

Christoph Niederegger

**Technologische Eigenschaften von Betonen
aus neuentwickelten Bindemitteln
mit optimierten Bestandteilen**

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
1 EINLEITUNG	1
1.1 Ziel der Arbeit	1
1.2 Lösungsvorschlag	4
1.2.1 Systematik	4
1.2.2 Niederschrift der Ergebnisse	6
1.3 Bisherige Forschungsleistungen	7
1.3.1 Allgemein/ Literaturstellen	7
1.3.1.1 Dauerhaftigkeit von Beton	10
1.3.1.2 Bindemittel	14
1.3.1.3 AHWZ	15
1.3.2 Forschungsbedarf	15
1.3.3 Einfluss der spezifischen Oberfläche von potentiellen Zementbestandteilen	16
1.3.4 Einfluss der Korngrößenverteilung	19
1.3.5 Einfluss aufbereiteter Zusatzstoffe	20
2 CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE	23
2.1 Zemente	23
2.1.1 Portlandzement – CEM I 42,5 R HS	23
2.1.1.1 Chemische Zusammensetzung	23
2.1.1.2 Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	23
2.1.2 Portlandkompositzement – CEM II A/M (S-L)	24
2.1.2.1 Chemische Zusammensetzung	24
2.1.2.2 Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	24
2.1.3 Mikrozeemente	24
2.1.3.1 Chemische Zusammensetzung	25
2.1.3.2 Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	25
2.2 Hüttensande	26
2.2.1 Schlacke Linz 4000	26
2.2.1.1 Chemische Zusammensetzung	26
2.2.1.2 Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	27
2.2.2 Schlacke Linz 5000	27
2.2.2.1 Chemische Zusammensetzung	27
2.2.2.2 Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	27
2.2.3 Schlacke Donawitz 4000	28
2.2.3.1 Chemische Zusammensetzung	28
2.2.3.2 Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	28
2.2.4 Schlacke Donawitz 5000	29
2.2.4.1 Chemische Zusammensetzung	29
2.2.4.2 Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	29
2.2.5 Aufbereitet Schlacke Linz-Donawitz (LD)	30
2.2.5.1 Chemische Zusammensetzung	30
2.2.5.2 Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	30
2.2.5.3 Aktivitätsindex nach EN 450	31
2.2.6 Aufbereitete Schlacke Eisenerz	32
2.2.6.1 Chemische Zusammensetzung	32
2.2.6.2 Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	32

2.2.6.3	Aktivitätsindex nach EN 450	33
2.3	Flugaschen	33
2.3.1	Asche Heilbronn 4000	33
2.3.1.1	Chemische Zusammensetzung	33
2.3.1.2	Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	33
2.3.2	Asche Heilbronn 5000	34
2.3.2.1	Chemische Zusammensetzung	34
2.3.2.2	Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	34
2.3.3	Aufbereitete Asche Lenzing Halde	35
2.3.3.1	Chemische Zusammensetzung	35
2.3.3.2	Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	35
2.3.3.3	Aktivitätsindex nach EN 450	36
2.3.4	Aufbereitete Asche Zeltweg Halde	37
2.3.4.1	Chemische Zusammensetzung	37
2.3.4.2	Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	37
2.3.4.3	Aktivitätsindex nach EN 450	38
2.3.5	Aufbereitete Asche Binder	38
2.3.5.1	Chemische Zusammensetzung	38
2.3.5.2	Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	38
2.3.5.3	Aktivitätsindex nach EN 450	39
2.4	Inerte Zusatzstoffe	39
2.4.1	Kalksteinmehl	39
2.4.1.1	Chemische Zusammensetzung	40
2.4.1.2	Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	40
2.4.2	Ziegelsplitt	41
2.4.2.1	Chemische Zusammensetzung	41
2.4.2.2	Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	41
2.4.2.3	Aktivitätsindex nach EN 450	42
2.4.3	Altbeton	42
2.4.3.1	Chemische Zusammensetzung	42
2.4.3.2	Korngrößenverteilung und Mahlfeinheit	42
2.4.3.3	Aktivitätsindex nach EN 450	43
3	VERSUCHSAUFBAU - ÜBERSICHT	44
4	VORVERSUCHE – FLUSSDIAGRAM 1	45
VERSUCHSAUFBAU – VORVERSUCHE – V1-V5		45
4.1	Zement + Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe	46
4.1.1	Allgemein	46
4.1.2	CEM I + 25% Zusatzstoff	46
4.1.2.1	CEM I + 25% Hüttensand	47
4.1.2.1.1	Mischungszusammensetzung	47
4.1.2.1.2	Druckfestigkeiten	47
4.1.2.1.3	Biegezugfestigkeiten	48
4.1.2.1.4	Diskussion der Ergebnisse	48
4.1.2.2	CEM I + 25% Flugasche	49
4.1.2.2.1	Mischungszusammensetzung	49
4.1.2.2.2	Druckfestigkeiten	49
4.1.2.2.3	Biegezugfestigkeiten	50
4.1.2.2.4	Diskussion der Ergebnisse	50
4.1.2.3	CEM I + 25% Hüttensand/Flugasche Kombinationen	51
4.1.2.3.1	Mischungszusammensetzung	51

