

---

## Inhaltsverzeichnis

I.	Nomenklatur	
II.	Kurzzusammenfassung	
III.	Abstract	
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung	1
1.2	Untersuchungsmaterial	2
1.3	Literaturübersicht und grundlegende Betrachtungen	5
1.3.1	Verwendung von Lateriten	5
1.3.2	Energiesparende und eisenreiche Zemente	8
<b>2</b>	<b>Experimentelle Methodik</b>	<b>13</b>
2.1	Präparationsverfahren	14
2.1.1	Herstellung der Abmischungen	14
2.1.2	Sinterversuche	14
2.2	Charakterisierung des Untersuchungsmaterials	15
2.2.1	Röntgenpulverdiffraktometrie	15
2.2.2	Rasterelektronenmikroskopie	16
2.2.3	Röntgenfluoreszenzanalytik	16
2.2.4	ICP-OES (optische Emissionsspektroskopie)	16
2.2.5	UV-VIS-Spektroskopie	17
2.2.6	Thermogravimetrie/Thermodifferentialanalyse	17
2.2.7	Wärmeflußkalorimetrie	17
2.2.8	Wassergehalt und Glühverlust	19
2.2.9	Korngrößenanalyse und Bestimmung der spezifischen Oberfläche	19
2.2.10	Festigkeitsmessungen an Kleinprismen	20
2.3	Berechnungen zum Phasengehalt der Sinterprodukte	21
<b>3</b>	<b>Versuchsprogramm</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>23</b>
4.1	Chemische und mineralogische Charakterisierung der Ausgangsstoffe	23
4.1.1	Lateritischer Abfall (Restmaterial)	23
4.1.2	Zusatzstoffe	25
4.1.3	Korngrößenbestimmung	26

---

4.2	Abmischungen von lateritischem Abfall und Kalk (Versuchsreihen A) .....	27
4.2.1	Phasenbildung und Reaktivität in Abhängigkeit von der Sintertemperatur .....	28
4.2.2	Phasenbildung und Reaktivität in Abhängigkeit vom CaO-Anteil .....	34
4.2.3	Zusammenfassung .....	38
4.3	Abmischungen von lateritischem Abfall, Kalk, Kaolin und Anhydrit .....	41
4.3.1	Abmischungen von lateritischem Abfall, Kalk, Kaolin und Anhydrit bei $T_s=1100\text{ °C}$ (Versuchsreihen B) .....	42
4.3.2	Zusammenfassung .....	59
4.3.3	Abmischungen von lateritischem Abfall, Kalk, Kaolin und Anhydrit bei $T_s=1200\text{ °C}$ (Versuchsreihen C) .....	60
4.3.4	Zusammenfassung .....	80
4.4	Untersuchung von Abmischungen der Sinterprodukte mit Portlandzement (Versuchsreihe D) .....	81
4.4.1	Untersuchung der hydraulischen Reaktivität .....	81
4.4.2	Untersuchung der Festigkeiten an Prismen .....	84
4.4.3	Zusammenfassung .....	85
4.5	Untersuchungen im System $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ .....	87
4.5.1	Synthese aus stöchiometrischen Abmischungen .....	88
4.5.2	Phasenbildung in Abhängigkeit von der Ofenatmosphäre .....	89
4.5.3	Phasenbildung in Abhängigkeit von der Bildungstemperatur .....	89
4.5.4	Phasenbildung in Abhängigkeit vom $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Anteil .....	90
4.5.5	Phasenbildung in Abhängigkeit vom $\text{SiO}_2$ -Anteil .....	92
4.5.6	Bestimmung der hydraulischen Reaktivität von „CSFA“ .....	93
4.5.7	Zusammenfassung .....	93
4.6	Untersuchungen zur Phase $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ (Ye'elimit) .....	94
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion .....</b>	<b>95</b>
5.1	Phasenneubildungen beim Sinterprozeß .....	97
5.2	Hydraulische Reaktivität und Festigkeiten .....	103
5.3	Ausblick .....	105
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>106</b>

# I. Nomenklatur

## Nomenklatur nach dem Cement Chemical Nomenclature System (CCNS)

Zur übersichtlichen Darstellung der Zusammensetzung werden die Phasen überwiegend gemäß dem Cement Chemical Nomenclature System (CCNS) angegeben:

Oxid	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>
Abkürzung	A	C	F	H	T	S	f	S

Somit werden zur Vermeidung langer Formeln folgende Abkürzungen verwendet:

chemische Summenformel	Mineralname	oxidische Schreibweise	CCNS- Nomenklatur	weitere Abkürzung
Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub>	Gehlenit	2CaO•Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> •SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> AS	G
Ca <sub>4</sub> Al <sub>6</sub> SO <sub>16</sub>	Ye'elimit	3CaO•3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> •CaSO <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S̄	Y
CaSO <sub>4</sub>	Anhydrit	CaO•SO <sub>3</sub>	C <sub>S</sub> ̄	-
Ca <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>4</sub> O <sub>15</sub> Mischkristallreihe	Calciumaluminat- ferrate	2CaO•Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 6CaO•Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> •2Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	„C <sub>2</sub> F-C <sub>6</sub> AF <sub>2</sub> “	Fss
CaFe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Calciumferrat	CaO•Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CF	-
Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Belit	2CaO•SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hämatit	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	-
unbekannt	-	-	-	„CSFA“

