

Einfluss der Zusammensetzung Formulierter Kalke (FL) auf die Mörtel Eigenschaften

-Bildung eines Korrelationsmodells zur Mischungsoptimierung-

B. Joschko, S. Haas, M. Ivanov, D. Klein, S. Kuhnt, B. Middendorf, S.-O. Schmidt



**Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF-Nr. 16855 N
Einfluss der Zusammensetzung Formulierter Kalke (FL) auf die Mörtel­eigenschaften
-Bildung eines Korrelationsmodells zur Mischungsoptimierung-**

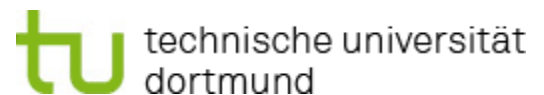
Forschungsstelle 1:

Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft
Kalk und Mörtel e.V.
Annastr. 67-71
50968 Köln



Forschungsstelle 2:

TU Dortmund
Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen,
Lehrstuhl Werkstoffe des Bauwesens
August-Schmidt-Str. 8
44227 Dortmund



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlichungen und Vervielfältigungen
- auch auszugsweise - nur mit Genehmigung der
Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.

Das IGF-Vorhaben AiF 16855 N der Forschungsvereinigung Kalk und Mörtel e. V. und der TU Dortmund wurde über die AiF im Rahmen des Programms zu Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Inhalt

Kurzzusammenfassung	1
1 Einleitung	2
2 Grundlagen und Stand der Forschung	4
2.1 Formulierte Kalke – Anforderungen nach der EN 459-1	4
2.2 FL-Komponenten, daraus hergestellte Bindemittel und Mörtel	7
2.2.1 Baukalk (CL und NHL)	7
2.2.2 Portlandzementklinker	8
2.2.3 Zemente (CEM I, CEM II, CEM III)	8
2.2.4 Natürliches Puzzolan	11
2.2.5 Natürliches getempertes Puzzolan	12
2.2.6 Kalkstein	12
2.2.7 Hüttensand	13
2.2.8 Calciumsulfat	16
2.2.9 Silicastaub	16
2.2.10 Zusätze	16
2.2.11 Kalkmörtel und FL-ähnliche Bindemittel	17
3 Forschungsziel und Lösungsweg	19
4 Methoden	23
4.1 Probennahme	23
4.2 Probenbezeichnung	23
4.3 Chemische und physikalische Bestimmungsmethoden	24
4.3.1 Übersicht der angewandten Methoden und der Probenpräparation	24
4.3.2 Reaktionsvermögen	25
4.3.3 Mineralphasenbestimmung	26
4.3.4 Korngrößenverteilung mittels Laserdiffraktometrie (nach Faunhofer-Theorie)	26
4.3.5 Festmörtelrohddichte	27
4.3.6 Dynamischer Elastizitätsmodul (Grindo-Sonic-Verfahren)	27
4.3.7 Karbonatisierungstiefe	27
4.3.8 Gefügeausbildung / Lichtmikroskopie	28
4.3.9 Porosität / Quecksilberdruckporosimetrie	28
4.3.10 Kapillare Wasseraufnahme	28

4.3.11	Ausblühneigung	29
4.3.12	Frost-Tau-Widerstand	29
4.3.13	Sulfatresistenz	30
4.4	Statistische Modelle	30
4.4.1	Vorversuche und Einschränkungen zur Reduktion der Versuchszahl	31
4.4.2	Statistische Modellierung und Versuchsplanung	33
5	Versuchsergebnisse und Diskussion	42
5.1	Charakterisierung der Rohstoffe	42
5.1.1	Kalkhydrat	42
5.1.2	Zement	45
5.1.3	Hüttensand	47
5.1.4	Kalksteinmehl	49
5.1.5	Trass	49
5.2	Reaktivität	52
5.3	Charakterisierung der Formulierten Kalke	57
5.3.1	Vergleich von Mischungen mit CL80 gegenüber Mischungen mit CL9057	
5.3.2	Vergleich von Mischungen mit CL80 gegenüber Mischungen mit CL80_vgl	58
5.3.3	DF-Vergleich: CEM_NA / HS_f in Formulierten Kalken	58
5.3.4	DF-Vergleich: HS_g / HS_f in Formulierten Kalken	59
5.3.5	Vergleich von Mischungen mit Trass_Bay gegenüber Mischungen mit Trass_Eif	61
5.3.6	Änderung der Druckfestigkeit bei Änderung des W/B	63
5.3.7	Auswirkungen der Schüttdichte des Kalkhydrats auf den W/B nach EN 459-2	65
5.3.8	Erstarrungszeiten nach EN 459	67
5.3.9	Raumbeständigkeit nach EN 459	67
5.3.10	Luftgehalt nach EN 459	67
5.3.11	Auswirkung des Available Lime-Gehalts im Kalkhydrat auf die FL-Mischung	67
5.3.12	Zeitabhängigkeit der Druckfestigkeit	69
5.3.13	Statistische Modelle	73
5.3.14	Ergebnisse der statistischen Modelle	81
5.3.15	Bedienungsanleitung: EDV-gestützte Berechnungshilfe zum statistischen Modell	83
5.4	Charakterisierung der aus den Formulierten Kalken hergestellten Mörtel	85
6	Zusammenfassung und Fazit	103

7	Literaturverzeichnis	108
8	Anhang	113
8.1	Symbole, Maßeinheiten und Abkürzungen _____	113
8.2	Röntgendiffraktogramme _____	114
8.3	Korngrößenverteilung (Laserdiffraktogramme) _____	121
8.4	Tabellen: Prüfungen an Formulierten Kalken _____	131
8.5	Tabellen: Druckversuche für die statistischen Modelle _____	136
8.6	2D Projektionen der statistischen Modelle _____	140

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Das IGF-Vorhaben AiF 16855 N der Forschungsvereinigungen Kalk und Mörtel e. V. und der TU Dortmund, Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen, Lehrstuhl Werkstoffe des Bauwesens wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzzusammenfassung

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, eine allgemeingültige Datenbasis zu Fragen der Wechselwirkungen einzelner Komponenten der in die Baukalknorm (EN 459-1) neu aufgenommenen und bisher nicht untersuchten Bindemittelklasse der *Formulierten Kalke* (*FL*) zu erstellen.

Hierzu wurden die nach EN 459-1 zur Herstellung der *FL* zugelassenen Haupt- und Nebenbestandteile zunächst technisch und wirtschaftlich beurteilt. Auf dieser Grundlage wurde ihre zu erwartende Verwendung als *FL*-Bestandteil eingeschätzt. Die im Anschluss daran ausgewählten Rohstoffe wurden jeweils in mindestens zwei verschiedenen Variationen eingesetzt, um den Einfluss von Rohstoffvariationen quantifizieren zu können.

Die ausgewählten Rohstoffe wurden hinsichtlich wichtiger chemischer und physikalischer Eigenschaften charakterisiert und miteinander verglichen. Aus den Rohstoffen wurden *Formulierte Kalke* hergestellt, welche auf ihre Konformität bezüglich EN 459-1 geprüft wurden. Da die 28-Tage Druckfestigkeiten der *FL* maßgeblich darüber entscheiden, ob die Bindemittel-Zusammensetzung normativ einem *FL* entspricht, wurden Modelle entwickelt, aus denen die 28-Tage Druckfestigkeit in Abhängigkeit der *FL*-Zusammensetzung berechnet werden kann.

Die Versuchspläne für die Modellbildung umfassten zunächst 133 Versuche. In einem zweiten Schritt erfolgte die Modell-Validierung und Überprüfung. Es wurden 40 weitere Druckversuche durchgeführt, um die statistischen Modelle zu verbessern. Die Überprüfung mittels verschiedener graphischer Diagnostiken bestätigte die Validität der Modelle und zeigte, dass diese die beobachteten Druckfestigkeiten gut beschreiben.

Weiterhin wurde eine EDV-gestützte Berechnungshilfe entwickelt, mit deren Hilfe sich die 28T-Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der *FL*-Zusammensetzung, bei einem W/B-Verhältnis von 0,55, berechnen lassen. Die Ergebnisse der statistischen Modellierung wurden zusätzlich in Form von 2D-Projektionen im Anhang dargestellt. Mit Hilfe der Projektionen lässt sich die 28T-Druckfestigkeit bei gegebener *FL*-Zusammensetzung hieraus graphisch ableiten.

In einem letzten Schritt wurden die aus diesem Forschungsvorhaben gewonnen Erkenntnisse dazu eingesetzt, Trockenmörtel auf *FL*-Basis herzustellen und hinsichtlich wichtiger mörteltechnischer Parameter zu untersuchen. Die dafür ausgesuchten *FL*-Mischungen deckten dabei ein breites Spektrum der Mischungsmöglichkeiten ab. Hier konnten auch Unterschiede bezüglich der Verwendung verschiedener Sande herausgestellt werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

1 Einleitung

Die Verwendung von Kalk für die Herstellung von Baustoffen und Bauwerken hat eine lange Tradition, die bis in das 7. Jh. v. Chr. zurückverfolgt werden kann (Kasig & Weiskorn 1992). Bis heute sind die positiven Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften von Kalkmörteln begehrt und führen, auch wegen des natürlichen Ursprungs des Kalkes, zu einer weit verbreiteten Anwendung. Bereits die Römer setzten zur Herstellung von Beton nicht nur gebrannten Kalkstein, sondern auch Puzzolan als Bindemittel ein (Lamprecht 1996). Für die römischen Bauten des Magdalensberg (Kärnten) wurde als hydraulischer Zusatz im Kalkmörtel Schlacke aus der Eisenverhüttung eingesetzt (Böttger et al. 2002).

Die meisten historischen und traditionellen Mauermörtel sind Kalkmörtel. Heute ist Kalk das wichtigste Material zur Erhaltung und Restauration von historischen Gebäuden (Pavía et al. 2006). Kalkreiche Mörtel absorbieren einen hohen Grad an Deformation bevor sie brechen und sind daher in der Lage, Bewegungen der historischen Gebäude aufzunehmen (Arandigoyen & Alvarez 2007; Cizer et al. 2008). Hier ist Portlandzement aufgrund seiner hohen Festigkeit und geringen Elastizität nicht uneingeschränkt geeignet (Elert et al. 2002).

Kalkmörtel und Kalk-Zementmörtel besitzen, im Gegensatz zu reinen Zementmörteln, zwei für die Hersteller und Benutzer wichtige Eigenschaften: eine ausgezeichnete Verarbeitbarkeit und ein großes Wasserrückhaltevermögen (DTI 2010; Boynton & Gutschick 1984; Speweik 1996). Will man diese Eigenschaften mit Zementmörtel erreichen, so ist es erforderlich Additive (Luftporenbildner) hinzuzufügen. Diese verringern allerdings das Bindevormögen zwischen Mörtel und Mauerstein (Fishburn 1961; Copeland & Saxer 1964; Marusin 1990, Tsimas & Raikos 1995).

Seit dem Ende des neunzehnten Jahrhunderts wurde Zement zum wichtigsten Bindemittel im Baugewerbe, hauptsächlich aufgrund der Standardisierung der Produktion (Callebaut et al. 2001). Nach (Stark & Wicht 2000) gibt es für die vielfältigen Bauaufgaben kein besseres Bindemittel mit einem derart günstigen Preis-Leistungsverhältnis. Zement ist ein homogenes Massengut, welches vom Kleber bis zur Spannbetonbrücke alle Applikationen abdeckt (Ludwig 2012). Seit 2007 liegt der Marktanteil von CEM II-Zementen (Kompositzemente) allerdings über dem Marktanteil der CEM I-Zemente (Portlandzemente). Die Ursache hierfür liegt in der Forderung von Politik und Gesellschaft nach Bindemitteln mit einer günstigen CO₂-Bilanz (Ludwig 2012). Hierzu ist es notwendig den Klinker/Zementfaktor zu verringern, was heute maßgeblich durch den Einsatz von weiteren Zement-Hauptbestandteilen wie z.B. Hüttensand, Puzzolan und Kalksteinmehl vorangetrieben wird (Ludwig 2012). Gleichzeitig findet eine Spezialisierung der Bindemittel für die verschiedenen Anwendungen statt (Ludwig 2012).

In der aktuell überarbeiteten und im Dezember 2010 eingeführten neuen Baukalknorm (DIN EN 459-1 2010) wurde eine neue Bindemittelklasse aufgenommen, die *Formulierten Kalke (FL)*. Hierbei handelt es sich um Baukalke, denen im normativ vorgegebenen Rahmen definierte Mengen anderer Bestandteile zugemischt werden können, um gezielt bestimmte Eigenschaf-

ten einzustellen. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um anorganisch-mineralische Komponenten, die überwiegend hydraulisch abbinden. Des Weiteren sind auch Füllstoffe und organische Zusatzmittel in der Norm berücksichtigt. Aus dieser Komponentenvielfalt resultiert eine Vielzahl von möglichen Bindemittel-Mischungen, welche die in der Norm vorgegebenen Eigenschaften der Formulierten Kalke erfüllen müssen. Die Norm stellt Anforderungen an den Gehalt an verfügbarem Kalk und an die Festigkeiten nach 7 bzw. 28 Tagen. Über diese Anforderungen definieren sich insgesamt 9 verschiedene FL-Klassen. Hieraus resultiert allerdings keine Regelung zu den möglichen Mischungsverhältnissen der Formulierten Kalke.

Im Gegensatz zu der in EN 459-1 ebenfalls beschriebenen Bindemittelklasse der Hydraulischen Kalke (HL) müssen die Bestandteile des FL vom Hersteller qualitativ und quantitativ angegeben werden. Des Weiteren liegt der von der Norm geforderte Mindestgehalt an „Verfügbarem Kalk (A.L.)“ im FL mit 15 % deutlich höher als im HL (4 %). Der höhere A.L.-Anteil im FL wird in der EN 459-1 durch ein, verglichen mit den HL, späteres Erstarrungsende berücksichtigt.