4.1.2.3.2	Druckfestigkeiten	51
4.1.2.3.3	Biegezugfestigkeiten	52
4.1.2.3.4	Diskussion der Ergebnisse	52
4.1.3	CEM II + 25% Zusatzstoff	53
4.1.3.1	CEM II + 25% Hütensand	53
4.1.3.1.1	Mischungszusammensetzung	53
4.1.3.1.2	Druckfestigkeiten	54
4.1.3.1.3	Biegezugfestigkeiten	54
4.1.3.1.4	Diskussion der Ergebnisse	54
4.1.3.2	CEM II + 25% Flugasche	55
4.1.3.2.1	Mischungszusammensetzung	55
4.1.3.2.2	Druckfestigkeiten	56
4.1.3.2.3	Biegezugfestigkeiten	56
4.1.3.2.4	Diskussion der Ergebnisse	56
4.1.3.3	CEM II + 25% Hütensand/Flugasche Kombinationen	57
4.1.3.3.1	Mischungszusammensetzung	57
4.1.3.3.2	Druckfestigkeiten	58
4.1.3.3.3	Biegezugfestigkeiten	58
4.1.3.3.4	Diskussion der Ergebnisse	58
4.1.4	Zusammenfassung CEM I / CEM II + 25% Zusatzstoff	60
4.2	Zement + inerte Zusatzstoffe	67
4.2.1	Allgemein	67
4.2.2	CEM I + 25% inerten Zusatzstoff	68
4.2.2.1	CEM I + 25% inerten Füller	68
4.2.2.1.1	Mischungszusammensetzung	68
4.2.2.1.2	Druckfestigkeiten	69
4.2.2.1.3	Biegezugfestigkeiten	69
4.2.2.1.4	Diskussion der Ergebnisse	70
4.2.3	CEM II + 25% inerten Zusatzstoff	71
4.2.3.1	CEM II + 25% inerten Füller	71
4.2.3.1.1	Mischungszusammensetzung	71
4.2.3.1.2	Druckfestigkeiten	72
4.2.3.1.3	Biegezugfestigkeiten	72
4.2.3.1.4	Diskussion der Ergebnisse	72
4.2.4	Zusammenfassung CEM I / CEM II + 25% inerten Füller	74
4.3	Zement + Mikrozememente	79
4.3.1	Allgemein	79
4.3.2	CEM I + 5% Mikrozemement	80
4.3.2.1	CEM I + 5% Mikrozemement auf Basis CEM I und CEM III	80
4.3.2.1.1	Mischungszusammensetzung	80
4.3.2.1.2	Druckfestigkeiten	81
4.3.2.1.3	Biegezugfestigkeiten	81
4.3.2.1.4	Hydratationswärmeentwicklungen	82
4.3.2.1.5	Diskussion der Ergebnisse	82
4.3.3	CEM I + 10% Mikrozemement	84
4.3.3.1	CEM I + 10% Mikrozemement auf Basis CEM I und CEM III	84
4.3.3.1.1	Mischungszusammensetzung	84
4.3.3.1.2	Druckfestigkeiten	85
4.3.3.1.3	Biegezugfestigkeiten	85
4.3.3.1.4	Hydratationswärmeentwicklungen	86
4.3.3.1.5	Diskussion der Ergebnisse	86
4.3.4	CEM II + 5% Mikrozemement	87
4.3.4.1	CEM II + 5% Mikrozemement auf Basis CEM I / CEM III	88
4.3.4.1.1	Mischungszusammensetzung	88
4.3.4.1.2	Druckfestigkeiten	88
4.3.4.1.3	Biegezugfestigkeiten	89
4.3.4.1.4	Hydratationswärmeentwicklungen	89

