligen Reaktionen der Aluminiumteile in den Rostaschen mit Bestandteilen des Zementes und/oder mit anderen Inhaltsstoffen?

■ Die fertig verarbeiteten hydraulisch gebundenen Baustoffe dürfen keine unzulässigen Mengen an umweltrelevanten Stoffen abgeben. Die Beurteilung der „Umweltverträglichkeit“ von Baustoffen ist recht schwierig, weil sachgerechte Kriterien bislang weitgehend fehlen und auch nicht einfach zu finden sind. Bei der weiteren Diskussion sollten die beiden folgenden Vorschläge bedacht werden:

— Als Maßstab für die vertretbare Menge an löslichen umweltrelevanten Stoffen könnten die unter gleichen praxismgerechten Bedingungen ermittelten löslichen Inhaltsstoffe natürlicher Baustoffe und Böden unter jeweils vergleichbaren „Lösungsbedingungen“ herangezogen werden.

— Da die Auslaugrate — wie die Ausführungen von Sprung und Rechenberg [1] gezeigt haben — um so niedriger ist, je dichter das Gefüge der Baustoffe ist, könnte eine Höchstdurchlässigkeit der eingebauten Baustoffe gegen Wasser gefordert werden, z. B. der für praktisch wasserundurchlässige Deponiedichtungen festgelegte Durchlässigkeitsbeiwert von  $k \leq 10^{-9}$  m/sec. Dauerhaft ist diese Dichtigkeit in der Regel nur mit Bindemitteln zu erreichen.

■ Neben den vorgenannten technischen und ökologischen Anforderungen müssen Bauweisen mit hydraulisch gebundenen industriellen Nebenprodukten und nutzbaren Abfallstoffen wirtschaftlich sein. Statt der sonst üblichen rein betriebswirtschaftlichen Rechnung kann es dabei sinnvoll sein, volkswirtschaftliche Gesichtspunkte mit zu berücksichtigen, z. B. wenn es sich um einen Stoff handelt, bei dem erheblicher Entsorgungsdruck besteht. Ein wesentlicher Faktor sind dabei auch ersparte Deponiegebühren, die heute für Hausmülldeponien bis zu rd. DM 50,—, für die Sondermüllentsorgung oft über DM 200,— pro Tonne betragen.

### 2.3 Untersuchungen zur Verwertung in HGT\*)

Entsprechend den drei erstgenannten technischen und ökologischen Forderungen umfaßt das Untersuchungsprogramm zur Verwertung von Müllverbrennungsrückständen in hydraulisch gebundenen Tragschichten neben der üblichen Eignungsprüfung Prüfungen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten, zur Dauerhaftigkeit und zur Umweltverträglichkeit zementverfestigter Müllverbrennungsrostaschen mit und ohne deren Flugasche.

#### 2.3.1 Ausgangsstoffe

*Müllverbrennungsrückstände:* Die Untersuchungen wurden mit Müllverbrennungsrückständen aus der Verbrennungsanlage in Düsseldorf durchgeführt, die mit einer quasi-trockenen Rauchgasreinigung ausgerüstet ist. Die Zusammensetzung der Rostasche ist in Tafel 1, ihre gut korngestufte Sieblinie ist in Bild 3 dargestellt. Da Müllverbrennungsrückstände aus verschiedenen Anlagen sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein können, gelten die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse dementsprechend auch nur für die hier verwendeten Ausgangsstoffe. Die im folgenden beschriebene Vorgehensweise bei den Untersuchungen dürfte aber auch bei anders zusammengesetzten MV-Rückständen zu aussagefähigen Resultaten führen.

Die angelieferte, bereits in der Anlage mit Wasser abgekühlte Rostasche wurde zunächst mit ihrer Eigenfeuchte von rd. 14 Gew.-% etwa ein bis drei Monate in geschlossenen Behältern vorgelagert. Die hohe Eigenfeuchte bestätigt, daß MV-Rostaschen zu einem nennenswerten Anteil aus saugfähigen Bestandteilen bestehen. Durch die feuchte Vorlagerung sollen mögliche chemische Reaktionen zwischen den verschiedenen Bestandteilen teilweise bereits vor dem Mischen mit dem Bindemittel ablaufen. Die Gemische aus

\*) An der Durchführung und Auswertung der Versuche war Herr Dipl.-Ing. Vogel maßgeblich beteiligt.

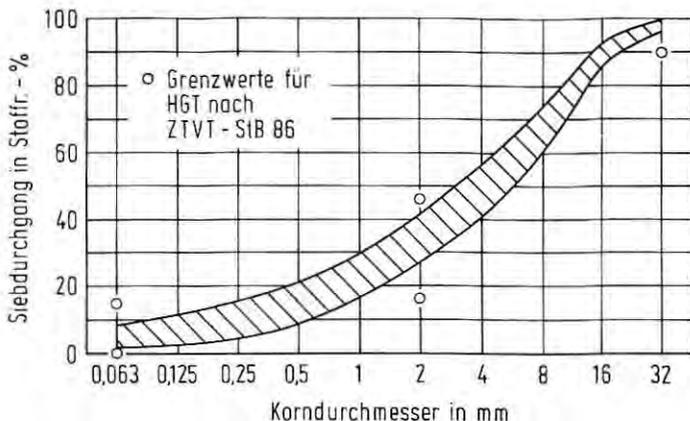


Bild 3 Kornzusammensetzung der untersuchten Rostasche aus der Müllverbrennungsanlage Düsseldorf

Rostasche und Müllverbrennungsflugasche wurden ca. einen Monat vor ihrer Weiterverarbeitung in einem Labormischer vorgemischt und dann ebenfalls feucht gelagert.