Im Zuge der oben beschriebenen CO₂-Diskussion ergibt sich nun die Möglichkeit, (FL)-Bindemittel mit einer günstigeren CO₂-Bilanz zu entwickeln, deren Zusammensetzung nun, dank der neuen Baukalknorm, auch dem Käufer dieser Produkte bekannt sein wird.

FL-ähnliche Mischungen wurden bisher ausschließlich von wenigen Herstellern in Frankreich und Italien eingesetzt. Daher sind Kenntnisse zu den Materialkennwerten dieser Mischungen ausschließlich betriebsintern und nicht publiziert. Natürlich hydraulischer Kalk (NHL nach EN 459) und Trasskalk, ein hydraulischer Kalk (HL nach EN 459), sind FL-ähnliche Bindemittel und finden in Deutschland Anwendung bei der Sanierung, der Denkmalpflege und im ökologisch-biologischen Haus- und Wohnungsbau.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, eine allgemeingültige Datenbasis zu Fragen der Wechselwirkungen einzelner FL-Bestandteile und ihrer Auswirkungen auf die Eigenschaften der mit FL hergestellten Mörtel zu schaffen. Von besonderem Interesse ist es dabei, normativ gültige FL zu entwickeln, um den Produzenten deren Herstellung zu erleichtern. Da die 28-Tage Druckfestigkeiten der FL maßgeblich darüber entscheiden, ob die Bindemittel-Zusammensetzung normativ einem FL entspricht, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Modell entwickelt, aus welchem die Hersteller die 28-Tage Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der FL-Zusammensetzung erhalten. Diese neue kalkbasierte Bindemittelklasse ermöglicht es so den Produzenten, über definierte Festigkeitsregulierung in Kombination mit den positiven Kalkeigenschaften wie z. B. Verarbeitbarkeit, Risselbstheilung und Dauerhaftigkeit, den Absatz an Kalkhydrat im Mörtelbereich zu steigern.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Formulierte Kalke – Anforderungen nach der EN 459-1

Die Anforderungen an die neue Bindemittelklasse der FL regelt die Norm EN 459-1. Tabelle 2.1.1 zeigt, welche Mischungsbestandteile in den FL zugelassen sind und ab welchem Massenanteil, für die jeweiligen Bestandteile eine Herstellerdeklaration erforderlich ist.

Material	als Hauptbestandteil ^{1.)}	als Nebenbestandteil ^{2.)}	Zusätze	Anmerkung
Baukalk (CL und NHL)	X			nach EN 459-1
Zemente (CEM I, CEM II; CEM III) ^{3.)}	X			nach EN 197-1
Portlandzementklinker	X	X		nach EN 197-1
Natürliches Puzzolan	X	X		nach EN 197-1
Natürliches getempertes Puzzolan	X	X		nach EN 197-1
Kalkstein (L oder LL)	X	X		nach EN 197-1
Hüttensand	X	X		nach EN 197-1
Calciumsulfat		X		nach EN 197-1
Silicastaub		X		nach EN 197-1
Organische Zusätze ^{4.)}			X	Deklaration bei > 0,2 M.-%
Mineralische Zusätze ^{5.)}			X	Deklaration bei > 1 M.-%
<p>^{1.)} Alle Hauptbestandteile → Herstellerdeklaration</p> <p>^{2.)} Einzelne Nebenbestandteile ≤ 5 % → keine Herstellerdeklaration; Gesamtgehalt Nebenbestandteile > 10 % → alle Nebenbestandteile sind anzugeben</p> <p>^{3.)} Ausschließlich auf der Grundlage folgender Bestandteile: Portlandzementklinker, natürliches Puzzolan, natürliches getempertes Puzzolan, Kalkstein, Hüttensand</p> <p>^{4.)} Gehalt > 0,2 % → Massenanteil u. Art anzugeben</p> <p>^{5.)} Eisen- oder Zinnverbindung > 1 % → anzugeben</p>				

Tab. 2.1.1 Nach EN 459-1 zugelassene Mischungsbestandteile in den FL

Die Tabellen 2.1.2, 2.1.3, und 2.1.4 zeigen die chemischen und physikalischen Anforderungen an FL, nach der EN 459-1:

Art von Formuliertem Kalk	SO ₃	Verfügbarer Kalk als Ca(OH) ₂ , nach EN 459-2:2010, 5.8
		Werte als Massenanteil in Prozent
FL A	≤ 2	≥ 40 bis < 80
FL B	≤ 2	≥ 25 bis < 50
FL C	≤ 2	≥ 15 bis < 40

ANMERKUNG Bei SO₃ gelten die Werte für das wasserfreie und kristallwasserfreie Produkt.

Tab. 2.1.2: Chemische Anforderungen an FL, nach EN 459-1

Arten von Formuliertem Kalk	Druckfestigkeit [MPa]	
	7 Tage	28 Tage
Alle Arten von FL 2	—	≥ 2 bis ≤ 7
Alle Arten von FL 3,5	—	≥ 3,5 bis ≤ 10
Alle Arten von FL 5	≥ 2	≥ 5 bis ≤ 15

Tab. 2.1.3: Anforderung an die Druckfestigkeit von FL, nach EN 459-1

Art von Formuliertem Kalk	Korngröße		Freies Wasser	Raumbeständigkeit ^{b.)}		Mörtelprüfungen ^{c.)}		Erstarrungszeiten	
	Rückstand als Massenanteil in %			Referenzverfahren	Alternativverfahren	Eindringmaß	Luftgehalt	Beginn	Ende
	0,09 [mm]	0,2 [mm]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[h]	
FL 2						> 10			≤ 40
FL 3,5	≤ 15	≤ 5	≤ 2	≤ 2	≤ 20	und	≤ 25	> 1	≤ 30
FL 5						< 50			≤ 15

a.) Korngröße und freies Wasser gelten für Formulierten Kalk für alle Anwendungen. Raumbeständigkeit, Eindringmaß, Luftgehalt und Erstarrungszeiten gelten nur für Formulierten Kalk für Mauermörtel, Innenputz und Außenputz.

b.) Bestimmung nach EN 459-2:2010, 6.4.

c.) Prüfung an einem Normmörtel nach EN 459-2.

Tab. 2.1.4: Weitere physikalische Anforderungen an FL, nach EN 459-1

Insgesamt sind 9 verschiedene Klassen Formulierter Kalke möglich, die sowohl in Bezug auf ihre chemische Zusammensetzung als auch auf die physikalischen Anforderungen für die Erstarrungszeiten und Druckfestigkeiten der Prüfmörtel differieren. Die Anforderungen der Norm führen zu großen Überschneidungen der einzelnen FL-Klassen in Bezug auf den Gehalt des verfügbaren Kalkes und die Druckfestigkeit nach 28 Tagen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.1.1 graphisch dargestellt. Ein FL mit einer bestimmten Zusammensetzung kann, bei einem festen Wasser/Bindemittel-Wert (W/B-Wert), durchaus mehreren Klassen angehören. Zusätzliche Freiheitsgrade ergeben sich nach EN 459-2 aufgrund variabler W/B-Werte. Der W/B-Wert wird bei der Herstellung des für die Druckfestigkeitsprüfung erforderlichen Mörtels eingestellt. Er variiert sowohl in Abhängigkeit von der Schüttdichte des FL als auch in Abhängigkeit von der angestrebten Druckfestigkeitskategorie. Diese Verhältnisse sind in Tabelle 2.1.5 dargestellt.

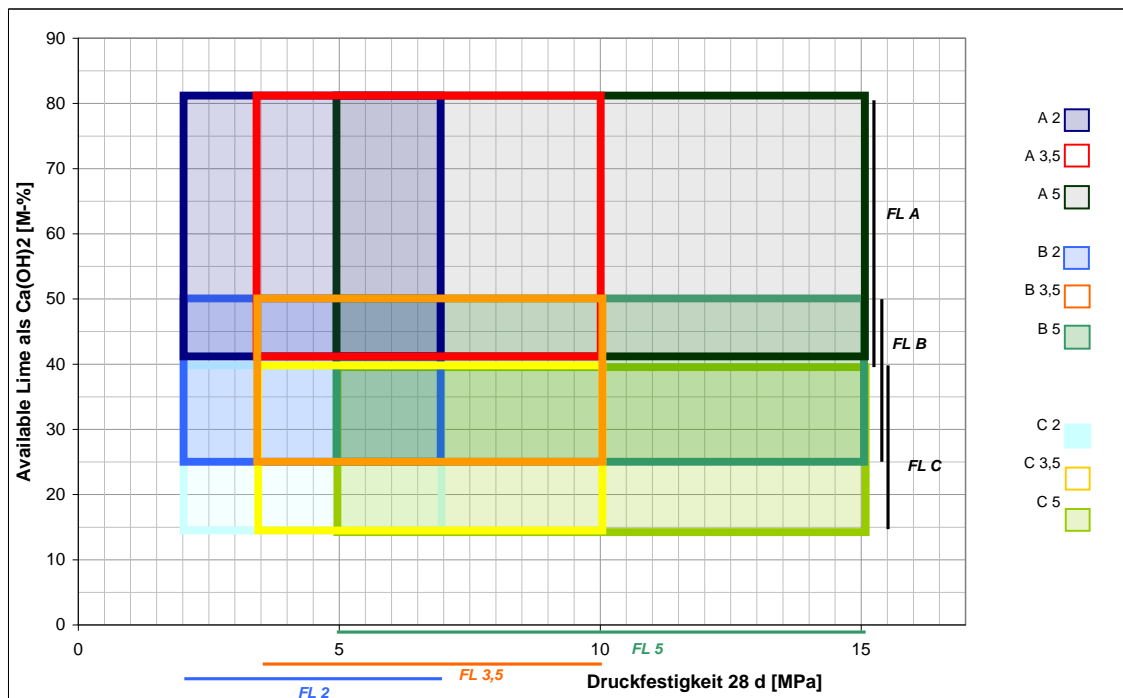


Abb. 2.1.1: Darstellung der nach EN 459-1 möglichen FL-Klassen

Art des Produktes	Schüttdichte [kg/dm ³]	Wasserbindemittelwert (W/B)
FL 5	> 0,6	0,5
FL 2; FL 3,5	> 0,6	0,55
FL 3,5; FL 5	≤ 0,60	0,60
FL 2	≤ 0,60	0,65

Tab. 2.1.5: Nach EN 459-2 erforderliche W/B-Werte für die Herstellung eines Mörtels zur Druckfestigkeitsprüfung

2.2 FL-Komponenten, daraus hergestellte Bindemittel und Mörtel

2.2.1 Baukalk (CL und NHL)

Die Baukalke bestehen aus zwei Familien: Luftkalk, zu der Weißkalk CL gehört und hydraulischer Kalk, zu der NHL gehört. Der Weißkalk CL kann im FL in gelöschter oder ungelöschter Form vorliegen. Weißkalk in ungelöschter Form entsteht durch Brennen von Kalkstein bei Temperaturen von 900 – 1200° C: $\text{CaCO}_3 + 178,4 \text{ kJ} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$. Durch anschließendes Löschen von CaO entsteht Kalkhydrat: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 65,19 \text{ kJ}$. Unter der Einwirkung von atmosphärischem CO_2 erhärten Branntkalk (CaO) und Kalkhydrat (Ca(OH)_2) langsam: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Weißkalk wird nach seinem abnehmendem (CaO + MgO)-Gehalt klassifiziert in CL90, CL80 und CL70 (EN 459-1 2010). Von CL90 über den CL80 bis hin zu dem CL70 nimmt der Anteil an hydraulisch wirksamen Phasen wie C_2S (Dicalciumsilikat) und C_3A (Tricalciumaluminat) und damit das Vermögen zusätzlich hydraulisch (unter Wasser) zu erhärten zu. Die hydraulisch wirksamen Phasen bilden sich aus der Reaktion der Hydraulefaktoren Al_2O_3 , SiO_2 und Fe_2O_3 , welche aus den Tonmineralen stammen, mit dem CaO.

NHL ist ein Baukalk mit hydraulischen Eigenschaften, der durch Brennen von mehr oder weniger tonhaltigen oder kieselsäurehaltigen Kalksteinen (Kalkmergel), zu Pulver gelöscht, mit oder ohne Mahlung, entsteht (EN 459-1 2010). Für die Herstellung hydraulischer Kalke wird Branntkalk im Trockenlöschverfahren gezielt so abgelöscht, dass vorhandenes CaO vollständig zu Ca(OH)_2 umgesetzt wird, vorhandene hydraulische Komponenten dagegen in ihrer wasserfreien Form erhalten bleiben (Goedeke et al. 2007).

Die wichtigste festigkeitsbildende Komponente natürlicher hydraulischer Kalke stellt Belit (β - C_2S) dar. Im Gegensatz zu den Zementen enthält NHL gewöhnlich kein Alit (C_3S), da die oberste Brenntemperatur (1250° C) beträgt (Callebaut et al. 2001). Weitere mögliche Hauptbestandteile hydraulischer Kalke sind Gehlenit (C_2AS), Aluminat (C_3A), Ferrit (C_4AF) und inaktives γ - C_2S . Die hydraulische Erhärtung natürlicher hydraulischer Kalke wird durch die Hydratation der Calciumsilikate und Calciumaluminat bestimmt (Goedeke et al. 2007). Belit bewirkt die gleichen Endfestigkeiten wie Alit, benötigt dafür aber einen deutlich längeren Zeitraum (Stark & Wicht 2000).

NHL wurde hauptsächlich während des neunzehnten Jahrhunderts benutzt und war der Vorläufer von Zement (Callebaut et al. 2001). NHL findet in Deutschland Anwendung bei der Sanierung, der Denkmalpflege und im ökologisch-biologischen Haus- und Wohnungsbau. Allerdings besitzt er wegen des C_3A -Gehalts ein Potenzial im Hinblick auf schädigende Expansionsreaktionen durch Ettringitbildung, was problematisch ist bei Verwendung an Gebäuden mit starker Sulfatbelastung und aufgrund des hohen Alkali- und Sulfat-Gehalts eine Neigung zu Ausblüherscheinungen in Form von Alkali- und Kalkalkali-Sulfaten (Winnefeld 2005, Meier 2004).