4.3.4.1.5	Diskussion der Ergebnisse	90
4.3.5	CEM II + 10% Mikrozemert	91
4.3.5.1	CEM II + 10% Mikrozemert auf Basis CEM I / CEM III	91
4.3.5.1.1	Mischungszusammensetzung	91
4.3.5.1.2	Druckfestigkeiten	92
4.3.5.1.3	Biegezugfestigkeiten	92
4.3.5.1.4	Hydratationswärmeentwicklungen	93
4.3.5.1.5	Diskussion der Ergebnisse	93
4.3.6	Zusammenfassung CEM I / CEM II + 5% Mikrozemert	95
4.3.7	Zusammenfassung CEM I / CEM II + 10% Mikrozemert	99
4.4	Bindemittelkombinationen	103
4.4.1	Allgemein	103
4.4.2	CEM I + Zusatzstoffkombinationen	104
4.4.2.1	CEM I + 50 % Zusatzstoffkombinationen	104
4.4.2.1.1	Mischungszusammensetzung	104
4.4.2.1.2	Druckfestigkeiten	105
4.4.2.1.3	Biegezugfestigkeiten	105
4.4.2.1.4	Schwindverhalten	106
4.4.2.1.5	Wasseranspruch über Ausbreitmaß	108
4.4.2.1.6	Korngrößenverteilungen	108
4.4.2.1.7	Diskussion der Ergebnisse	114
4.4.3	CEM I + Zusatzstoffkombinationen + Mikrozemert	117
4.4.3.1	CEM I + 50 % Zusatzstoffkombinationen + 5%/10% Mikrozemert	117
4.4.3.1.1	Mischungszusammensetzung	117
4.4.3.1.2	Druckfestigkeiten	119
4.4.3.1.3	Biegezugfestigkeiten	120
4.4.3.1.4	Schwindverhalten	120
4.4.3.1.5	Wasseranspruch über Ausbreitmaß	123
4.4.3.1.6	Korngrößenverteilungen	125
4.4.3.1.7	Diskussion der Ergebnisse	128
4.4.4	Zusammenfassung CEM I + Zusatzstoffkombinationen + Mikrozemert	131
4.5	Zusammenfassung der Vorversuche	137
5	HAUPTVERSUCHSREIHE / FLUSSDIAGRAMM 2	144
VERSUCHSAUFBAU – HAUPTVERSUCHE – H1.X-H4.X		144
HAUPTVERSUCHSREIHE – HLB - VERSUCHE		145
5.1	HLB mit 50% CEM I + 50% Zusatzstofftyp	148
5.1.1	Allgemein	148
5.1.2	Mischungszusammensetzung	149
5.1.2.1	Sieblinie	150
5.1.3	Ergebnisse	150
5.1.3.1	50% CEM I + 50% S - Typ	151
5.1.3.1.1	Druckfestigkeiten	152
5.1.3.1.2	Hydratationswärmeentwicklung	153
5.1.3.1.3	Schwinden	153
5.1.3.1.4	E-Modul	154
5.1.3.1.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	154
5.1.3.1.6	Sulfatbeständigkeit	154
5.1.3.1.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	154
5.1.3.1.8	Wassereindringung	155
5.1.3.1.9	Gesamtporositäten	155