**Hydraulische Bindemittel:** Als Bindemittel wurde Zement nach DIN 1164 verwendet, und zwar wegen der möglicherweise alkaliempfindlichen Glasbestandteile der Rostaschen und wegen des hohen Sulfatgehaltes der Müllverbrennungsflugaschen überwiegend ein handelsüblicher Hochofenzement HOZ 35 L NW-HS-NA, außerdem ein Portlandzement PZ 35 F. In einigen Versuchen wurde auch ein hydraulischer Tragschichtbinder HT 35 nach DIN 18 506 eingesetzt.

### 2.3.2 Bestimmung des Bindemittelgehaltes

Zur Bestimmung des erforderlichen Bindemittelgehaltes wurde — wie in der Eignungsprüfung für HGT nach den TP-HGT [4] üblich — der Proctorversuch durchgeführt, die Druckfestigkeit bestimmt und der Frostwiderstand ermittelt.

**Proctorversuche:** Der im Proctorversuch ermittelte, für die Verarbeitung günstigste Wassergehalt und die anzustrebende Trockendichte sind in Tafel 3 aufgeführt. Der scheinbar sehr hohe optimale Wassergehalt erklärt sich durch die hohe Eigenfeuchte der saugfähigen Rostasche.

Alle Prüfkörper für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden auf die in den Proctorversuchen ermittelten Proctordichten (100% Dpr) verdichtet. Der Wassergehalt der Baustoffgemische entsprach nach [4] rd. 90% des optimalen Wassergehaltes nach Tafel 3.

**Druckfestigkeit:** Als Maß für den ausreichenden Bindemittelgehalt von HGT aus den heute üblichen, gut korngestufen natürlichen Mineralstoffgemischen ist in der Eignungsprüfung eine 28-Tage-Druckfestigkeit von mindestens 7, höchstens 12 N/mm<sup>2</sup> einzuhalten. Dazu werden nach den TP-HGT [4] Baustoffgemische — d. h. Mineralstoff-Bindemittel-Wasser-Gemische — mit jeweils drei unter-

Tafel 3 Ergebnisse der Proctorversuche nach [4] an den Baustoffgemischen aus Müllverbrennungsrückständen und Zement PZ 35 F

Ausgangsstoff	Gehalt PZ 35 F Gew.-%	Proctorversuch	
		Proctordichte kg/dm <sup>3</sup>	opt. Wassergehalt Gew.-%
MV-Rostasche*)	8,0	1,75	18,5
MV-Rostasche*) mit 10 Gew.-% MV-Flugasche	12,0	1,72	17,5

\*) Müllverbrennungsanlage Düsseldorf

schiedlichen Bindemittelgehalten hergestellt. Im vorliegenden Fall wurden für die HGT aus Rostasche Bindemittelgehalte von 6, 8 und 10 Gew.-% sowie für die feinstkornreicheren HGT mit Rostasche und Flugasche von 8, 10 und 12 Gew.-% gewählt. Die Druckfestigkeit stieg, wie Bild 4 exemplarisch für die HGT mit Rostasche zeigt, mit zunehmendem Bindemittelgehalt nahezu geradlinig an, wie dies bei HGT üblich ist. Der geforderte Bereich für die 28-Tage-Druckfestigkeit wurde mit mindestens 6 und höchstens rd. 12 Gew.-% Bindemittel eingehalten. Bei den Gemischen mit Rostasche und Flugasche war der Anstieg ebenfalls linear, der Zementgehalt lag hier zwischen rd. 5 und höchstens 12 Gew.-%.

Frostwiderstand: Zusätzlich wurde in der Eignungsprüfung auch der Frostwiderstand ermittelt. Das übliche Prüfverfahren der TP-HGT [4] sieht vor, daß erhärtete Prüfkörper (Zylinder D = 150 mm,

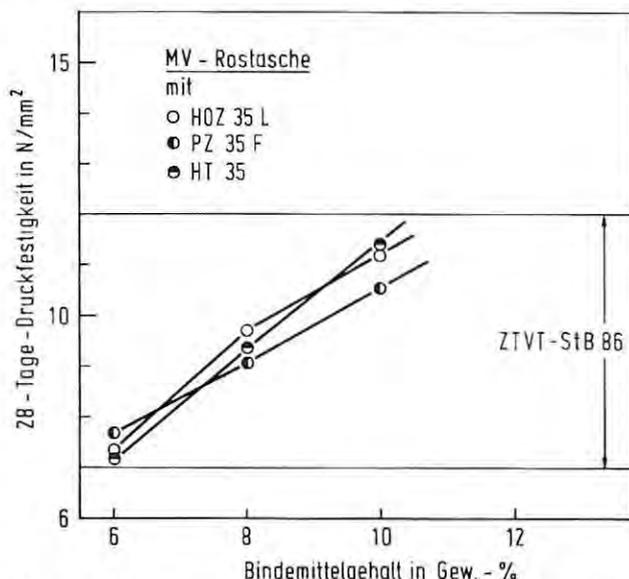


Bild 4 28-Tage-Druckfestigkeit (Zylinder 150/125 mm) von HGT aus Rostasche bei unterschiedlichen Bindemittelgehalten