2.2.2 Portlandzementklinker

Portlandzementklinker wird aus einem Rohmehlgemisch hergestellt, das durch das Brennen auf über 1400 °C einer Schmelzphasensinterung unterzogen wird. Ausgangsstoffe für das Rohmehlgemisch sind Kalkstein oder Kreide und Ton, bzw. deren natürlich vorkommendes Gemisch Kalksteinmergel. Bei der Schmelzphasensinterung bilden sich bestimmte Calciumsilikate und -aluminat, die sog. Klinkerphasen. Sie setzen sich aus den oxidischen Hauptbestandteilen CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ zusammen. In ihrer Gesamtwirkung im Erhärtungsprozess bestimmen sie die hydraulische Aktivität des Zementes. Dabei wird die Enddruckfestigkeit vor allem durch die Bildung von CSH-Phasen aus den silikatischen Klinkerphasen C₃S und C₂S bestimmt, während der Beitrag von C₃A und C₂(A,F) bei der Festigkeitsbildung - wie in Tabelle 2.2.1 zusammengestellt - relativ gering ist (VDZ 2002, STARK & WICHT 2000).

mineralogische Zusammensetzung	Zusammensetzung	Gehalt im Klinker	Auswirkung
Alit (C ₃ S)		40 - 80 %	Früh- und Spätfestigkeit
Belit (C ₂ S)		2 - 30 %	Spätfestigkeit und niedrige Hydratationswärme
Aluminat (C ₃ A)		3 - 15 %	Frühfestigkeit und hohe Hydratationswärme
Aluminatferrit (C ₂ (A,F))		4 - 15 %	Korrosions- und Sulfatbeständigkeit

Tab. 2.2.1: Klinkerminerale(Stark & Wicht 2000)

2.2.3 Zemente (CEM I, CEM II, CEM III)

Seit dem Ende des neunzehnten Jahrhunderts wurde Zement zum wichtigsten Bindemittel im Baugewerbe, hauptsächlich aufgrund der Standardisierung der Produktion (Callebaut et al. 2001). Nach (Stark & Wicht 2000) gibt es für die vielfältigen Bauaufgaben kein besseres Bindemittel mit einem derart günstigen Preis-Leistungsverhältnis. Zement ist ein homogenes Massengut, welches vom Kleber bis zur Spannbetonbrücke alle Applikationen abdeckt (Ludwig 2012).

Tabelle 2.2.2 zeigt die nach der Baukalknorm in den FL zugelassenen Zemente. Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement werden durch die Norm EN 197-1 geregelt (DIN EN 197-1 2004).

Portlandzement (CEM I) enthält als Hauptbestandteile die Portlandzementklinkerphasen C₃S, β-C₂S, C₃A und C₄AF sowie einen Sulfatträger. In Normzementen dürfen 5 % Nebenbestandteile aus Produkten der Zementherstellung enthalten sein. Sie bestehen aus bei der Klinkerherstellung entstehenden anorganischen mineralischen Stoffen bzw. aus Ausgangsstoffen der Klinkerherstellung und dienen der Verbesserung der Kornverteilung und somit der Verbesserung der Verarbeitbarkeit und des Wasserrückhaltevermögens (VDZ 2002). Der erste Portlandzement wurde in Deutschland ab 1850 hergestellt (VDZ 2002).

Hauptzementarten	Benennung	Kurzbezeichnung	Hauptbestandteile						Nebenbestandteile		
			Portland- zement- klinker	Hüttensand	Puzzolan (natürlich)	Puzzolan (getempert)	Kalkstein				
							K	S		P	Q
CEM I	Portland- zement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Portland- hüttenzement	CEM II / A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II / B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland- puzzolan- zement	CEM II / A-P	80-94	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
		CEM II / B-P	65-79	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM II / A-Q	80-94	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM II / B-Q	65-79	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
	Portland- kalkstein- zement	CEM II / A-L	80-94	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		CEM II / B-L	65-79	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
		CEM II / A-LL	80-94	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II / B-LL	65-79	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
	CEM III	Hochofen- zement	CEM III / A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	0-5
			CEM III / B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	0-5
CEM III / C			5-19	81-95	-	-	-	-	-	0-5	

Tabelle 2.2.2: Nach EN 459-1 in den FL zugelassene Normalzemente

Die genormten Portlandkompositzemente (CEM II) bestehen aus mehreren Hauptbestandteilen (Locher 2000; VDZ 2002). Der Anteil der Bestandteile außer Klinker darf laut Norm 6 bis 35 Masse% betragen (Tab. 2.2.2). In Deutschland enthalten derzeit mehr als 90% der CEM II Zemente entweder Hüttensand oder Kalkstein als Hauptbestandteil. Der Anteil der CEM II-Zemente mit Hüttensand hat dabei in den letzten Jahren stark zugenommen. Seit 2007 liegt der Marktanteil von CEM II-Zementen über dem Marktanteil der CEM I-Zemente. Die Ursache hierfür liegt in der Forderung von Politik und Gesellschaft nach Bindemitteln mit einer günstigen CO₂-Bilanz (Ludwig 2012). Hierzu ist es notwendig den Klinker/Zementfaktor zu verringern, was heute maßgeblich durch den Einsatz von weiteren Zement-Hauptbestandteilen vorangetrieben wird (Ludwig 2012). Bei dem Ersatz von Klinker durch Hüttensand, Puzzolan (getempert oder ungetempert) und Kalksteinmehl ist es erforderlich wichtige Zementeigenschaften wie die Verarbeitbarkeit, den Druckfestigkeitsverlauf oder die Dauerhaftigkeit im Auge zu behalten. Die Beeinflussung dieser Eigenschaften in den CEM II-Zementen und in den CEM III-Zementen (> 35 Masse% Hüttensand) wird in den jeweiligen Kapiteln der einzelnen Komponenten besprochen.

Zement	Eigenschaft	Zementart	Anforderung
NW	Hydratationswärme	alle	≤ 270 J/g
		CEM I	≤ 3,00 M.-%
HS	Hüttensandgehalt	CEM III/B	≤ 5,00 M.-%
		CEM III/C	≤ 66,0 M.-%
		alle	≤ 0,60 M.-%
NA	Na ₂ O-Äquivalent	CEM II/B-S	≤ 0,70 M.-%
		CEM III/A ¹⁾	≤ 1,10 M.-%
		CEM III/A ²⁾	≤ 0,95 M.-%
		CEM III/B	≤ 2,00 M.-%
		CEM III/C	

¹⁾ Nur wenn der Zement mindestens 50 M.-% Hüttensand enthält

²⁾ Nur wenn der Zement ≤ 49 M.-% Hüttensand enthält

Tabelle 2.2.3: Anforderungen an Zemente mit Sondereigenschaften nach DIN 1164-1 (VDZ 2002)

Des Weiteren gibt es Zemente mit besonderen Eigenschaften, für die es jedoch noch keine europäische Norm gibt und die zurzeit in einer „Ergänzungsnorm“ (DIN 1164 2000) behandelt werden. Diese Zemente weisen z.B. einen hohen Sulfatwiderstand (HS), eine niedrige Hydrationswärme (NW) oder einen niedrigen wirksamen Alkaligehalt (NA) auf. Die Anforderungen an diese Zemente sind in Tabelle 2.2.3 (VDZ 2002) dargestellt.

2.2.4 Natürliches Puzzolan

Nach der europäischen Zementnorm (DIN EN 197-1 2004) handelt es sich bei Puzzolanen um natürliche Stoffe mit kieselsäurehaltiger und/oder alumo-silicatischer Zusammensetzung, die, im Gegensatz zu Hüttensand, beim Anmachen mit Wasser nicht selbständig erhärten. Puzzolane reagieren, fein gemahlen und in Gegenwart von Wasser, mit gelöstem $\text{Ca}(\text{OH})_2$, welches in Form von Kalkhydrat zugemischt wird oder aus der Hydratation von Zement stammt, unter Entstehung von festigkeitsbildenden Calciumsilikathydrat- (CSH) und Calciumaluminathydrat-Phasen (CAH). Der Massenanteil an reaktionsfähigem SiO_2 muss mindestens 25,0 % betragen (DIN EN 197-1 2004). Puzzolane reagieren deutlich langsamer als die reinen Portlandzementklinkerphasen oder als der latent hydraulisch abbindende Hüttensand und tragen daher zur Festigkeitsentwicklung nur langsam bei.

Das in Deutschland am häufigsten vorkommende und somit eingesetzte natürliche Puzzolan ist der Trass, welcher in der Eifel durch phreatomagmatischen, tertiären Vulkanismus gebildet worden ist. Der bayrische Trass ist dagegen nicht vulkanischen Ursprungs sondern ein Suevit aus dem Nördlinger Ries, der auf einen tertiären Meteoritenimpakt zurückzuführen ist. Die Trasse enthalten 50 bis 70 % reaktionsfähiges SiO_2 und mehr als 50 % Glasgehalt (Stark & Wicht 2000). Der Glasgehalt der Trasse ist, wie bei Hüttensand, die Hauptursache für die Reaktionsfähigkeit, aber in geringem Maße tragen auch die Minerale Quarz, Feldspat, Leucit, Analcim und Kaolin zur hydraulischen Erhärtung bei (Stark & Wicht 2000).

Bereits die Römer setzten zur Herstellung von Beton nicht nur gebrannten Kalkstein, sondern auch Puzzolan als Bindemittel ein (Lamprecht 1996). Betone aus dieser Zeit wiesen bei Festigkeitsprüfungen nach 2000 Jahren Druckfestigkeiten bis zu 40 MPa auf (Stark & Wicht 2000). Heute werden Trasse vor allem in der Denkmalpflege zur Nachstellung historischer Putz- und Mauermörtel verwendet. Der von einigen Firmen in Deutschland verkaufte „Trasskalk“ ist nach EN 459-1 zumeist ein HL 5 und enthält neben Trass und Kalkhydrat auch deutliche Mengen an Zement.

(Liebig & Althaus 1999) fanden heraus, dass die Zugabe von thermisch unbehandeltem Suevit zu einem Kalkmörtel dessen Druckfähigkeit sogar noch herabsetzt. Dies führen die Autoren auf die Quellfähigkeit des Minerals Montmorillonit zurück. In ihrer Arbeit untersuchten die Autoren auch Kalkmörtel, der mit Rheinischem Trass versetzt war, und fanden eine Erhöhung der Druckfestigkeit gegenüber reinem Kalkmörtel.

2.2.5 Natürliches getempertes Puzzolan

Eine thermische Behandlung der Trassmehle führt nicht in jedem Fall zu einer Erhöhung der Reaktivität. Während ein vulkanischer Tuff aus der Eifel, mit der Hauptmineralphase Analcim, durch Tempern mit reduzierter Puzzolanität reagiert, erhöht sich beim Suevit, aufgrund seines Gehalts an Montmorillonit, durch thermische Behandlung die Reaktivität (Liebig & Althaus 1999). Ca-Montmorillonit verliert bei 100 – 200° C zunächst das adsorptiv gebundene Wasser und das Zwischenschichtwasser, gibt dann in zwei Stufen, bei 500 und bei 680° C die OH-Gruppen seiner Oktaederschichten ab, um dann bei 920° C unter Bildung von Spinell und Cristobalit zu rekristallisieren (Liebig und Althaus 1997). Der Bereich optimaler Brenntemperatur und damit optimaler Reaktivität ist im Ca-Montmorillonit auf $800 \pm 50^\circ \text{C}$ eng begrenzt (Liebig & Althaus 1997).

Bei 600 bis 700° C getemperte kaolinitreiche Tone (Metakaolin) finden Anwendung als Ersatz für Mikrosilika in Hochleistungsbetonen, in denen sie den Sulfatwiderstand stark erhöhen (Ludwig 2012). Kaolinit verliert bei thermischer Behandlung die OH-Gruppen seiner Oktaederschichten ab 500° C. Es bildet sich Metakaolinit, eine amorphe, reaktive puzzolanische Phase (Schmidt et al. 2012), die sich bei 980° C in eine kubische Spinell-Phase umwandelt (Liebig & Althaus 1997). Sowohl thermisch aktivierter Kaolinit als auch thermisch aktivierter Montmorillonit reagieren mit Ca(OH)_2 -Lösung zu Calcium-Silicat-Aluminat-Hydratphasen (Liebig & Althaus 1997). Calcinierte Tone werden zukünftig als weitere Hauptbestandteile in Zementen eine große Rolle spielen (Ludwig 2012).

In getempertem Form kann Phonolithmehl heute in Europa als natürliches getempertes Puzzolan in Portlandpuzzolanementen CEM II/A-Q mit bis zu 20% natürlichem getempertem Puzzolan und in CEM II/B-Q mit bis zu 35% als zweiter Hauptbestandteil neben Portlandzementklinker verwendet werden (Reinhardt & Schellhorn 2007). Bei der Temperung von Phonolith entwässern die Zeolithe bei 400° C und zerfallen bei 500° C, was einen Anstieg der Reaktivität auf etwa das Dreifache gegenüber der ungetemperten Probe zur Folge hat (Kassautzki 1983).

2.2.6 Kalkstein

Die Zementnorm EN 197-1 (DIN EN 197-1 2004) unterscheidet, je nach Gehalt an organischen Bestandteilen (TOC), zwischen Kalkstein der Kategorie L und der Kategorie LL. Kalkstein (L): $\text{TOC} \leq 0,5 \text{ Masse\%}$; Kalkstein (LL) $\leq 0,2 \text{ Masse\%}$. Eine weitere Anforderung an Kalksteinmehl, das als Hauptbestandteil in FL eingesetzt werden soll, wird nach EN 197-1 an den Tongehalt gestellt. Außerdem muss der aus dem CaO-Gehalt berechnete CaCO_3 -Gehalt $\geq 75 \text{ Masse\%}$ sein.