5.1.3.1.10	Kapillares Saugen	155
5.1.3.2	50% CEM I + 50% F - Typ	156
5.1.3.2.1	Druckfestigkeiten	157
5.1.3.2.2	Hydratationswärmeentwicklung	158
5.1.3.2.3	Schwinden	158
5.1.3.2.4	E-Modul	159
5.1.3.2.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	159
5.1.3.2.6	Sulfatbeständigkeit	159
5.1.3.2.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	159
5.1.3.2.8	Wassereindringung	160
5.1.3.2.9	Gesamtporositäten	160
5.1.3.2.10	Kapillares Saugen	160
5.1.3.3	50% CEM I + 50% AS - Typ	161
5.1.3.3.1	Druckfestigkeiten	162
5.1.3.3.2	Hydratationswärmeentwicklung	163
5.1.3.3.3	Schwinden	163
5.1.3.3.4	E-Modul	164
5.1.3.3.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	164
5.1.3.3.6	Sulfatbeständigkeit	164
5.1.3.3.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	164
5.1.3.3.8	Wassereindringung	165
5.1.3.3.9	Gesamtporositäten	165
5.1.3.3.10	Kapillares Saugen	165
5.1.3.4	50% CEM I + 50% ASF - Typ	166
5.1.3.4.1	Druckfestigkeiten	167
5.1.3.4.2	Hydratationswärmeentwicklung	168
5.1.3.4.3	Schwinden	168
5.1.3.4.4	E-Modul	169
5.1.3.4.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	169
5.1.3.4.6	Sulfatbeständigkeit	169
5.1.3.4.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	169
5.1.3.4.8	Wassereindringung	170
5.1.3.4.9	Gesamtporositäten	170
5.1.3.4.10	Kapillares Saugen	170
5.1.3.5	50% CEM I + 50% SF - Typ	171
5.1.3.5.1	Druckfestigkeiten	172
5.1.3.5.2	Hydratationswärmeentwicklung	173
5.1.3.5.3	Schwinden	173
5.1.3.5.4	E-Modul	174
5.1.3.5.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	174
5.1.3.5.6	Sulfatbeständigkeit	174
5.1.3.5.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	174
5.1.3.5.8	Wassereindringung	175
5.1.3.5.9	Gesamtporositäten	175
5.1.3.5.10	Kapillares Saugen	175
5.1.3.6	Zusammenfassung 50% CEM I + 50% Zusatzstoff - Typ	176
5.2	HLB mit 40% CEM I + 10% MIKROZEM A + 50% Zusatzstofftyp	183
5.2.1	Allgemein	183
5.2.2	Mischungszusammensetzung	184
5.2.2.1	Sieblinie	185
5.2.3	Ergebnisse	185
5.2.3.1	40% CEM I + 10% MIKROZEM A + 50% S - MZ-Typ	186
5.2.3.1.1	Druckfestigkeiten	187
5.2.3.1.2	Hydratationswärmeentwicklung	188
5.2.3.1.3	Schwinden	188
5.2.3.1.4	E-Modul	189
5.2.3.1.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	189
5.2.3.1.6	Sulfatbeständigkeit	189