H = 125 mm) 12 Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt werden, wobei sie nur in den Auftauphasen mit den Stirnflächen auf einen nassen Filz gelegt werden und dabei Gelegenheit haben, Wasser aufzusaugen. Als Maß für eventuelle Gefügelockerungen wird die Längenänderung der Prüfkörper gemessen. Sie darf nach 12 Frost-Tau-Wechseln höchstens 1‰ der Ausgangslänge erreichen.

In den Bildern 5 und 6 sind als Beispiele die Längenänderungen der Gemische mit unterschiedlichen Gehalten an Portlandzement PZ 35 F in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel dargestellt. Da das Frostverhalten der Gemische gänzlich unbekannt war, wurden jeweils 100 Wechsel durchgeführt. Außerdem wurde nach dem 12. Wechsel die Befeuchtung der Prüfkörper gegenüber dem üblichen Verfahren [4] etwas verstärkt, indem die Prüfkörper mit dem sonst nur während der Auftauzeit aufliegenden wassergesättigten Filz auf den Stirnflächen eingefroren wurden. Die Ergebnisse liegen damit auf der „sicheren Seite“.

Die Bilder zeigen, daß bei 12 Wechseln nach TP-HGT bei keinem Gemisch der Grenzwert von 1‰ überschritten wurde. Gemessen an den derzeitigen Anforderungen würde dies bedeuten, daß alle Gemische einen ausreichenden Frostwiderstand besäßen. Die Bilder zeigen aber auch, daß die Längenänderung der Gemische mit MV-Rostasche und 4 bis 6 Gew.-% Zement sowie der HGT mit Rostasche und Flugasche sogar noch mit 8 Gew.-% Zement mit zunehmender Anzahl von Frost-Tau-Wechseln danach so stark anstiegen, daß die Prüfkörper bereits nach 20 bis 40 Wechseln große Längenänderungen aufwiesen oder schon zerfallen waren. Deshalb wurde im vorliegenden Fall ein ausreichender Frostwiderstand der HGT erst angenommen, wenn die Längenänderungen auch nach 100 Wechseln den eigentlich für 12 Wechsel geltenden Grenzwert von

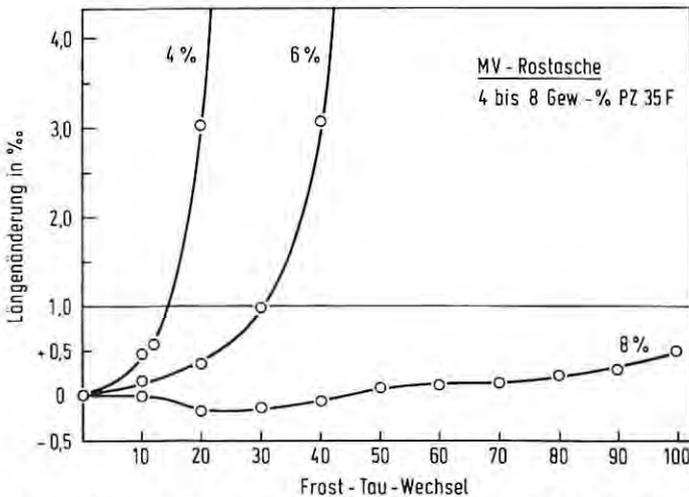


Bild 5 Längenänderungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bei der Frostprüfung von HGT aus Rostasche bei unterschiedlichen Bindemittelgehalten

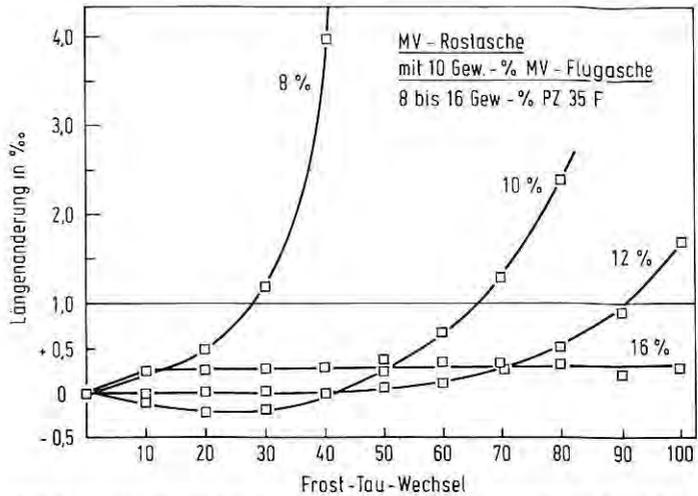


Bild 6 Längenänderungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bei der Frostprüfung von HGT aus Rostasche mit Flugasche bei unterschiedlichen Bindemittelgehalten

1‰ nicht oder nur wenig überschritten. Dies war bei den Müllverbrennungsrostaschen erst bei einem Zementgehalt von 8 Gew.-%, bei den feinstkornreicheren und dadurch möglicherweise noch wasserempfindlicheren HGT mit Flugasche erst bei 12 Gew.-% Zement der Fall. Diese Bindemittelgehalte wurden auch für die weiteren Untersuchungen des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, der Dauerhaftigkeit und der Umweltverträglichkeit beibehalten.