Aus Portlandkalksteinzement hergestellte Frischbetone benötigen zum Erreichen der Zielkonsistenz weniger Wasser bzw. Fließmittel als Frischbetone, die mit reinem Portlandzement hergestellt werden. Die Pumpbarkeit und die Verdichtungswilligkeit der Betone verbessert sich ebenfalls (Ludwig 2012). Ursache hierfür ist die Füllerwirkung von Kalksteinmehl. Wenn Kalksteinmehl das Lückenvolumen zwischen den größeren Partikeln minimiert und das Wasser diese Lücken nicht mehr ausfüllen muss, steht mehr Wasser für die Verarbeitbarkeit zur Verfügung (Ludwig 2012).

Bei Zugabe von 15 – 20 Masse% Kalksteinmehl zu Portlandzement kann man die daraus resultierenden Unterschiede im Festigkeitsverlauf kompensieren, indem man die Mahlfeinheit des Klinkeranteils um + 1000 – 2000 cm^2/g nach Blaine erhöht (Ludwig 2012).

Bei der Betrachtung des Dauerhaftigkeitspotentials von Zementen mit Kalksteinmehl im Vergleich zu CEM I-Zementen zeigt sich, dass sich bei CEM II-LL-Zementen die einen Kalkstein Gehalt > 21 Masse% besitzen, der Frost-Widerstand sowie der Frost-Tausalz-Widerstand verschlechtern. Die Carbonatisierung und der Chloridwiderstand bleiben im Vergleich mit CEM I-Zementen unverändert (Ludwig 2012). Nach (Härdtl & Koc 2012) ändert sich der Chloridwiderstand eines Zementes nicht, wenn sich die Kalksteinqualität von $\text{CaCO}_3 = 96$ Masse% auf 75 Masse% verschlechtert.

2.2.7 Hüttensand

Hüttensand entsteht durch schnelles Abkühlen einer Schlackenschmelze geeigneter Zusammensetzung, die im Hochofen beim Schmelzen von Eisenerz gebildet wird (DIN EN 197-1 2004). Chemisch besteht er hauptsächlich aus CaO , SiO_2 und Al_2O_3 (Stark & Wicht 2000). Nach der Zementnorm EN 197-1 (DIN EN 197-1 2004) muss der Hüttensand nach Massenanteilen zu mindestens zwei Dritteln aus Calciumoxid (CaO), Magnesiumoxid (MgO) und Siliciumdioxid (SiO_2) bestehen. Die Basizität, das Massenverhältnis $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ muss größer als 1,0 sein. Der Glasgehalt muss bei mindestens zwei Dritteln Massenanteil liegen. Diese Anforderungen stellt auch die Norm „Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel“ (DIN EN 15167-1 2006) an Hüttensandmehl. Zusätzlich wurden noch weitere chemische und physikalische Anforderungen in diese Norm aufgenommen. Die Norm stellt jedoch keine Anforderungen an die Anwendung von Hüttensand in Mörteln oder Beton.

Hüttensand ist ein latent hydraulischer Stoff, der nur langsam erhärtet, wenn er mit Wasser gemischt wird (Singh & Middendorf 2008). Er kann in Verbindung mit einem Anreger (z.B. Ca(OH)_2 , CaSO_4), in Gegenwart von Wasser, in technisch nutzbarer Zeit hydraulisch erhärten (Zhao et al. 2009). Der Anreger bricht dabei die Reaktionsschicht auf, die sich an der Oberfläche des Hüttensandes nach Wasserzugabe bildet, den Zutritt von Wasser verhindert und somit die Hydratation des Hüttensandes stoppt (Stark & Wicht 2000). Die bei der Hydratation entstehenden Produkte sind die gleichen wie bei der Portlandzement-Hydratation: Calciumsilika-

thylat (CSH-Phasen), Gehenithylat (C_2ASH_8) und Hydrogranat (C_3AH_6) (Stark & Wicht 2002). Einen umfassenden Überblick darüber, wie die chemischen und physikalischen Parameter von Hüttensanden die latent hydraulischen Eigenschaften beeinflussen gibt Ehrenberg (Ehrenberg 2006). Er kommt zu dem Schluss, dass das latent hydraulische Verhalten von Hüttensand komplex und daher nicht monokausal erklärbar ist. Nach Ehrenberg üben folgende Parameter gleichzeitig einen Einfluss auf die latent hydraulischen Eigenschaften eines ungemahlenden Hüttensandes aus:

- Basizität (CaO , MgO , SiO_2), TiO_2 , Al_2O_3 , MnO CaS
- Glasgehalt und Struktur, Gehalt und Art der kristallinen Anteile
- Lagerung (Entwässerung, Alterung)
- Art des Granulationsverfahrens und Granulationsbedingungen
- Schlackenviskosität, Schlackentemperatur, Möllerszusammensetzung

Den Einfluss der Wassertemperatur bei der Granulation des Hüttensandes auf die mit dem Hüttensand hergestellten Mörtel, veranschaulicht Ehrenberg (Ehrenberg 2010): Trotz geringerer Mahlfeinheit erreichte er mit dem bei maximal $50^\circ C$ granulierten Hüttensand eine um 40% höhere 2-Tage-Druckfestigkeit als mit dem bei $95^\circ C$ granulierten Hüttensand. Erklärt wird dieser Sachverhalt durch den höheren Unordnungsgrad der bei der niedrigeren Temperatur glasig erstarrten Hochofenschlacke. Die Tendenz, in einen geordneten, kristallinen Zustand überzugehen, also zu reagieren, ist hier größer.

Der Glasgehalt, und damit die Reaktivität des Hüttensandes, wird weiterhin durch die Basizität beeinflusst (Ehrenberg 2010): Saure Hochofenschlacken neigen zu leichter Glasbildung, während basische Schlacken zu spontaner Kristallisation neigen.

Die erste industrielle Nutzung von Hüttensand erfolgte ab 1865 (Ehrenberg 2006). Ungemahlener Hüttensand wurde in Verbindung mit gelöschtem Kalk zur Produktion von luftgehärteten Schlackesteinen verwendet. Mit diesen Hüttensteinen wurden zahlreiche Gebäude von hoher Dauerhaftigkeit errichtet. Hüttensandhaltiger Zement wird seit 1879 hergestellt. Ehrenberg beschreibt in seiner umfassenden Arbeit folgende positive, typische Eigenschaften hüttensandhaltiger Zemente und damit hergestellter Betone (Ehrenberg 2006):

- deutlich geringerer Bedarf an Primärenergie und natürlichen Rohstoffen sowie wesentlich geringere CO_2 -Emissionen bei der Herstellung → Klinkersubstitution
- helle Farbe
- kein Chromatbeitrag zum Zement
- längere Verarbeitbarkeit
- geringe Blutneigung
- hohes Nacherhärtungspotential bei gleicher 28-Tage-Festigkeit
- erhöhter Widerstand gegen chemischen Angriff, z.B. kalklösende Kohlensäure oder biogene Schwefelsäure

- hoher Widerstand gegen sulfathaltige Wässer und Böden (Treibreaktionen)
- hoher Widerstand gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion (Rissbildung)
- gering Hydratationswärmeentwicklung
- hoher Chloriddiffusionswiderstand und höheres Chloridbindungsvermögen
- höherer Elektrolytwiderstand
- höhere Relation Biegezugfestigkeit / Druckfestigkeit
- mit anderen Zementen vergleichbare Carbonatisierungstiefe
- mit anderen Zementen vergleichbarer Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand
- gute Wärmebehandlungseigenschaften

Demgegenüber stehen folgende negative Eigenschaften hüttensandhaltiger Zemente und damit hergestellter Betone:

- geringe Frühfestigkeit bei gleicher 28-Tage-Festigkeit
- höherer Mahlenergiebedarf bei der Herstellung
- längere Nachbehandlungsdauer

Über die jahrzehntelangen positiven deutschen Erfahrungen mit hüttensandhaltigen Zementen und die im Ausland vorhandenen Erfahrungen mit Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff berichtet Ehrenberg in (Ehrenberg 2010).

Im Zuge einer verbesserten CO₂-Bilanz von Zementen erlangen hüttensandhaltige Zemente eine immer größere Bedeutung. Der Anteil der CEM II-Zemente mit Hüttensand hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Seit 2007 liegt der Marktanteil von CEM II-Zementen über dem Marktanteil der CEM I-Zemente (Ludwig 2012). Ein Nachteil von Zementen, in denen der Klinkeranteil durch CO₂-freundlicheren Hüttensand ersetzt wird ist die dadurch erniedrigte Frühfestigkeit. Die 18 h-, 1 d-, 2 d-, 7 d-Druckfestigkeiten erniedrigen sich von 9, 15, 32, 51 MPa von Normmörtel mit CEM I 42,5 R auf 0, 5, 13, 37 MPa von Normmörtel mit CEM III/B 42,5 N (Ludwig 2012), was für den Transportbetonbereich kein Problem darstellt, wohl aber für konstruktive Fertigteilelemente.

Bei der Betrachtung des Dauerhaftigkeitspotentials von Zementen mit Hüttensand im Vergleich zu CEM I-Zementen zeigt sich, dass bei CEM III-Zementen, die einen Hüttensandgehalt > 45 Masse% besitzen, der Frost-Tausalz-Widerstand und die Carbonatisierung verschlechtern. Der Frostwiderstand bleibt im Vergleich mit CEM I-Zementen unverändert und der Chloridwiderstand verbessert sich (Ludwig 2012, Hårdtl & Koc 2012). Nach (Hårdtl & Koc 2012) führt außerdem die Verwendung von feiner aufgemahlenem Hüttensandmehl (5000 cm²/g gegenüber 3000 cm²/g) zu einem höheren Chloridwiderstand und einem höheren Frostwiderstand in Beton.

Bei Zugabe von bis zu 50 Vol% Hüttensand zu einem natürlichen hydraulischen Kalk (NHL 5) sinkt das Wasserrückhaltevermögen im Vergleich zum Wasserrückhaltevermögen des reinen NHL um fast 25 %, was die Autoren zum einen der steigenden Hydraulizität und zum anderen

der steigenden durchschnittlichen Korngröße des Bindemittels, verursacht durch den größeren Hüttensand, zuschreiben (Al-Defai et al. 2012).

2.2.8 Calciumsulfat

Calciumsulfat wird dem Zement zur Regelung des Erstarrens und der Festigkeitsentwicklung zugegeben. Dies bewirkt eine wesentlich längere Verarbeitungszeit. Wird kein Sulfatträger (Calciumsulfatdihydrat, Halbhydrat oder Anhydrit) zugesetzt, bilden sich sofort nach der Wasserzugabe zum Portlandzementklinker tafelförmige Calciumaluminathydrate (C_4AH_{13}), welche gleichmäßig verteilt in den Zwischenräumen als Brücken wirken (Stark & Wicht 2000). Der Zement erstarrt sofort. Statt der Bildung von C_4AH_{13} kommt es durch den Einsatz des Sulfatträgers zur Bildung von Ettringit um die reagierenden C_3A -Körner, so dass die schnelle Reaktion abgebremst wird. Da an dieser ersten Reaktion nur C_3A und Calciumsulfat beteiligt sind, richtet sich die zugesetzte Menge an Calciumsulfat nach dem C_3A -Gehalt des Klinkers (Stark & Wicht 2000).

2.2.9 Silicastaub

Silicastaub entsteht bei der Reduktion von hochreinem Quarz mit Kohle in Lichtbogenöfen bei der Herstellung von Silicium- und Ferrsiliciumlegierungen und besteht aus sehr feinen kugelligen Partikeln mit einem Gehalt an amorphem Siliciumdioxid von mindestens 85 % (DIN EN 179-1 2004). Er ist als Nebenbestandteil bis zu einem Massenanteil von 5 % in FL zugelassen. Derzeit wird Silicastaub in Deutschland jedoch nur als Betonzusatzstoff eingesetzt (VDZ 2002).

2.2.10 Zusätze

Die Verwendung von organischen und anorganischen Zusätzen dient dazu, die (Verarbeitungs-)Eigenschaften von Putz- oder Mauermörtel zu verbessern. Bereits in der Antike wurden dem Mörtel Seifen, Harze, Proteine, Asche oder Pferdehaare zugemischt, um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern (Kamp 2011).

Pigmente, z.B. Titandioxid, Eisenoxide und Chromdioxid, sind mineralische Zusätze, mit denen Mörtel dauerhaft eingefärbt werden.

Faserstoffe (meist Polypropylen) werden sowohl zur Verbesserung der mechanischen als auch (im Fall der Zugabe von Cellulose) der rheologischen Eigenschaften von Mörteln verwendet. Bei Putzen bewirkt eine Zugabe von Fasern eine Verbesserung der Haftung zwischen Putz und

Putzgrund, eine Verbesserung der Temperaturbeständigkeit sowie eine Verringerung von Trocknungsrisse (Kamp 2011).

Als Additive (chemisch aktive Zusatzstoffe) werden heute Wasserrückhaltmittel (Celluloseether), Luftporenbildner, Abbinde-Verzögerer oder –Beschleuniger, Verflüssiger, Verdickungsmittel oder Hydrophobiermittel verwendet (Kamp 2011).

2.2.11 Kalkmörtel und FL-ähnliche Bindemittel

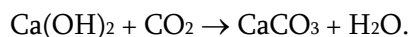
Die meisten historischen und traditionellen Mauermörtel sind Kalkmörtel. Heute ist Kalk das wichtigste Material zur Erhaltung und Restauration von historischen Gebäuden (Pavía et al. 2006). Kalkreiche Mörtel absorbieren einen hohen Grad an Deformation bevor sie brechen und sind daher in der Lage, Bewegungen der historischen Gebäude aufzunehmen (Arandigoyen & Alvarez 2007; Cizer et al. 2008). Hier ist Portlandzement aufgrund seiner hohen Festigkeit und geringen Elastizität nicht uneingeschränkt geeignet (Elert et al. 2002). Kalkmörtel und Kalk-Zementmörtel besitzen, im Gegensatz zu reinen Zementmörteln, zwei für die Hersteller und Benutzer wichtige Eigenschaften: eine ausgezeichnete Verarbeitbarkeit und ein großes Wasserrückhaltevermögen (DTI 2010; Boynton & Gutschick 1984; Speweik 1996; Green et al. 1999). Will man diese Eigenschaften mit Zementmörtel erreichen, so ist es erforderlich Additive (Luftporenbildner) hinzuzufügen. Diese verringern allerdings das Bindevermögen zwischen Mörtel und Mauerstein (Fishburn 1961; Copeland & Saxer 1964; Marusin 1990, Tsimas & Raikos 1995).