5.2.3.1.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	189
5.2.3.1.8	Wassereindringung	190
5.2.3.1.9	Gesamtporositäten	190
5.2.3.1.10	Kapillares Saugen	190
5.2.3.2	40% CEM I + 10% MIKROZEM A + 50% F – MZ-Typ	191
5.2.3.2.1	Druckfestigkeiten	192
5.2.3.2.2	Hydratationswärmeentwicklung	193
5.2.3.2.3	Schwinden	193
5.2.3.2.4	E-Modul	194
5.2.3.2.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	194
5.2.3.2.6	Sulfatbeständigkeit	194
5.2.3.2.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	194
5.2.3.2.8	Wassereindringung	195
5.2.3.2.9	Gesamtporositäten	195
5.2.3.2.10	Kapillares Saugen	195
5.2.3.3	40% CEM I + 10% MIKROZEM A + 50% AS – MZ-Typ	196
5.2.3.3.1	Druckfestigkeiten	197
5.2.3.3.2	Hydratationswärmeentwicklung	198
5.2.3.3.3	Schwinden	198
5.2.3.3.4	E-Modul	199
5.2.3.3.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	199
5.2.3.3.6	Sulfatbeständigkeit	199
5.2.3.3.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	199
5.2.3.3.8	Wassereindringung	200
5.2.3.3.9	Gesamtporositäten	200
5.2.3.3.10	Kapillares Saugen	200
5.2.3.4	40% CEM I + 10% MILROZEM A + 50% ASF – MZ-Typ	201
5.2.3.4.1	Druckfestigkeiten	202
5.2.3.4.2	Hydratationswärmeentwicklung	203
5.2.3.4.3	Schwinden	203
5.2.3.4.4	E-Modul	204
5.2.3.4.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	204
5.2.3.4.6	Sulfatbeständigkeit	204
5.2.3.4.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	204
5.2.3.4.8	Wassereindringung	205
5.2.3.4.9	Gesamtporositäten	205
5.2.3.4.10	Kapillares Saugen	205
5.2.3.5	40% CEM I + 10% MIKROZEM A + 50% SF – MZ-Typ	206
5.2.3.5.1	Druckfestigkeiten	207
5.2.3.5.2	Hydratationswärmeentwicklung	208
5.2.3.5.3	Schwinden	208
5.2.3.5.4	E-Modul	209
5.2.3.5.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	209
5.2.3.5.6	Sulfatbeständigkeit	209
5.2.3.5.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	209
5.2.3.5.8	Wassereindringung	210
5.2.3.5.9	Gesamtporositäten	210
5.2.3.5.10	Kapillares Saugen	210
5.2.3.6	Zusammenfassung 40% CEM I + 10% MIKROZEM A + 50% Zusatzstoff - Typ	211

5.3	HLB mit 50% CEM I + 50% Zusatzstofftyp mit Erhöhung der Mahlfineinheit der Komponente ALTBETON	219
5.3.1	Allgemein	219
5.3.2	Mischungszusammensetzung	220
5.3.2.1	Sieblinie	221
5.3.3	Ergebnisse	221
5.3.3.1	50% CEM I + 50% F – FAB-Typ	222
5.3.3.1.1	Druckfestigkeiten	223
5.3.3.1.2	Hydratationswärmeentwicklung	224