Ob die aufgrund des verschärften Frostkriteriums festgelegten hohen Bindemittelgehalte tatsächlich in vollem Umfang erforderlich sind, oder ob auch mit etwas geringeren Mengen gearbeitet werden kann, kann nur in Praxisversuchen endgültig festgestellt werden. Die Ergebnisse der Frostprüfung machen aber deutlich, daß als Kriterium für einen hinreichenden Bindemittelgehalt bei HGT aus Müllverbrennungsrückständen der ausreichende Frostwiderstand entscheidender sein kann als die vorgegebene Druckfestigkeit. Gleichzeitig muß über eine Anpassung des derzeitigen Frostprüfverfahrens an die Besonderheiten der hier untersuchten Gemische nachgedacht werden. Einen Hinweis auf mögliche Verbesserungen gibt Bild 7. Im linken Teil sind auf der Abszisse die Längenänderungen aller untersuchten Gemische nach zwölf Frost-Tau-Wechseln mit dem heutigen Verfahren der TP-HGT und auf der Ordinate die Längenänderungen der gleichen Gemische nach 50 Frost-Tau-Wechseln mit der etwas verschärften Frostbeanspruchung aufgetragen. Die Längenänderung nach 12 Wechseln war immer kleiner als 1‰ und damit kleiner als der derzeitige Grenzwert. Bei 50 Frost-Tau-Wechseln wies dagegen ein Teil der Gemische schädliche Längenänderungen bis 15‰ auf oder war bereits zerfallen. Mit dem derzeit gültigen Prüfungsmodus wäre dieses Verhalten der Gemische nicht erkannt worden. Der rechte Teil von Bild 7 zeigt dagegen, daß nach 35 Frost-Tau-Wechseln mit dem etwas schärferen Verfah-

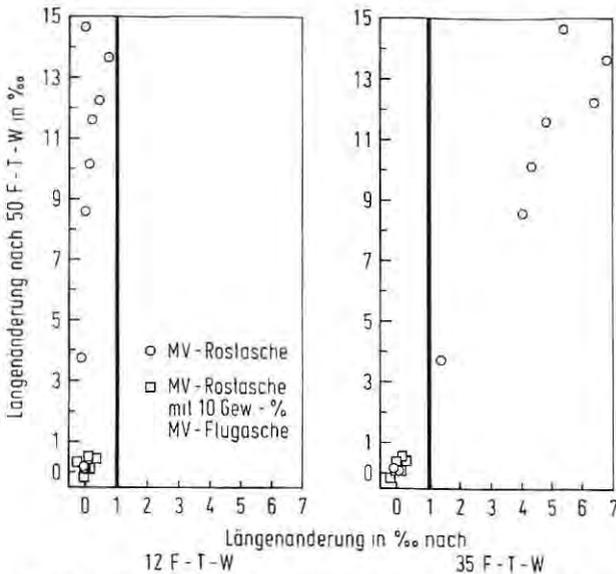


Bild 7 Längenänderungen aller untersuchten HGT nach 12 Frost-Tau-Wechseln mit dem Verfahren der TP-HGT [4] (links) bzw. nach 35 Frost-Tau-Wechseln mit verstärkter Befeuchtung (rechts) und nach 50 Frost-Tau-Wechseln mit verstärkter Befeuchtung

ren eine eindeutige Differenzierung möglich war, weil alle Gemische, deren Längenänderung nach 50 Frost-Tau-Wechseln zwischen 4 und 15‰ betragen, auch schon nach 35 Frost-Tau-Wechseln Längenänderungen von mehr als 1‰ aufwiesen. Die Darstellung in Bild 7 zeigt, daß die Aussagekraft der Frostprüfung durch eine stärkere Befeuchtung und/oder durch mehr Frost-Tau-Wechsel verbessert werden kann. Für konkrete Festlegungen der Frostprüfung sind aber noch weitere Untersuchungen erforderlich, und zwar sowohl im Labor als auch in der Praxis, an der letztendlich die Laborversuche geeicht werden müssen. Solche Versuche werden im Rahmen der weiteren Untersuchungen durchgeführt.