Reine Luftkalkmörtel, auf CL90-Basis und ohne Zusatz von hydraulisch wirksamen Komponenten, besitzen den Vorteil, dass sie aufgrund ihres geringen Al_2O_3 -Gehaltes kein Ettringit-Treiben und dadurch verursachte Rissbildung erleiden. Der geringe Alkali- und Sulfat-Gehalt schützt die aus CL90 hergestellten Mörtel vor Ausblühererscheinungen in Form von Alkali- und Kalkalkali-Sulfaten (Winnfeld 2005). Nach Tsimas (Tsimas & Raikos 1995) stellen Alkaligehalte von 0,25% bis 1% $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ein Risiko bezüglich der Entwicklung von Ausblühererscheinungen dar.

Kalkmörtel besitzen im Vergleich zu Zementmörteln höhere Wasserabsorptionskoeffizienten, eine höhere Porosität und eine größere Wasserdampfdurchlässigkeit (DTI 2010), weshalb sie sich als „Opferputz“ bei der Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk und für die Salzausspülung von salzbelastetem Mauerwerk eignen (Maier 2007). Durch einen Anstieg des Anteils von Kalkhydrat gegenüber Zement von 30 auf 70 Masse% im Bindemittel, erhöht sich die Porosität und damit die Carbonatisierung daraus hergestellter Mörtel (Cizer et al. 2008). Mosquera et al. fanden mit steigendem Zementgehalt im Luftkalkmörtel eine Abnahme der Porosität, der Porengröße und der Wasserdampfdiffusion (Mosquera et al. 2006). Die Anwendung von Kalkhydrat in Mauermörtel steigert das Wasserrückhaltevermögen, da die Größe der $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Partikel

gegenüber der von Portlandzement-Partikeln 1/500 beträgt, wodurch ihre Gesamtoberfläche sehr hoch ist (Speweik 1996).

Kalkmörtel mit einem hohen Kalkanteil besitzt die Eigenschaft der Selbstheilung kleiner Risse und Zwickel (Speweik 1996). Voss (Voss 1960) fand heraus, dass von Kalkmörtel absorbiertes Regenwasser kleine Mengen an freiem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ löst. Unter dem Einfluss von CO_2 scheidet die in Risse und Zwickel wandernde Lösung hier CaCO_3 aus. Diese Reaktion erfolgt langsam über Monate oder Jahre. Zementmörtel besitzen diese Eigenschaft aufgrund ihres geringen Gehalts an freiem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nicht (Boynton & Gutschick 1964). Reine Kalkmörtel ohne hydraulisch wirksame Komponenten erhärten nur durch Carbonatisierung:



Diese Reaktion erfolgt allerdings nur, wenn im Mörtel genügend Wasser zum CO_2 -Transport (von außen ins Innere des Mörtels) vorhanden ist. Nach (Ney 1967) ist ein Wassergehalt von 0,8 bis 4% erforderlich. Mit steigendem Wassergehalt nimmt die Rate dieser Reaktion zu, da mehr CO_2 gelöst wird (Cizer et al. 2008).

Zusammenfassend zeigt sich nach (Tsimas & Raikos 1995) die prinzipielle Überlegenheit von Kalk über Portlandzement im Mörtel in seiner größeren Plastizität, dem höheren Wasserrückhaltevermögen und der größeren Feinheit, Eigenschaften die dafür sorgen, dass sich Fugen einfacher und vollständiger füllen lassen. Ein zusätzlicher Beitrag zur besseren Bindung wird durch die Fähigkeit von Kalkmörtel zur Selbstheilung kleiner Risse erreicht.

Reine Luftkalk-Mörtel auf CL90-Basis zeigen ein ausgeprägtes Trocknungsschwinden und damit einhergehend eine große Rissneigung, da bei ihnen das Anmachwasser nur für die Verarbeitbarkeit gebraucht wird und nicht auch, wie bei Kalkmörteln mit hydraulischen Anteilen, für die Bildung von Hydratphasen (Winnefeld 2005). Luftkalkmörtel auf CL80-Basis weisen dagegen, je nach Gehalt an hydraulisch wirksamen Phasen, ein sehr geringes oder gar kein Trocknungsschwinden auf (Winnefeld 2005).

Luftkalk-Mörtel werden nach (Ashurst & Ashurst 1988; Holmes & Wingate 1997; Gibbons 1995; The Traditional Lime Company 2000) für Wetter geschützte Gebiete empfohlen, während hydraulische Kalk-Mörtel aufgrund ihres besseren Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands auch in ungeschützter, feuchter Umgebung verwendet werden können. Auch sollte die Anwendung von Luftkalkmörtel nicht zu spät im Jahr erfolgen, damit ausreichend Zeit zur Carbonatisierung verbleibt, bevor der erste Frost eintritt (Winnefeld 2005; Meier 2004). Allerdings fanden (Waldum & Anda 1999) bei der Untersuchung der Dauerhaftigkeit kalkbasierter Mörtel bei Feldversuchen unter harten klimatischen Bedingungen, dass die Verwitterung nach einem Jahr gering war und derer hydraulischer Kalkmörtel entsprach. (Pavia & Treacy 2006) stellten bei Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Bindemitteln zur Restauration sogar fest, dass im Gegensatz zur gängigen Meinung Luftkalk-Mörtel eine größere Dauerhaftigkeit aufweisen als hydraulische Kalk-Mörtel.

Nach (Pritchett 2003) sprechen folgende ökologische Aspekte für die Verwendung von Kalkmörtel, statt Zementmörtel:

- Die Mauersteine von abgerissenen Gebäuden auf Kalkmörtel-Basis können im Gegensatz zu Mauersteinen von abgerissenen Gebäuden auf Zementmörtel-Basis vollständig wiederverwertet werden.
- Durch die niedrigeren Brenntemperaturen von Kalkstein (900 – 1100° C) gegenüber Zement (1200 – 1500° C) wird weniger Energie pro Tonne des Produkts verbraucht und somit weniger CO₂ freigesetzt.
- Die Rohdichte von Kalkhydrat ist deutlich niedriger als die von Zement, was zu weiteren Energieeinsparungen führt.
- Während ihrer Aushärtung absorbieren Kalkmörtel im Zuge ihrer Carbonatisierung CO₂ aus der Luft.

3 Forschungsziel und Lösungsweg

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, eine allgemeingültige Datenbasis zu Fragen der Wechselwirkungen einzelner FL-Bestandteile und ihrer Auswirkungen auf die Eigenschaften der mit FL hergestellten Mörtel zu schaffen. Von besonderem Interesse war es dabei, normativ gültige FL zu entwickeln, um den Produzenten deren Herstellung zu erleichtern.

Da die 28-Tage Druckfestigkeiten der FL maßgeblich darüber entscheiden, ob die Bindemittel-Zusammensetzung normativ einem FL entspricht, wurde ein Modell entwickelt aus welchem die Hersteller die 28-Tage Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der FL-Zusammensetzung erhalten. Diese neue kalkbasierte Bindemittelklasse ermöglicht es so den Produzenten, über definierte Festigkeitsregulierung in Kombination mit den positiven Kalkeigenschaften wie z. B. Verarbeitbarkeit, Risselbstheilung und Dauerhaftigkeit, den Absatz an Kalkhydrat im Mörtelbereich zu steigern.

Im Gegensatz zu der in EN 459-1 ebenfalls beschriebenen Bindemittelklasse der Hydraulischen Kalke (HL) müssen die Bestandteile des FL vom Hersteller qualitativ und quantitativ angegeben werden (Tab. 2.1.1). Des Weiteren liegt der von der Norm geforderte Mindestgehalt an „Verfügbarem Kalk (A.L.)“ im FL mit 15 % deutlich höher als in HL (4 %). Der höhere A.L.-Anteil im FL wird in der EN 459-1 durch ein, verglichen mit den HL, späteres Erstarrungsende (Tab. 2.1.4) berücksichtigt.

Im Zuge der in der Einleitung beschriebenen CO₂-Diskussion ergibt sich nun die Möglichkeit, (FL)-Bindemittel mit einer günstigeren CO₂-Bilanz zu entwickeln, deren Zusammensetzung nun, dank der neuen Baukalknorm, auch dem Käufer dieser Produkte bekannt sein wird.

FL-ähnliche Mischungen wurden bisher ausschließlich von wenigen Herstellern in Frankreich und Italien eingesetzt. Daher sind Kenntnisse zu den Materialkennwerten dieser Mischungen ausschließlich betriebsintern und nicht publiziert. Natürlich hydraulischer Kalk (NHL nach EN 459) und Trasskalk, ein hydraulischer Kalk (HL nach EN 459), sind FL-ähnliche Bindemittel und finden in Deutschland Anwendung bei der Sanierung, der Denkmalpflege und im ökologisch-biologischen Haus- und Wohnungsbau.

Zum Erreichen des Forschungsziels war es erforderlich, in einem ersten Schritt Materialuntersuchungen an der neuen Bindemittelklasse der FL durchzuführen, um dann darauf aufbauend, in einem zweiten Schritt, FL-haltige Werk trockenmörtel hinsichtlich wichtiger mörteltechnischer Eigenschaften zu prüfen.

Zum Erreichen des Forschungsziels, wurde folgender Lösungsweg eingeschlagen:

1. Die nach der DIN EN 459-1 zugelassenen Haupt- und Nebenbestandteile zur Herstellung der FL wurden technisch und wirtschaftlich beurteilt. Auf dieser Grundlage wurde ihre zu erwartende Verwendung als FL-Bestandteil eingeschätzt. So wurden Rohstoffe mit lediglich regionaler Verbreitung oder ungünstigem Materialkosten/Erlös-Verhältnis von der Verwendung im Forschungsvorhaben ausgeschlossen. Ebenso wurden keine Zusätze eingeplant, die der Einstellung von mörteltechnischen Parametern dienen, da dies, aufgrund der dadurch entstehenden immensen Variabilität, den Rahmen des Forschungsvorhabens sprengen würde. Die Beurteilung und Auswahl der Rohstoffe ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Die nach den oben beschriebenen Kriterien ausgewählten Rohstoffe wurden jeweils in mindestens zwei verschiedenen Variationen eingesetzt, um den Einfluss von Rohstoffvariationen quantifizieren zu können. Die Einflussfaktoren dieser Rohstoffvariationen und ihre Ursachen sind in Abbildung 3.1 als Ishikawa-Diagramm dargestellt.
2. Die ausgewählten Rohstoffe wurden hinsichtlich wichtiger chemischer und physikalischer Eigenschaften charakterisiert, um den Einfluss von Rohstoffvariationen auf die daraus hergestellten Formulierten Kalke quantifizieren zu können. Die Werte für den SO_3 -Gehalt (wasser- und kristallwasser-frei), die Korngröße und das freie Wasser wurden für die einzelnen Rohstoffe bestimmt um sicher zu stellen, dass die für Formulierte Kalke nach EN 459-1 geltenden Grenzwerte bei den FL-Mischungen eingehalten werden.
3. Mit Hilfe der aus Punkt 2 gewonnenen Erkenntnisse wurden in Vorversuchen erste FL-Mischungen hergestellt und auf ihre Konformität bezüglich DIN EN 459-1 geprüft.

Material	Verwendung im Arbeitsprogramm	Beurteilung / Anmerkung
Baukalk CL 90	X	Grundbestandteil der FL Mischungen
Baukalk CL 80	X	
Baukalk NHL		Die NHL zeichnen sich dadurch aus, dass der Rohstoff ohne Beimischung zusätzlicher Stoffe gebrannt, gelöscht und vermarktet wird. Sie erschließen damit ein spezielles Marktsegment, bei dem die Kunden auf zementfreie Produkte Wert legen. Daher ist ein Einsatz der NHL in FL-Mischungen nicht praxisrelevant.
Zement CEM I 42,5 R	X	Standardzement, frühfestigkeitsgebende Komponente
Zement CEM II und CEM III		Hüttensand, Puzzolan und Kalkstein werden als Einzelkomponenten untersucht. Silicastaub, Flugasche und gebrannter Schiefer sind nach der EN 459-1 nicht als Hauptbestandteile in FL zugelassen.
Portlandzementklinker		Portlandzement ohne Sulfatträger, Einsatz im technischen Maßstab nicht üblich, überwiegend CEM I Einsatz zu erwarten
Natürliches Puzzolan	X	Trass; Zementsubstitut
Natürliches getempertes Puzzolan		In Deutschland nur zur Herstellung von CEM II A-Q/ B-Q eingesetzt, nicht im freien Markt erhältlich
Kalkstein	X	Füllmaterial
Hüttensand	X	Zementsubstitut
Calciumsulfat		Die Zugabe von Calciumsulfat ist nur bei der Verwendung von Portlandzementklinker (zur Regelung der Erstarrung) notwendig, da hier der Sulfatträger fehlt.
Silicastaub,		Der technische Einsatz von Silicastaub in FL ist aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus nicht praxisrelevant (Materialkosten im Verhältnis zum Erlös).
Organische Zusätze, Mineralische Zusätze		Diese Zusätze dienen der speziellen Aussteuerung von Mörtelsystemen und sind, aufgrund der dadurch entstehenden immensen Variabilität der Mischungen, nicht Gegenstand der Untersuchungen

Tab. 3.1: Übersicht der Auswahl der Mischungsbestandteile zum vorgesehenen Arbeitsprogramm