### Abkürzungen

AFm	Aluminatferrat-Monosulfat
AFt	Aluminatferrat-Trisulfat
cps	counts per second (Zählrate)
DSC	hochauflösende Differentialthermokalorimetrie
EDX	energiedispersive Röntgenanalytik
KSt.	Kalkstandard
LA	lateritischer Abfall, lateritische Berge (Untersuchungsmaterial)
M.-%	Massenprozent
n.b.	nicht bestimmt
PZ	Portlandzement
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SM	Silikatmodul
TG/DTA	Thermogravimetrie/Differentielle Thermoanalyse
TM	Tonerdemodul
Tr.	Trockenmasse
T <sub>s</sub>	Sintertemperatur
U/min	Umdrehungen pro Minute
W/F	Wasser/Feststoff-Verhältnis
XRD	Röntgenpulverdiffraktometrie

## II. Kurzzusammenfassung

Der Einsatz von eisenreichen Zementen ist besonders dann vorteilhaft, wenn das hydraulische Bindemittel für genau definierte Einsatzgebiete hergestellt werden kann. Diese Spezialzemente sind aufgrund ihrer niedrigen Herstellungstemperaturen und Hydratationswärmen, ihrer hohen Resistenz gegen Sulfatwasserangriff und der guten Verträglichkeit gegenüber hohen Freikalkgehalten von großem Interesse. Die Laterite der tropischen Regionen stellen einen interessanten Ausgangsstoff für solchen eisenreichen hydraulische Bindemittel dar.

Zur Herstellung eines hydraulisch reagierenden Bindemittels wurde in der vorliegenden Arbeit die Verwendung eines Abfalls aus der Goldgewinnung eines lateritischen Tagebaus der Bergbauregion Carajás/Brasilien untersucht. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die thermische Behandlung von Abmischungen des Abfalls mit den Zusatzkomponenten Kalk, Kaolin und einer Sulfatkomponente. Dabei wurde besonders auf die Phasenbildung und die Hydraulizität der Sinterprodukte eingegangen. Die wichtigsten Untersuchungsmethoden waren XRD und die Wärmeflußkalorimetrie. Daneben wurden die REM, RFA, TG/DTA, ICP-OES, UV-VIS, Lasergranulometrie und die Oberflächenbestimmung nach Blaine angewendet.

Unter den gewählten Bedingungen treten hauptsächlich die Phasen  $C_4A_3\bar{S}$  (Ye'elimit),  $C_2AS$  (Gehlenit), F (Hämatit),  $C\bar{S}$  (Anhydrit), CF ( $CaO \cdot Fe_2O_3$ ), Fss (Calciumaluminatferrat) und ein Calcium-Silicium-Eisen-Oxid („CSFA“) auf. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß bei Sintertemperaturen zwischen 1050 °C und 1200 °C ein Optimum für die Bildung von hydraulischen Phasen vorliegt. Bei Abmischungen des Abfalls mit Kalk kann ab 1050 °C  $C_2S$  ( $2CaO \cdot SiO_2$ ) gebildet werden. Bei zusätzlichem Sulfatanteil in den Abmischungen wird die Bildung der hydraulischen Phase  $C_4A_3\bar{S}$  gefördert.  $C_2S$  und  $C_4A_3\bar{S}$  treten jedoch nicht gleichzeitig auf. Der Kaolinanteil fördert die Entstehung von nicht hydraulischem  $C_2AS$ , welches dem System das für die Bildung von  $C_4A_3\bar{S}$  benötigte CaO und  $Al_2O_3$  entzieht.

Die Zugabe einer Sulfatkomponente ist zur Bildung der hydraulischen Phasen  $C_4A_3\bar{S}$  erforderlich. Die Abmischungen mit den höchsten hydraulischen Reaktivitäten haben einen  $Fe_2O_3$ -Gehalt von rund 40 M.-% und einen CaO-Gehalt von rund 45 M.-%. „CSFA“ bildet sich bei 1100 °C nur bei relativ kaolinarmen Abmischungen. Der Anteil der Phasen nimmt bei einer Sintertemperatur von 1200 °C zu. Die Phase zeigt im Kalorimeterversuch keine hydraulische Reaktivität.

An Abmischungen der Sinterprodukte mit Portlandzement (PZ) konnte nachgewiesen werden, daß sich die Sinterprodukte durch den PZ zusätzlich anregen lassen, d.h. die hydraulische Reaktivität kann durch die Zumischung von PZ noch verstärkt werden.

Die vorliegende Arbeit bildet die Grundlage für die weitere Optimierung von Abmischungen des lateritischen Abfalls mit Kalk und einer Sulfatphase. Die Ergebnisse zeigen, daß bei geeigneter Auswahl der Rohmehlzusammensetzung bei 1200 °C gegenüber 1100°C höhere hydraulische Reaktivitäten erzielt werden können.