### 2.3.3 Festigkeits- und Verformungsverhalten

Die Druckfestigkeit von HGT kann eine einfach zu prüfende Beurteilungsgröße für ihr Gebrauchsverhalten sein, wenn aufgrund von Laboruntersuchungen und praktischen Erfahrungen Korrelationen zwischen ihr und den eigentlich gebrauchrelevanten Größen bekannt sind, nämlich z. B. dem Frostwiderstand, der Biegezugfestigkeit und dem Verformungsverhalten bei äußerer Belastung. Für HGT mit den bislang verwendeten Mineralstoffgemischen liegen solche Korrelationen vor [5]. Bei HGT mit neuen Ausgangsstoffen ist zunächst zu prüfen, ob die bekannten Zusammenhänge auch für sie gelten oder nicht. Wie in Abschnitt 2.3.2 bereits gezeigt wurde, war bei den hier verwendeten Müllverbrennungsrückständen nicht die Druckfestigkeit, sondern der hinreichende Frostwiderstand das ausschlaggebende Kriterium für die sachgerechte Festlegung der

Bindemittelmenge in der Eignungsprüfung. Im vorliegenden Fall resultierte daraus eine vergleichsweise hohe 28-Tage-Druckfestigkeit von 10 N/mm<sup>2</sup> bei der Müllverbrennungsrostasche und rd. 12,5 N/mm<sup>2</sup> bei der Müllverbrennungsrostasche mit Flugasche. Zur Überprüfung der vorgenannten Korrelationen wurde das Festigkeits- und Verformungsverhalten dieser HGT mit demjenigen von HGT mit Kiessand gleicher Kornzusammensetzung bei gleicher Druckfestigkeit verglichen.

Zur Beurteilung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens wurden überwiegend im Alter von 28 Tagen, bei den Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit auch zu späteren Zeiten, die Biegezugfestigkeit an Balken 100/100/500 mm mit Dreipunktbelastung nach DIN 1048 gemessen, an denen zuvor in Anlehnung an DIN 1048 auch der Biegezug-E-Modul ermittelt worden war. Die Spaltzugfestigkeit wurde an Zylindern 150/125 mm und der Druck-Elastizitätsmodul an Zylindern 150/300 mm nach DIN 1048 geprüft. Zusätzlich wurde noch der dynamische E-Modul durch Ermittlung der Schalllaufzeit ebenfalls an Balken 100/100/500 mm ermittelt. Das Vorgehen bei den einzelnen Prüfungen entsprach auch demjenigen der umfangreichen Untersuchungen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten von HGT in [5]. Die Prüfkörper für die Spalt- und Biegezugprüfungen wurden bis zur Prüfung in einer Nebelkammer bei 100% relativer Feuchte und 20 °C, die Körper für die Prüfung des E-Moduls bei 20 °C und rd. 95% r.F. gelagert.

Die Bilder 8 und 9 zeigen exemplarisch den Biegezug-E-Modul, die Biegezugfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit der HGT mit Müllverbrennungsrückständen im Vergleich zu HGT aus Kiessand 0/32 mm. In beiden Fällen waren bei jeweils gleichen Druckfestigkeiten sowohl die Biegezugfestigkeit mit rd. 1,8 bzw. 2,0 N/mm<sup>2</sup> als auch die Spaltzugfestigkeit mit rd. 1,0 bzw. 1,2 N/mm<sup>2</sup> jeweils praktisch gleich. Die Verhältnisse zwischen ihnen und den jeweiligen Druckfestigkeiten entsprachen damit den bisherigen Erfahrungen.

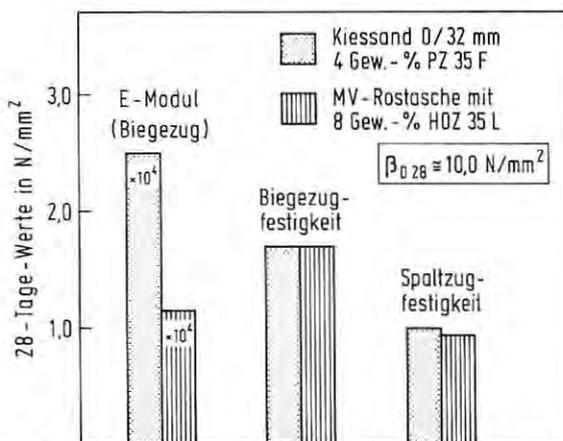


Bild 8 E-Modul, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit von HGT aus Rostasche im Vergleich zu Kiessand-HGT gleicher Druckfestigkeit

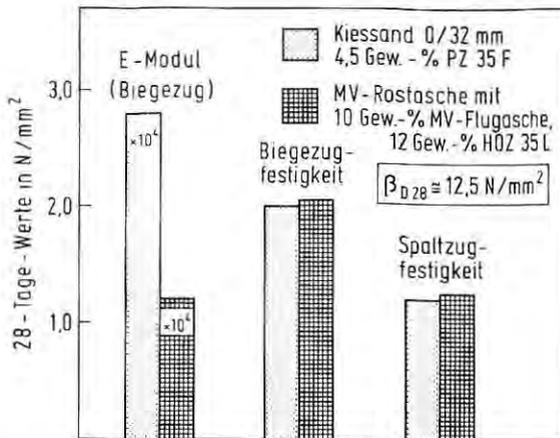


Bild 9 E-Modul, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit von HGT aus Rostasche mit Flugasche im Vergleich zu Kiessand-HGT gleicher Druckfestigkeit

Sie lagen allerdings wegen des für einen ausreichenden Frostwiderstand erforderlichen vergleichsweise hohen Bindemittelgehalt im oberen Bereich des nach [5] für übliche HGT nach ZTVT insgesamt ermittelten Spalt- und Biegezugfestigkeitsbereiche.