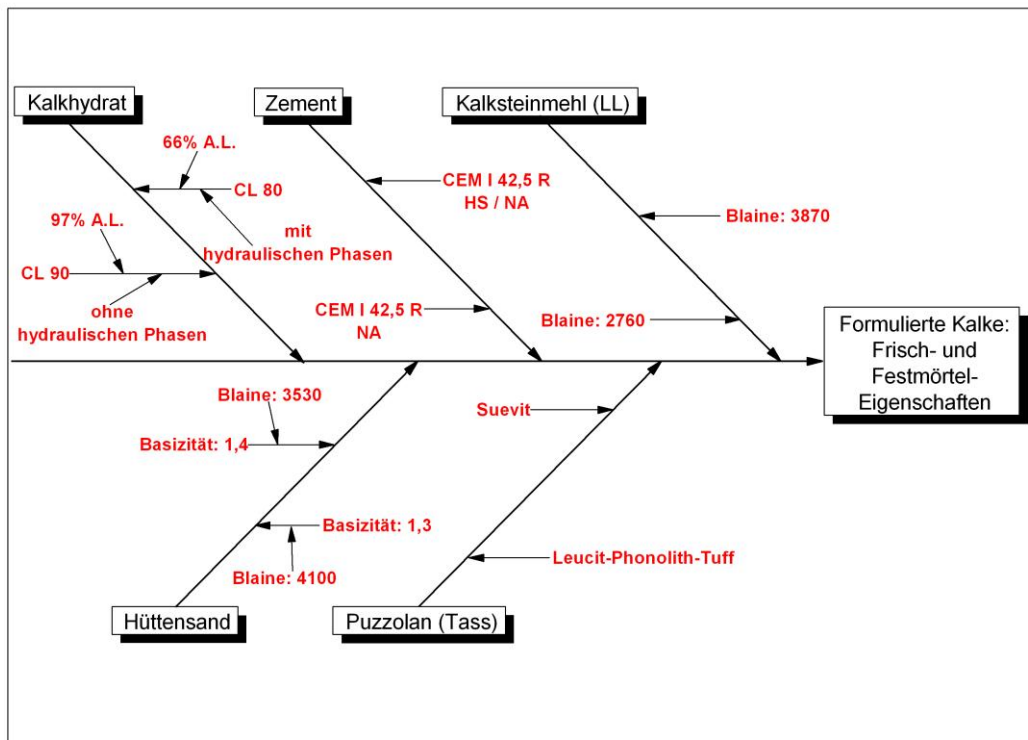


Abb. 3.1: Ishikawa-Diagramm zu den im Untersuchungsprogramm variierten Einflussfaktoren der geplanten Mischungsbestandteile

4. Die Ergebnisse aus Punkt 2 und 3 stellten die Grundlage der statistischen Versuchspläne dar. Diese enthielten festgelegte Kombinationen von Rohstoffen in bestimmten Mischungsverhältnissen. Um die Versuche aus der statistischen Versuchsplanung in einem zeitlich vertretbaren Rahmen ablaufen zu lassen, wurden zur Reduzierung der Versuchszahl einige Einschränkungen vorgenommen.
5. An den, in den statistischen Versuchsplänen beschriebenen Mischungen, wurden die 28d-Druckfestigkeiten nach DIN EN 459-2 (bei einem W/B-Verhältnis von 0,55) bestimmt. Mit Hilfe dieser Ergebnisse wurde ein quantitatives Korrelationsmodell aufgestellt, aus dem die 28d-Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Rohstoffkombination, bei einem konstanten W/B-Wert von 0,55 abgelesen werden können. Um eine Aussage über die Auswirkung einer Änderung des W/B treffen zu können, wurden zusätzliche Versuche mit verändertem W/B durchgeführt.
6. Die aus den Punkten 2, 3, 4 und 5 gewonnenen Erkenntnisse dienten als Grundlage für die Auswahl der Trockenmörtel-Mischungen, welche in einem letzten Schritt hinsichtlich wichtiger mörteltechnischer Parameter geprüft wurden.

4 Methoden

4.1 Probennahme

Die Ausgangsproben wurden von den jeweiligen Herstellern in gemahlenem Zustand, als Sackware bezogen.

4.2 Probenbezeichnung

Folgende Abkürzungen bzw. Bezeichnungen wurden für die in dieser Arbeit vorkommenden Proben verwendet:

CL90	Kalkhydrat-Pulver, Available Lime = 97,0 %, (CL 90-S)
CL90_vgl	Kalkhydrat-Pulver Available Lime = 93,5 %, (CL 90-S)
CL80	Kalkhydrat-Pulver Available Lime = 69,8 %, (CL 80-S)
CL80_vgl	Kalkhydrat-Pulver Available Lime = 75,5 %, (CL 80-S)
CEM_NA	Portlandzement (CEM I 42,5 R-NA)
CEM_HS	Portlandzement (CEM I 42,5 R-HS/NA)
Trass_Bay	Natürliches Puzzolan (Trassmehl, Suevit aus Bayern)
Trass_Eif	Natürliches Puzzolan (Trassmehl, vulkanischer Tuff aus der Eifel)
KSTM	Kalksteinmehl LL (Mahlfeinheit nach Blaine = 2760 [cm ² /g])
KSTM_vgl	Kalksteinmehl LL (Mahlfeinheit nach Blaine = 3870 [cm ² /g])
HS_f	Hüttensandmehl (mittlere Basizität)
HS_g	Hüttensandmehl (hohe Basizität)
HS_vgl	Hüttensandmehl (identisch mit HS_f, aber feiner aufgemahlen)

4.3 Chemische und physikalische Bestimmungsmethoden

4.3.1 Übersicht der angewandten Methoden und der Probenpräparation

Parameter	Methode	Prüfvorschrift / Beschreibung	Hinweise
Available Lime	Titration	DIN EN 459-2	Gehalt an verfügbarem Kalk ausgedrückt als verfügbares Ca(OH) ₂ [Massenanteil in %]
CaO	Titration	DIN EN 459-2	Bestimmung aus dem Lithiumtetraborat-Schmelzaufschluss
SiO ₂	ICP-OES	BVK- Prüfverfahren- sammlung Teil 3	
Fe ₂ O ₃			
Al ₂ O ₃			
Na ₂ O			
K ₂ O			
BaO			
SrO			
MnO ₂			
TiO ₂			
SO ₃			ICP-OES
MgO			
CO ₂	IR-Spektroskopie	DIN EN 459-2	Die Probe wird im Induktionsofen bei 1200° C zersetzt. Die entstehenden Gase werden mit IR-Absorption untersucht.
Glühverlust	Gravimetrie	DIN EN 459-2	Glühen der Probe im Pt-Tiegel bei 1050° C bis zur Massenkonstanz
Freies Wasser			Erhitzen der Probe auf 105° C im Trockenschrank
Wasserlösliche Alkalien	Einstufiges Schüttelverfahren	DIN 38414-4	Best. der Konzentration mittels ICP-OES
Mineralphasenbestimmung	Powder-XRD	Kapitel 4.3.3	Qualitative Phasenanalyse
Siebrückstand	Luftstrahlsiebung	DIN EN 459-2	Rückstand auf Sieb mit 0,2 und 0,09 mm Maschenweite
Rohdichte	Pyknometerverfahren	DIN EN 1097-7	
Mahlfeinheit	Luftdurchlässigkeitsverfahren nach Blaine	DIN EN 196-6	
Spezifische Oberfläche	Einpunkt-Differenzverfahren nach Haul und Dümbgen	DIN 66132	
Korngrößenverteilung	He/Ne-Laser Diffraktion	Kapitel 4.3.4	nach Fraunhofer-Theorie
Schüttdichte		DIN EN 459-2	
Raumbeständigkeit	Dampfhydratation	DIN EN 459-2	an einer zu einem scheibenförmigen Prüfkörper gepressten Probe
Erstarrungszeiten	Nadelgerät nach Vicat	DIN EN 459-2	an Baukalkleim von Normsteife
Ausbreitmaß	Ausbreittisch	DIN EN 459-2	an Normmörtel
Eindringmaß	Steifemessgerät	DIN EN 459-2	an Normmörtel mit best. Ausbreitmaß
Luftgehalt	Druckausgleichsverfahren		
Präparation und Lagerung der Prüfmörtel	Feuchtekasten	DIN EN 459-2	Luftfeuchte ≥ 90%, T = (20 ± 1)° C
Druckfestigkeit		DIN EN 459-2	an Normmörtel: W/B richtet sich nach Schüttdichte und Druckfestigkeitsklasse; Belastungsgeschwindigkeit = (400 ± 40) N/s
Biegezugfestigkeit	Drei-Punkt-Lastverfahren	DIN EN 196-1	Belastungsgeschwindigkeit = (50 ± 10) N/s
Festmörtelrohndichte		Kapitel 4.3.5	
Carbonatisierungstiefe	Phenolphthalein-Test	Kapitel 4.3.7	
Reaktionsvermögen	Kalorimetrie	Kapitel 4.3.2	an reaktiven Bindemitteln

Tab. 4.3.1: Präparation der FL und auf diese und deren Mischungsbestandteile angewandte Messmethoden

Die angewandten Messmethoden und die Methoden der Probenpräparation sind in Tabelle 4.3.1 und Tabelle 4.3.2 aufgeführt. Für genormte Verfahren bzw. bei validierten Prüfvorschriften sind die jeweiligen Verweise angegeben. Methoden ohne allgemeingültige Prüfvorschriften werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

Parameter	Methode	Prüfvorschrift / Beschreibung	Hinweise
Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel	Ausbreittisch	DIN EN 1015-2 und DIN EN 1015-3	Rohdichte des Frischmörtels > 1200 kg/m ³
Rohdichte von Frischmörtel		DIN EN 1015-6	Konsistenz bei der Anwendung: Plastischer Mörtel
Mischen des Mörtels		DIN EN 1015-2	im Mischer nach DIN EN 196-1
Vorbereitung und Lagerung der Prüfmörtel	ohne Wasserabzug durch Filterpapier	DIN EN 1015-11	Mörtelart: Mörtel mit anderen hydraulischen Bindemitteln (FL)
Druckfestigkeit		DIN EN 1015-11	Belastungsgeschwindigkeit = (100 ± 10) N/s
Biegezugfestigkeit	Drei-Punkt-Lastverfahren		Belastungsgeschwindigkeit = (50 ± 10) N/s
Dynamischer E-Modul	Grindo-Sonic-Verfahren	Kapitel 4.3.6	Bestimmung aus Eigenfrequenz der Biegeschwingung (flexural)
Festmörtelrohddichte		Kapitel 4.3.5	
Carbonatisierungstiefe	Phenolphthalein-Test	Kapitel 4.3.7	
Quell- und Schwindverhalten		DIN 52450	an ausgewählten Mörtelprismen
Gefügeausbildung	Lichtmikroskopie	Kapitel 4.3.8	an ausgewählten Mörtelprismen
Porosität	Quecksilberdruckporosimetrie	Kapitel 4.3.9	an ausgewählten Mörtelprismen
Kapillare Wasseraufnahme		Kapitel 4.3.10	
Ausblühneigung		Kapitel 4.3.11	
Sulfatresistenz		Kapitel 4.3.13	
Frost-Tau-Widerstand		Kapitel 4.3.12	
Kornverteilung		DIN EN 1015-1	

Tab. 4.3.2: Präparation der aus den FL hergestellten Trockenmörtel und auf diese angewandte Messmethoden

4.3.2 Reaktionsvermögen

Zur Untersuchung der Reaktivität wurden Wärmeflussverlauf und Gesamtenergieumsatz der reaktiven Bindemittel nach Anmachen mit Wasser mittels Kalorimeter gemessen. Verwendet wurde ein isothermisches Kalorimeter, Typ 3115/3238 TAM Air der Firma Thermometric AG. Hierbei handelt es sich um ein 8-kanaliges Wärmeleitkalorimeter. Alle 8 Kanäle formen zu-

sammen einen Kalorimeterblock (single heat-sink block), welcher in einem temperaturkontrollierten Luftthermostat untergebracht ist. Die Wärmesensoren befinden sich unmittelbar unterhalb der Mess- und Referenzproben, wo der Wärmeaustausch mit der Umgebung in Form elektrischer Spannung proportional zum Wärmefluss erfasst wird. Die Messungen wurden bei konstanter Betriebstemperatur des Gerätes von 20 °C durchgeführt.

4.3.3 Mineralphasenbestimmung

Die qualitative Mineralphasenbestimmung erfolgte an Pulver-Presslingen. Die Ausgangsproben wurden hierzu auf ein Korngröße < 63 µm gemahlen. Tabelle 4.3.3 gibt die Diffraktometer-Einstellungen wieder.

Röntgen-Gerät	Philips PW 3710
Strahlung	Cu K α
Röhrenspannung	40 kV
Röhrenstrom	40 mA
Primärstrahloptik	Sollerblende 0,04 rad
	feste Divergenzblende 0,5°
Streustrahloptik	fester Empfängerspalt 0,2 mm
	feste Streustrahlblende 0,5°
	Xe-Miniproportionalzähler
Rotation des Probensträgers	1/sec
2 θ -Messbereich	3-65°
Schrittweite	0,02°
Zeit pro Schritt	1 sec
Scangeschwindigkeit	0,02°/sec
Software	X'Pert HighScore 1.0b

Tab. 4.3.3: Diffraktometereinstellungen

4.3.4 Korngrößenverteilung mittels Laserdiffraktometrie (nach Faunhofer-Theorie)

Das Verfahren basiert auf dem Prinzip der Laserbeugung. Durch die in einer Flüssigkeit dispergierte Probe wird ein Laserstrahl gelenkt. Dieser wird in Abhängigkeit von der Partikelgröße an den Feststoffteilchen mehr oder minder stark gebeugt, so dass sich ein korngößenabhängiges, spezifisches Beugungsbild ergibt, welches ausgemessen wird. Ermittelt werden dabei die Dichte- und Summenverteilung der Partikelgrößen, die als Kurvenverlauf aufgetragen werden können. Die Summenverteilungskurve $Q_r(x)$ ergibt sich aus dem Mengenanteil der Partikel, die im jeweiligen Punkt x die zugehörige Partikelgröße nicht überschreiten. Die Dichteverteilungskurve $dQ_r(x)/dx$ gibt die Mengenanteile in den jeweiligen Partikelklassen wieder und kann mathematisch durch Differentiation der Summenverteilungskurve gebildet werden. Der

Index r kennzeichnet die Mengenart und kann die Werte 0 (Anzahl), 1 (Länge), 2 (Fläche) bzw. 3 (Volumen oder Masse) annehmen (LESCHONSKI, 1988). Die Werte $d_x = y$ besagen, dass x Prozent der Teilchen $\leq y \mu\text{m}$ sind.