5.3.3.1.3	Schwinden	224
5.3.3.1.4	E-Modul	225
5.3.3.1.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	225
5.3.3.1.6	Sulfatbeständigkeit	225
5.3.3.1.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	225
5.3.3.1.8	Wassereindringung	226
5.3.3.1.9	Gesamtporositäten	226
5.3.3.1.10	Kapillares Saugen	226
5.3.3.2	50% CEM I + 50% ASF – FAB-Typ	227
5.3.3.2.1	Druckfestigkeiten	228
5.3.3.2.2	Hydratationswärmeentwicklung	229
5.3.3.2.3	Schwinden	229
5.3.3.2.4	E-Modul	230
5.3.3.2.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	230
5.3.3.2.6	Sulfatbeständigkeit	230
5.3.3.2.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	230
5.3.3.2.8	Wassereindringung	231
5.3.3.2.9	Gesamtporositäten	231
5.3.3.2.10	Kapillares Saugen	231
5.3.3.3	50% CEM I + 50% SF – FAB-Typ	232
5.3.3.3.1	Druckfestigkeiten	233
5.3.3.3.2	Hydratationswärmeentwicklung	234
5.3.3.3.3	Schwinden	234
5.3.3.3.4	E-Modul	235
5.3.3.3.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	235
5.3.3.3.6	Sulfatbeständigkeit	235
5.3.3.3.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	235
5.3.3.3.8	Wassereindringung	236
5.3.3.3.9	Gesamtporositäten	236
5.3.3.3.10	Kapillares Saugen	236
5.3.3.4	Zusammenfassung 50% CEM I + 50% Zusatzstoff – Typ mit Erhöhung der Mahlfineinheit der Komponente ALTBETON	237
5.4	HLB mit 50% CEM I + 50% Zusatzstofftyp mit Einsatz einer alternativen Füllerkomponente KALKSTEINMEHL	245
5.4.1	Allgemein	245
5.4.2	Mischungszusammensetzung	246
5.4.2.1	Sieblinie	247
5.4.3	Ergebnisse	247
5.4.3.1	50% CEM I + 50% F – KSM-Typ	248
5.4.3.1.1	Druckfestigkeiten	249
5.4.3.1.2	Hydratationswärmeentwicklung	250
5.4.3.1.3	Schwinden	250
5.4.3.1.4	E-Modul	251
5.4.3.1.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	251
5.4.3.1.6	Sulfatbeständigkeit	251
5.4.3.1.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	251
5.4.3.1.8	Wassereindringung	252
5.4.3.1.9	Gesamtporositäten	252
5.4.3.1.10	Kapillares Saugen	252
5.4.3.2	50% CEM I + 50% ASF – KSM-Typ	253
5.4.3.2.1	Druckfestigkeiten	254
5.4.3.2.2	Hydratationswärmeentwicklung	255
5.4.3.2.3	Schwinden	255
5.4.3.2.4	E ₂ -Modul	256
5.4.3.2.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	256
5.4.3.2.6	Sulfatbeständigkeit	256
5.4.3.2.7	Einlagerung in eine Gipssuspension	256
5.4.3.2.8	Wassereindringung	257

5.4.3.2.9	Gesamtporositäten	257
5.4.3.2.10	Kapillares Saugen	257
5.4.3.3	50% CEM I + 50% SF – KSM-Typ	258
5.4.3.3.1	Druckfestigkeiten	259
5.4.3.3.2	Hydratationswärmeentwicklung	260
5.4.3.3.3	Schwinden	260
5.4.3.3.4	E-Modul	261
5.4.3.3.5	Frost-Tausalzbeständigkeit	261
5.4.3.3.6	Sulfatbeständigkeit	261
5.4.3.3.7	Einlagerung in eine Gipsuspension	261
5.4.3.3.8	Wassereindringung	262
5.4.3.3.9	Gesamtporositäten	262
5.4.3.3.10	Kapillares Saugen	262
5.4.3.4	Zusammenfassung 50% CEM I + 50% Zusatzstoff – Typ mit Einsatz einer alternativen Füllerkomponente KALKSTEINMEHL	263
5.5	Zusammenfassung der Hauptversuche	271
5.5.1	Einfluss der Bindemittelkombinationen auf Festigkeitsparameter	272
5.5.2	Einfluss der Bindemittelkombinationen auf Wasseranspruch und Verarbeitung	277
5.5.3	Einfluss der Bindemittelkombinationen auf Formbeständigkeitsparameter	282
5.5.4	Einfluss der Bindemittelkombinationen auf die Hydratationswärmeentwicklung	284
5.5.5	Einfluss der Bindemittelkombinationen auf Gefügeausbildung	286
6	RESÜMEE UND AUSBLICK	292
7	LITERATURVERZEICHNIS	299