Der Elastizitätsmodul der HGT mit Müllverbrennungsrückständen war dagegen trotz gleicher Druckfestigkeit infolge des wenig festen, porösen und verformbaren Müllverbrennungskorns mit rd. 12000 N/mm² immer nur weniger als halb so groß wie bei den HGT aus Kiessand. Ob dies Auswirkungen auf das Tragverhalten der damit hergestellten HGT hat, muß in Praxisversuchen geklärt werden. Denkbar ist, daß sich der niedrige E-Modul günstig auf die Reißneigung der HGT infolge Eigenspannungen auswirkt.

Über die teilweise noch nicht abgeschlossenen übrigen Festigkeits- und Verformungsprüfungen wird zu einem späteren Zeitpunkt berichtet. Die bisherigen Laborergebnisse lassen aber erwarten, daß HGT mit Müllverbrennungsrückständen von ihrem mechanischen Verhalten her wie herkömmliche HGT einsetzbar sind. Die Biegezugfestigkeit dürfte ausreichen, um die Verkehrsbelastungen in Aufbauten nach RStO aufzunehmen. Die frische HGT sollte wie üblich zur Vermeidung unerwünschter klaffender Risse eingekerbt werden. Entsprechende Maßnahmen sind in den ZTVT [2] aufgeführt.

### 2.3.4 Dauerhaftigkeit

Die zweite Forderung an hydraulisch gebundene Baustoffe war, daß sie nicht durch Witterungseinflüsse geschädigt werden und daß sie raumbeständig sind. Zusätzlich zu den in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Frostprüfungen werden deshalb umfangreiche Langzeitversuche durchgeführt, bei denen die Prüfkörper unter verschiedenen

praxisähnlichen Bedingungen gelagert werden, wie z. B. bei gleichbleibend hoher Luftfeuchtigkeit und/oder erhöhter Temperatur, unter Wasser sowie wechselnd feucht und trocken. Die Gemische werden dabei in regelmäßigen Zeitabständen auf Festigkeit geprüft und visuell beobachtet.

Dabei stieg beispielsweise die Druckfestigkeit der verfestigten MV-Rostasche bei einer gleichbleibenden Lagerung bei 20° C und 95% rel. Feuchte bei den untersuchten Bindemitteln und Bindemittelgehalten bis zu einem halben Jahr ständig an, allerdings nach dem 28. Tag zunehmend langsamer. Bei diesen Prüfkörpern fanden somit keine inneren Gefügeveränderungen statt, die sich auf die Druckfestigkeit meßbar auswirkten, und zwar im Unterschied zu [6] unabhängig von der Art des Bindemittels. Allerdings wurden Prüfkörper, die infolge der nachstehend beschriebenen Erscheinungen sichtbar geschädigt waren, für die Festigkeitsprüfungen nicht verwendet.

Bei den Untersuchungen zur Raumbeständigkeit der hydraulisch gebundenen Müllverbrennungsrückstände konnte bislang an den Laborprüfkörpern keine schädigende Alkalireaktion der vorhandenen Glasstücke und auch bei den HGT aus Rostasche mit Flugasche kein Sulfatreiben festgestellt werden. Überwiegend bei HGT mit Rostaschen und Flugaschen traten aber an einem Teil der vergleichsweise kleinen Laborprüfkörper mit einem Durchmesser von nur rd. 100 oder 150 mm oft schon nach wenigen Tagen oberflächliche, meist trichterförmige Abplatzungen und auch Risse auf. Am Grund dieser sogenannten „pop-outs“ oder in den Rissen wurden jeweils kristallartige Reaktionsprodukte festgestellt. Ihre Untersuchung ergab, daß es sich überwiegend um Aluminiumsalze handelte, die durch Reaktionen zunächst zwischen größeren Aluminiumteilen der Rostasche und dem Calciumhydroxid des Zementes und nachfolgend zwischen dem Aluminiumhydroxid und dem Sulfat und dem Chlorid der Müllverbrennungslugasche entstanden waren. Bei HGT mit reiner Rostasche traten ähnliche Erscheinungen deutlich später und nur in geringerem Umfang auf. Als Ursache ist die Umsetzung des Aluminiums zu Aluminiumhydroxid ohne weitergehende Reaktion zu sehen.

Bei feucht gelagerten Prüfkörpern waren diese Reaktionsprodukte zunächst gelartig. Erst beim Austrocknen der Prüfkörper kristallisierten sie dann aus und bewirkten die gezeigten Gefügestörungen. Günstig wirkte sich dementsprechend eine längere Feuchtlagerung der Prüfkörper nach der Herstellung aus. Bild 10 zeigt das Ergebnis von Versuchen, bei denen die Prüfkörper nach ihrer Herstellung zunächst bis zu den angegebenen Zeitpunkten bei 20° C in einer Nebelkammer feucht gelagert wurden. Danach konnten sie bis zum Alter von 270 Tagen bei gleicher Temperatur und 95% relativer Feuchte weiter erhärten und dabei langsam austrocknen. Die Volumenverminderungen in Prozent des Ausgangsvolumens waren mit rd. 1,7% niedrig, wenn der Prüfkörper bereits sehr früh, d. h. im Alter von 2 Tagen langsam austrocknen konnte. Vermutlich werden die festgestellten Reaktionen bei geringer Feuchte stark gebremst. Bei längerer Feuchtlagerung von sieben Tagen und darüber wurden um so weniger Abplatzungen festgestellt, je länger die Prüfkörper feucht erhärten konnten. Die Gemische waren dann bereits deutlich fester, wenn die Reaktionsprodukte auskristallisierten.