Verwendet wurde ein Sympatec Helos 12 KA SU, mit einstellbarer Brennweite.

4.3.5 Festmörtelrohddichte

Zur Bestimmung der Festmörtelrohddichte wurden die Mörtelprismen kurz vor der Druckfestigkeitsprüfung gewogen. Die Dichte ergibt sich nach:

$$\rho = m / V \quad \rho = \text{Dichte [kg/dm}^3\text{]}$$

$$m = \text{Masse des Festmörtel-Prismas [kg]}$$

$$V = \text{Volumen des Festmörtel-Prismas [dm}^3\text{]}$$

4.3.6 Dynamischer Elastizitätsmodul (Grindo-Sonic-Verfahren)

Das Grindo-Sonic-System arbeitet nach der Impulserregungs-Technik, welche als ASTM-Standard aufgenommen ist (Lemmens, Referenzhandbuch MK5“Industrial“). Bei dem Verfahren werden die bei Stoßerregung auftretenden Grundschnwingungen (Eigenfrequenzen) des Mörtelprismas gemessen. Das Verfahren beruht darauf, dass jeder Körper der zum Schwingen gebracht wird, nach einer komplexen Anfangsschnwingung, schnell seine Grundschnwingungsart erreicht. Die praktische Durchführung der Messung besteht darin, dass das Mörtelprisma ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) an den Knotenlinien der Biegeschnwingung mit dünnen Schaumstoffstreifen unterlegt wird, leicht und elastisch, von oben, in der Mitte mit dem Erreger angeschlagen wird und die Eigenfrequenz der Biegeschnwingung (flexural) mit einem piezoelektrischen Schnwingungsaufnehmer senkrecht zum Anschlag gemessen wird.

Für die Messung wurde das Grindo-Sonic-Gerät MK4i (Fa. J.W. Lemmens GmbH) verwendet. Die Berechnung des dynamischen Elastizitätsmoduls der Biegeschnwingung erfolgt, unter Einbeziehung der Probengeometrie und der Festmörtelrohddichte nach (Pickett 1945, Spinner & Tefft 1961) mit dem zum Gerät gehörenden PC-Programm (Version V 7.2 D 09/88).

4.3.7 Karbonatisierungstiefe

Zur Bestimmung der Tiefe der im Mörtelprisma von außen nach innen unter der Einwirkung von atmosphärischem CO_2 fortschreitenden Karbonatisierung, wird der Indikator Phenolphthalein verwendet. Die farblose Phenolphthalein/Ethanol-Lösung, die auf die frische Bruchfläche des Mörtelprismas getropft wird, färbt sich im alkalischen Milieu rosa. Nicht verfärbte

Randbereiche des Prismas zeigen die bereits karbonatisierte Mörtelschicht (Carbonisierungstiefe in [mm]).

4.3.8 Gefügeausbildung / Lichtmikroskopie

Die für die Dünnschliffe verwendeten Teilstücke wurden vor der Präparation bei $T = 40^{\circ}\text{C}$ bis zur Massekonstanz getrocknet. Anschließend wurden die Proben unter Vakuum mit farbigem Epoxydharz (gelb) vergossen, plan geschliffen und im Ultraschallbad von eventuellen Rückständen gereinigt. Nach der Trocknung wurden die Proben auf ein Objektträgerglas ($48 \times 28 \text{ mm}^2$) geklebt und auf eine Dicke von ca. $d = 20 \mu\text{m}$ planparallel zum Objektträger geschliffen. Nach einer erneuten Reinigung im Ultraschallbad und anschließender Trocknung wurde der Dünnschliff mit einem Deckgläschen abgedeckt. Im Vordergrund der lichtmikroskopischen Untersuchungen stand die Gefügeausbildung der Mörtelproben.

4.3.9 Porosität / Quecksilberdruckporosimetrie

Für die quecksilberdruckporosimetrischen Untersuchungen wurden die Mörtelproben bei $T = 40^{\circ}\text{C}$ im Trockenschrank bis zur Massekonstanz getrocknet.

Mit einer Beißzange wurde ein Granulat mit der Körnung $2/4 \text{ mm}$ gebrochen, welches, nach erneuter Trocknung bei $T = 40^{\circ}\text{C}$ bis zur Massekonstanz, mittels Quecksilberdruckporosimeter zur Bestimmung der Trockenrohichte, der Reindichte, des kumulierten Porenvolumens und der Porenradienverteilung untersucht wurde. Die entsprechend konditionierten Proben der einzelnen FL-Mörtelproben wurden mit einem Quecksilberdruckporosimeter der Firma ThermoQuest Typ Pascal 140/240 untersucht. Der Druckbereich des Porosimeters reicht von $p = 0$ bis 200 MPa , dies bedeutet, dass Poren mit einem Durchmesser von ca. $d = 300 \mu\text{m}$ bis 4 nm erfasst und quantitativ dargestellt werden können. Die Proben wurden in einem Pulverdilatometer bei mittlerer Geschwindigkeit der Druckerhöhung untersucht. Es wurden sowohl die Porenradienverteilung (mm^3/g) und der mittlere Porenradius (μm), als auch die Rein- und Trockenrohichte (g/cm^3) mittels MIP ermittelt.

4.3.10 Kapillare Wasseraufnahme

Zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme wurde der Wasseraufnahmekoeffizient nach (Knöfel & Schubert 1993) ermittelt.

Hierzu wurden die 28 Tage alten Probekörper zunächst bei 60°C zur Massekonstanz getrocknet und anschließend an den langen Seitenflächen mit Paraffin abgedichtet. Danach wurden

die Proben gewogen und stirnseitig auf einen Rost in 1 bis 2 mm tiefes destilliertes Wasser gestellt. Die Probekörper wurden in bestimmten Zeitabständen gewogen. Daraus ergab sich der Wasseraufnahmekoeffizient:

$$\omega_t = \frac{W_t}{\sqrt{t}}$$

mit

ω	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/(m ² * h ^{0,5})]
W	flächenbezogene Wasseraufnahme [kg/m ²]
t	Zeit [h]

4.3.11 Ausblühneigung

Die Ausblühneigung der Mörtel wurde nach (Knöfel & Schubert 1993) anhand der Menge der ausgeblühten Salze untersucht. Die Mörtelprismen wurden zunächst 7 Tage bei 90% Luftfeuchte (Feuchtekasten) gelagert und im Anschluss daran, abweichend von der in (Knöfel & Schubert 1993) beschriebenen Methode, 21 Tage bei 60% Luftfeuchte (Normklima). Danach erst wurden die Mörtelprismen für 24 Stunden stirnseitig 10 mm tief in destilliertes Wasser gestellt und anschließend 6 Tage im Normklima gelagert. Dieser Feucht-Trockenwechsel wurde für insgesamt 20 Zyklen wiederholt. Anschließend wurden die ausgeblühten Salze vorsichtig abgelöst, gewogen und röntgenographisch bestimmt.

4.3.12 Frost-Tau-Widerstand

Die Bestimmung des Frost-Tau-Widerstandes erfolgte in Anlehnung an das Verfahren von (Knöfel & Schubert 1993).

Die Mörtelprismen wurden zur Ermittlung der Trockenmasse zunächst bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet, danach wassergetränkt und einzeln in einen luftgefüllten Kunststoffbeutel wasserdicht verschlossen. Die Proben in den Kunststoffbeuteln wurden anschließend 15 Frost-Tauwechseln unterzogen. Ein Wechsel besteht aus einem dreistündigen Abkühlen von +20°C auf -20°C, Lagern für weitere 2 Stunden, einer darauf folgenden dreistündigen Erwärmung auf +20°C und ebenfalls Lagern für weitere zwei Stunden.

Abweichend vom Verfahren fanden die Frost-Tau-Wechsel mittels eines Gefrier- und eines Klimaschranks statt. Der Wechsel über Nacht fand über einen Zeitraum von 15 Stunden statt. Die Wechsel über das Wochenende über 63 Stunden. Die Temperatur in der Gefriertruhe schwankte zwischen -17°C und -20°C.

Nach jeweils 5 Zyklen wurden die Trockenmasse der Absplitterungen und augenscheinliche Veränderungen dokumentiert. Zur Bewertung des Frost-Tau-Widerstandes wurden ferner die Wasseraufnahme vor der Prüfung in Masse%, der Masseverlust in Masse% sowie Art und Umfang der Frostschäden mit Angabe des ersten Auftretens herangezogen.

4.3.13 Sulfatresistenz

Zur Untersuchung der Sulfatresistenz wurden die Prüfkörper in einem Alter von 28 Tagen zunächst für 24 Stunden in destilliertem Wasser gelagert und anschließend in ein Wasserbad von 20 l destilliertem Wasser, in dem 30 g Natriumsulfat gelöst wurden, umgelagert. Alle 28 Tage wurde die Lösung erneuert. In einem Abstand von 7 Tagen wurden an den Mörtelprismen Messungen zum Schwind- und Quellverhalten nach DIN 52450 durchgeführt und dokumentiert. Zum Versuchsende wurden die Druckfestigkeiten der in Sulfatlösung gelagerten Proben bestimmt. Augenscheinliche Änderungen sowie Änderungen der Länge und Druckfestigkeit geben Aufschluss über die Sulfatresistenz der Mörtelproben.

4.4 Statistische Modelle

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, eine allgemeingültige Datenbasis zu Fragen der Wechselwirkungen einzelner FL-Bestandteile und ihrer Auswirkungen auf die Eigenschaften der mit FL hergestellten Mörtel zu schaffen. Von besonderem Interesse war es dabei, normativ gültige FL zu entwickeln, um den Produzenten deren Herstellung zu erleichtern.

Da die 28-Tage Druckfestigkeiten der FL maßgeblich darüber entscheiden, ob die Bindemittel-Zusammensetzung normativ einem FL entspricht, wurde ein Modell entwickelt aus welchem die Hersteller die 28-Tage Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der FL-Zusammensetzung erhalten.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der statistischen Planung von Experimenten und deren Modellierung und Analyse mittels statistischer Modelle. Der Aufbau der Versuche, die für das vorliegende Projekt durchgeführt wurden, wird diskutiert und die Besonderheiten von Experimenten mit Mischungen thematisiert.

Eines der Hauptziele bei dem Projekt „Formulierten Kalke“ ist es, den noch unbekanntem Versuchsbereich zu erforschen. In diesem Kapitel wird gezeigt, dass die statistischen Modelle ein gutes Mittel sind, um dieses Ziel zu erreichen. Die statistischen Verfahren können dafür verwendet werden, den Versuchsbereich abzugrenzen, indem Druckfestigkeiten für noch unbekannte Mischungen prognostiziert werden.

Statistische Modelle können nur dann als Hilfsmittel bei der Prognose von Druckfestigkeiten benutzt werden, wenn sie korrekt angepasst wurden. Deshalb werden anschließend diverse Diagnostik-Instrumente präsentiert, die die Validität der Modelle überprüfen.

4.4.1 Vorversuche und Einschränkungen zur Reduktion der Versuchszahl

Vor der Erstellung der ersten statistischen Versuchspläne wurden zahlreiche „Vorversuche“ durchgeführt (Tabellen 8.4.1 bis 8.4.5, Anhang). In diesen Vorversuchen wurden Druckversuche unter Variation der Ausgangskomponenten und des W/B-Verhältnisses durchgeführt. Zur Eingrenzung der Existenzbereiche der FL-Mischungen wurden die Gehalte an Verfügbarem Kalk (available lime) bestimmt. Mit Hilfe der Erkenntnisse aus den Vorversuchen wurden folgende Einschränkungen getroffen um die Versuchszahl zu reduzieren:

- Im statistischen Modell konnte nur ein WB-Verhältnis berücksichtigt werden, da die Versuchsanzahl sonst zu groß gewesen wäre. Anhand der Vorversuche zeigte sich, dass realistische W/B-Verhältnisse zwischen 0,50 und 0,60 lagen. Für die Modellierung wurde der mittlere **W/B = 0,55** gewählt um die Abweichungen nach oben und unten so gering wie möglich zu halten.
- Die mit den Kalksteinmehlen KSTM und KSTM_vgl hergestellten Formulierten Kalke verhielten sich in den Vorversuchen nach EN 459 gleich, so dass für die Modellierung **lediglich ein Kalksteinmehl**, die Probe KSTM, verwendet wurde.
- Bei den Vorversuchen zeigte sich, dass die 28T-Druckfestigkeiten von FL, bei denen die Zement-Komponente gegen Hüttensand ausgetauscht wird, gleich sind. Da ab einem Zement- oder Hüttensandgehalt von 50 % die für einen FL obere Druckfestigkeitsgrenze gerade überschritten wurde, wurde festgelegt, dass für die statistische Modellierung **die Summe aus Zement und Hüttensand in einer FL-Mischung maximal 50 %** betragen darf.
- Der **Zementgehalt einer FL-Mischung wurde auf maximal 50 %** beschränkt, da die für einen FL obere Druckfestigkeitsgrenze sonst überschritten wird.
- In einer FL-Mischung befand sich **entweder CL90 oder CL80**, jedoch nicht beides zusammen.
- Damit der Gehalt an verfügbarem Kalk nicht unter- oder überschritten wird, darf der **CL80-Gehalt in der FL-Mischung Werte von 20 bis 100 Masse%** annehmen.
- Damit der Gehalt an verfügbarem Kalk nicht unter- oder überschritten wird, darf der **CL90-Gehalt in der FL-Mischung Werte von 15 bis 80 Masse%** annehmen.
- In einer FL-Mischung befand sich **entweder Hüttensand oder Trass**, jedoch nicht beides zusammen.

- In einer FL-Mischung befand sich **entweder CEM_NA oder CEM_HS**, jedoch nicht beides zusammen.
- **Summe aller Komponenten in einer FL-Mischung = 1**

Mit diesen Einschränkungen lassen sich die Ausgangskomponenten in 16 möglichen Kombinationen mischen. Abbildung 4.4.1 zeigt die 8 möglichen Kombinationen mit der Komponente CL90. Die gleichen Kombinationen sind mit der Komponente CL80 möglich.