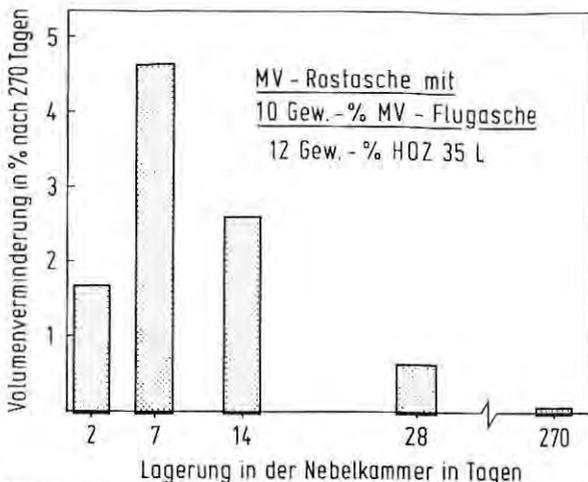


Bild 10 Volumenverminderung infolge „pop-outs“ bei unterschiedlich langer feuchter Vorlagerung von Prüfkörpern aus HGT mit Rostasche und Flugasche

An einer rd. 1 m<sup>2</sup> großen und 15 cm dicken Platte aus HGT mit Rostasche, die bislang über sieben Monate ungeschützt der Witterung ausgesetzt ist, konnten bislang nur sehr vereinzelt Abplatzungen unmittelbar an der Oberfläche festgestellt werden. Inwieweit auch an eingebauten HGT damit zu rechnen ist, muß in Praxisversuchen ermittelt werden.

### 2.3.5 Umweltverträglichkeit

Die Umweltverträglichkeit der zementverfestigten Müllverbrennungsrückstände wurde überwiegend mit dem praxisgerechteren Durchflußverfahren des VDZ [1] geprüft. Dabei wurden die von Sprung und Rechenberg [1] ermittelten Ergebnisse bestätigt: Die mit 12 Gew.-% Zement verfestigten flugaschehaltigen Müllverbrennungsrückstände wiesen einen Durchlässigkeitsbeiwert von i. M.  $3 \times 10^{-9}$  m/sec auf. Sie waren damit für praktische Verhältnisse wasserundurchlässig, so daß unter üblichen Bedingungen keine Elution der Prüfkörper möglich war. Um überhaupt eine Aussage über die Wirkung der Verfestigung machen zu können, wurde das eluierende Wasser über 48 Stunden mit einem Überdruck von 2 bar durch die HGT-Prüfkörper gepreßt. Bei diesen nur im Labor möglichen Bedingungen ergab sich nach Bild 11 ein auf die trockene Stoffmenge bezogener Gesamtdampfdruck im Eluat der HGT von nur rd. 1,4 g/kg. Dies bedeutet, daß nur noch rd. 2% der Menge gelöst wurden, die im Eluat des ebenfalls auf seine Proctordichte verdichteten, aber unverfestigten Rostasche-Flugasche-Gemisch nachgewiesen wurde. Dabei ist zu beachten, daß dessen Durchlässigkeitsbeiwert nur zwischen  $10^{-4}$  und  $10^{-5}$  m/sec lag, so daß sogar ohne Druck innerhalb von 48 Stunden rd. 90 l Wasser durch die kleinen Proben (D = 100 mm, H = 120 mm) hindurchtreten konnte. Auch das sonst sehr leicht lösliche Chlorid wurde durch die Verfestigung mit Ze-

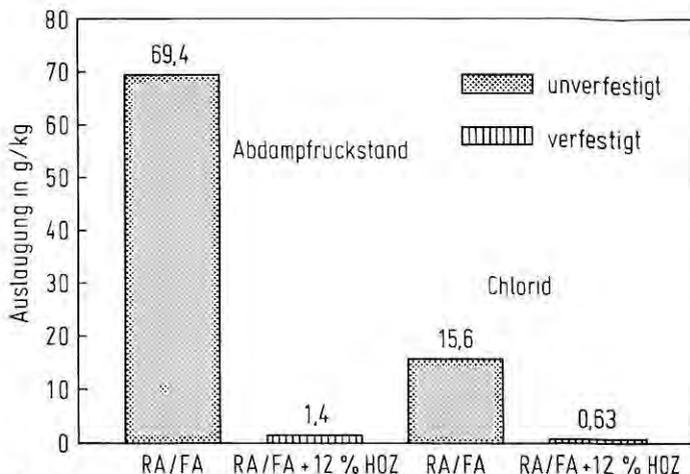


Bild 11 Verminderung der Gesamtauslaugung und der Chloridauslaugung aus Rostasche-Flugasche-Gemischen nach Tafel 2 durch Verfestigung mit Zement. Versuchsdauer 48 h, VDZ-Durchflußgerät, verfestigte Müllverbrennungsrückstände Elution mit 2 bar Druck

ment so immobilisiert, daß die Auslaugrate von 16 g/kg auf nur noch rd. 0,6 g/kg gesenkt wurde, d. h. sie war um rd. 96% kleiner als beim unverfestigten Material.

### 3. Zusammenfassung und Folgerungen

Die wesentlichsten Erkenntnisse der bisher durchgeführten, allerdings noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie zur Entwicklung eines Konzeptes für die Verwertung von Sekundärstoffen mit hydraulischen Bindemitteln am Beispiel der Müllverbrennungsrückstände lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Schätzungsweise rd. 30 Mill. Tonnen bislang nicht verwerteter, weniger hochwertiger Mineralstoffe, Recyclingbaustoffe und geeigneter Sekundärstoffe könnten jährlich bei sachgerechtem Vorgehen sinnvoll für hydraulisch gebundene Baustoffe verwertet werden [3]. Dadurch können knapper werdende natürliche Rohstoffe und der wertvolle Deponieraum geschont werden.

- Die mit solchen Stoffen hergestellten hydraulisch gebundenen Baustoffe müssen ausreichend fest, dauerhaft witterungs- und raumbeständig, umweltverträglich und wirtschaftlich sein. Wegen der Vielzahl der infrage kommenden Stoffe wird es erforderlich sein, für jeden Ausgangsstoff ein eigenes, auf seine spezifischen Eigenschaften und auf den Verwendungszweck abgestimmtes technologisches Verwertungskonzept zu entwickeln.

- Die bisherigen Laboruntersuchungen für die Verwendung von Müllverbrennungsrückständen als Mineralstoffgemische für HGT ergaben:

○ Maßgebendes Kriterium für die sachgerechte Festlegung des Bindemittelgehaltes ist der ausreichende Frostwiderstand der erhärteten HGT, da hierfür ein größerer Bindemittelgehalt erforderlich sein kann als zum Erreichen der derzeit festgelegten Festigkeitskriterien. Der Frostwiderstand sollte deshalb in der Eignungsprüfung immer geprüft werden. Das derzeitige Frostprüfverfahren der TP-HGT muß allerdings den speziellen Eigenschaften von HGT mit Sekundärstoffen angepaßt werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

○ Die Biegezugfestigkeit von rd. 1.8 bis 2.0 N/mm<sup>2</sup> und die Spaltzugfestigkeit von rd. 1.0 bis 1.2 N/mm<sup>2</sup> entsprachen im vorliegenden Fall demjenigen üblicher HGT mit gleicher, vergleichsweise hoher Druckfestigkeit von rd. 10 bis 12 N/mm<sup>2</sup>. Lediglich der Elastizitätsmodul war erklärbar niedriger.

○ Für die Raumbeständigkeit der verfestigten Müllverbrennungsrückstände ist es günstig, wenn die unverfestigten Rückstände vor der Weiterverarbeitung längere Zeit feucht vorgelagert werden und wenn die verfestigten Baustoffgemische nach dem Einbau möglichst lange feucht nachbehandelt werden. Die Verwertung der Müllverbrennungsrostaschen würde wesentlich erleichtert, wenn größere Aluminiumteilchen bei der Aufbereitung entfernt werden könnten. Die ausreichende Raumbeständigkeit muß in Praxisversuchen weiter beobachtet werden.

○ Aus zementverfestigten Müllverbrennungsrostaschen werden bei einem ausreichenden Bindemittelgehalt praktisch keine, aus Gemischen aus Rostasche und MV-Flugasche kaum lösliche umweltrelevante Schadstoffe ausgelaugt, wenn ihr Gefüge durch die Verfestigung für Wasser ähnlich undurchlässig wird wie eine Depositionsdichtung (Durchlässigkeitsbeiwert  $k \leq 10^{-9}$  m/s).

■ Die vorliegenden Ergebnisse sind bereits so aufschlußreich, daß mit der praktischen Erprobung zementverfestigter Müllverbrennungsrostaschen als Tragschichten im Straßenbau begonnen werden kann. Eine erste Versuchsstrecke wurde bereits in Hamburg gebaut [6]; eine weitere wird in Kürze in Düsseldorf folgen.

## SCHRIFTTUM

- [1] Sprung, S.; Rechenberg, W.: Einbindung von Schwermetallen in Abfallstoffen durch Verfestigung mit Zement. *beton* 38 (1988), H. 5, S. 193—198
- [2] Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau (ZTVT-StB 86), Ausgabe 1986. Der Bundesminister für Verkehr, Bonn 1986
- [3] Schmidt, M.: Verwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen in zementgebundenen Oberbauschichten. *Straße und Autobahn* 37 (1986) Nr. 12, S. 540—546
- [4] Technische Prüfvorschriften für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) (TP HGT-StB 86), Ausgabe 1986. Hrg. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1986
- [5] Bonzel, J.; Schmidt, M.: Zum Festigkeits- und Verformungsverhalten hydraulisch gebundener Tragschichten des Straßenbaus. *Straße und Autobahn* 38 (1987) Nr. 10, S. 359—367
- [6] Schubenz, Zementgebundene Müllverbrennungsrasche im Straßenbau. — Ein Beitrag zum Umweltschutz. *beton* 38 (1988) H. 5, S. 182—187