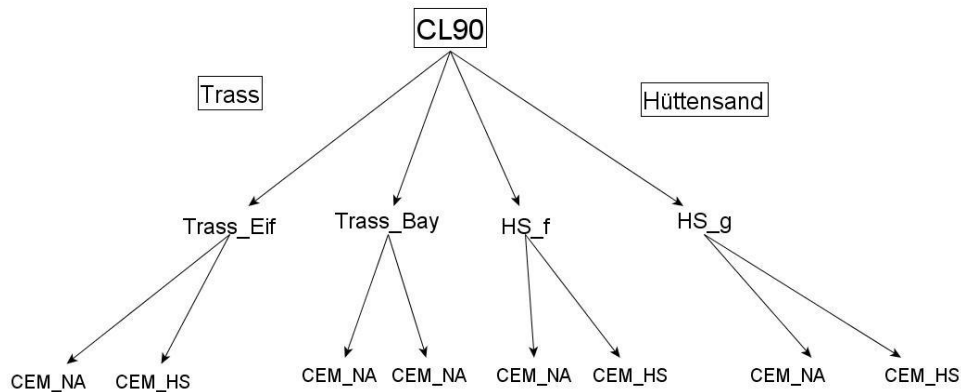


Abb. 4.4.1: Mögliche Kombinationen mit der Komponente CL90

Für die 16 verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten hätte man nun 16 verschiedene Modelle aufstellen können. Diese Strategie wäre allerdings nicht sehr praktikabel gewesen, da man 16 Modelle hätte interpretieren müssen. Diese 16 Modelle wären allerdings aus nur wenigen Daten geschätzt worden und somit nicht sehr aussagekräftig. Deshalb wurde bei der Versuchsplanerstellung nur nach den wichtigsten Komponenten unterschieden: Die beiden Kalkhydrate CL90 und CL80 wurden separat betrachtet, sowie Hüttensand und Trass. Alle anderen Komponenten wurden zusammengefasst. Das heißt, sowohl die gesamte rechte Seite von Abbildung 4.4.1 als auch die gesamte linke Seite wurden jeweils als unabhängiges Mischungsexperiment betrachtet. Analoges galt für die Ausgangskomponente CL80. Durch diese Vorgehensweise entstanden 4 Kombinationen. Abbildung 4.4.2 zeigt das in diesem Experiment benutzte Versuchskombinationsschema.

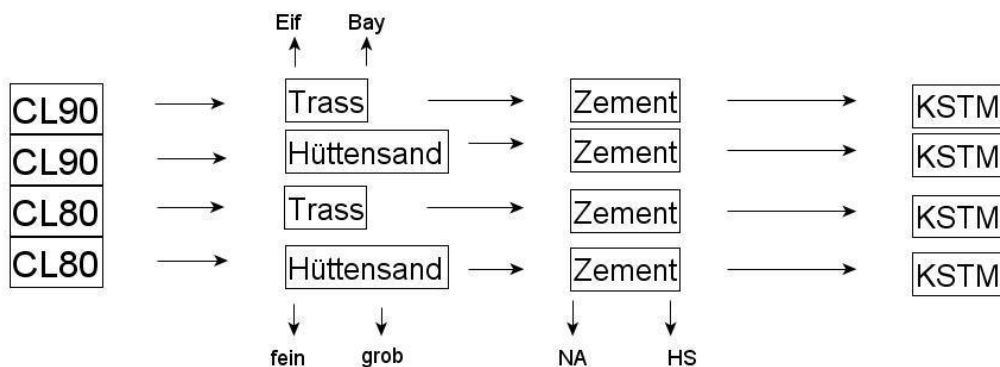


Abb. 4.4.2: Die vier Versuchsplan-Schemata

Bei der Erstellung der statistischen Versuchspläne wurde davon ausgegangen, dass die Bestimmung der 28T-Druckfestigkeit sehr genau ist und sowohl Wiederholbarkeit als auch Vergleichbarkeit sehr hoch sind. So konnte ein Versuchsplanungs-Schema gewählt werden, das mehr Wert auf die Exploration des Versuchsbereichs legt als auf die Überprüfung der Variation. Die benutzten Versuchspläne fallen in die Klasse der sogenannten *raumfüllenden Versuchspläne*.

4.4.2 Statistische Modellierung und Versuchsplanung

Für die Untersuchung und Vorhersage der Druckfestigkeit wurden Methoden der statistischen Modellierung und Versuchsplanung verwendet. Die wichtigsten Begriffe und Verfahren werden kurz vorgestellt.

Lineare Regressionsmodelle

Die folgende Beschreibung von Regressionsmodellen basiert auf (Myers et al. 2009). Das Ziel einer Regressionsanalyse ist es, eine interessierende Variable Y (in unserem Fall ist das die Druckfestigkeit) in Abhängigkeit von erklärenden Variablen oder Regressoren x_1, \dots, x_n (bei uns sind das die verschiedenen Ausgangskomponenten) zu beschreiben (Fahrmeir et al. 2007).

Lineare Regressionsmodelle gehören zu den meistverwendeten Methoden für statistische Auswertungen und Vorhersagen. Ein Grund für die Beliebtheit dieser Modelle ist die Tatsache, dass sie relativ einfach anzupassen und zu verwenden sind. Dazu sind sie sehr flexibel und in der Lage, komplexe Zusammenhänge der vorliegenden Daten zu modellieren und wiederzugeben. Ein weiterer wichtiger Grund für die Popularität von linearen Modellen ist, dass die Theorie hierzu sehr gut entwickelt ist. Lineare Modelle werden auch mit großem Erfolg in der Industrie verwendet und gehören somit zu den Standardmethoden.

In linearen Regressionsmodellen wird von einem polynominalen Zusammenhang zwischen den Regressoren und der Zielvariable ausgegangen, wobei in den meisten Fällen ein quadratisches Polynom, auch Modell zweiter Ordnung genannt, angepasst wird:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

Hierbei modelliert der Term ϵ die unbekanntenen Abweichungen vom Mittelwert, auch als Fehler bezeichnet. Das so formulierte Modell enthält alle sogenannten Haupteffekte - die x_j 's - und alle quadratischen Effekte x_j^2 . Quadratische Effekte sind dann wichtig, wenn die Vermutung plausibel ist, dass zwischen dem jeweiligen Regressor x_j , $j \in \{1, \dots, n\}$ und der Zielgröße Y eine komplizierte Relation existiert, die nicht nur mit linearen Zusammenhängen zu erklä-

ren ist. Die Wechselwirkungen $x_i x_j; i, j \in \{1, \dots, n\}, i \neq j$ sind auch in dem oben definierten Modell enthalten. Diese können als Interaktionen zwischen den jeweiligen Variablen interpretiert werden und sind dann von Interesse, wenn der Effekt einer der Regressoren auf die Zielgröße Y vom Wert mindestens einer anderen erklärenden Variablen abhängt.

Meist wird angenommen, dass der statistische Fehler ϵ , mit dem Erwartungswert $E(\epsilon) = 0$ und der Varianz $Var(\epsilon) = \sigma^2$, unabhängig normalverteilt ist. Die unbekannt Parameter β_k heißen Regressionskoeffizienten. Falls es mehr Beobachtungen als Regressoren gibt, können die unbekannt Koeffizienten mit der Kleinsten-Quadrate-(KQ)-Methode geschätzt werden (Myers et al. 2009; Fahrmeir et al. 2007).

Nachdem die Koeffizienten β_k aus den vorliegenden Daten geschätzt sind, kann das angepasste Modell für verschiedene Analysen und Vorhersagen benutzt werden:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{j=1}^n b_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i} b_{ij} x_i x_j$$

Wobei b_k die geschätzten Werte von β_k darstellen und \hat{y} die Vorhersage von Y repräsentiert. Mit dem geschätzten Modell können Prognosen für noch unbekannt Versuchsregionen gemacht werden, indem die Ausgangswerte von x , die von Interesse sind, in der Modellformel substituiert werden.

Die Tatsache, dass ein Modell an die vorgegebenen Daten angepasst ist, bedeutet nicht automatisch, dass dieses Modell valide ist. Es ist immer notwendig das vorhandene Modell und die Anpassung zu überprüfen. Es muss vor allem geprüft werden, ob die Modellannahmen plausibel sind (sind die unbekannt Fehler wirklich normalverteilt und unkorreliert) und ob das Modell gut die beobachteten Daten approximiert und wenn nicht, ob es an bestimmten Einzelwerten (Ausreißer) liegt, oder am Modell selbst.

Die sogenannten Residuen von der KQ-Schätzung sind ein wichtiges Instrument, um die Güte des angepassten Modells zu überprüfen. Die Differenzen zwischen den beobachteten Werten y und den angepassten \hat{y} werden als Residuen bezeichnet: $e = y - \hat{y}$. Mittels dieser Differenz kann die Normalverteilungsannahme der Fehler geprüft werden. Eine Möglichkeit ist ein sogenannter QQ-Plot. In einem QQ-Plot werden die Residuen mit den theoretischen Werten der Normalverteilung (Quantile) verglichen. Liegen die Punkte auf einer Gerade mit 45 Grad Steigung, dann ist die Normalverteilungsannahme plausibel.

Für die Veranschaulichung der QQ-Plots wird ein Beispiel konstruiert, bestehend aus nur zwei Regressoren x_1 und x_2 und der Zielvariablen Y_{Beispiel} . Von den zwei Erklärungsvariablen liegen insgesamt 20 Beobachtungen vor. Es wurde ein einfaches lineares Modell erster Ordnung (nur mit Haupteffekten und keinen quadratischen Effekten oder Wechselwirkungen) angepasst:

$$Y_{\text{Beispiel}} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon$$

Um die Annahme über normalverteilte Fehler zu überprüfen wird der QQ-Plot in Abbildung 4.4.3 betrachtet. Aus dem Plot lässt sich schließen, dass die Annahme in diesem Beispiel plausibel ist, da die meisten Punkte nah an der Linie liegen, kleine Abweichungen sind üblich.

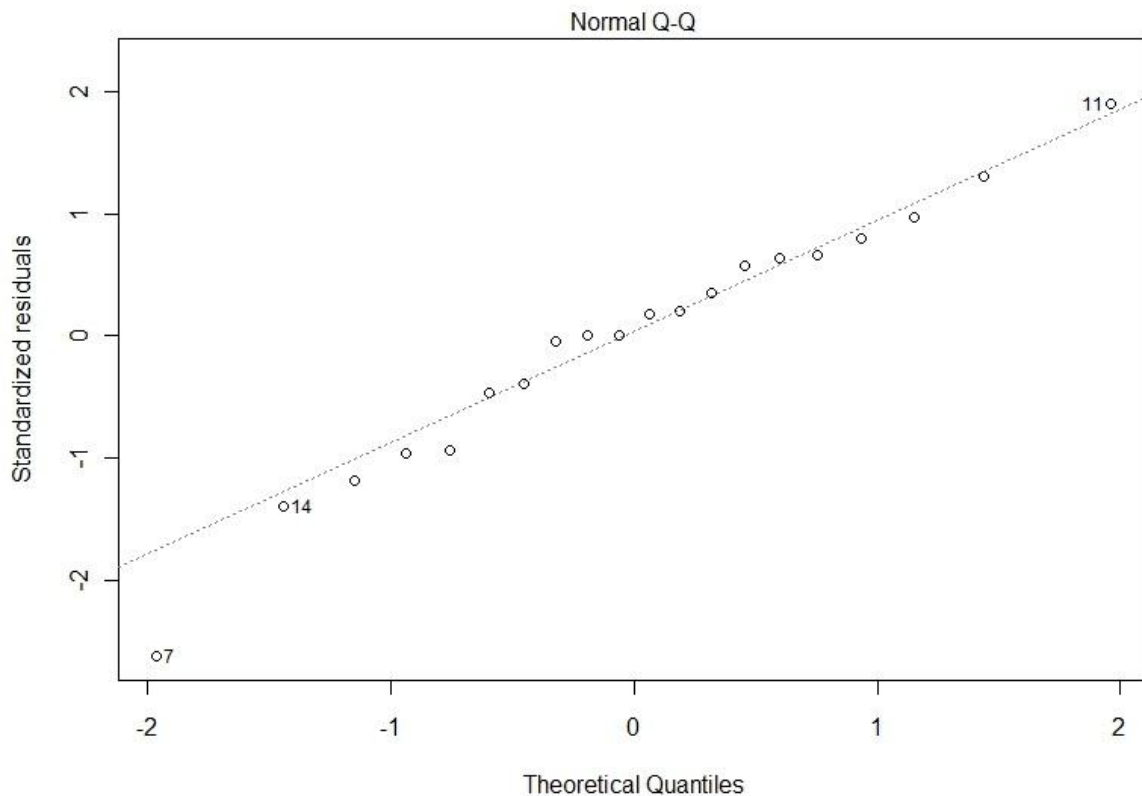


Abb. 4.4.3: QQ-Plot für das einfache lineare Modell erster Ordnung

Residuen finden eine weitere wichtige Anwendung in dem sogenannten Residuenplot. Bei diesem Plot werden die Residuen gegen die geschätzten Werte abgetragen. Falls die Punkte auf der Grafik regellos um 0 schwanken, ist das angepasste Modell plausibel, weil keine Heteroskedastizität vorliegt. Heteroskedastizität bedeutet, dass die Fehler in Abhängigkeit von der Zielgröße systematisch kleiner oder größer werden. Das würde der Unabhängigkeitsannahme der Fehler widersprechen. In Abbildung 4.4.4 ist der Residuenplot für das oben beschriebene Beispiel zu sehen. Man erkennt, dass die Punkte regellos um 0 verteilt sind, was das Modell bestätigt. Auch können Ausreißer mit einem Residuenplot identifiziert werden. In Abbildung 4.4.4 stehen die Beobachtungen 7, 11 und 14 unter Verdacht, dass sie Ausreißer sind, da sie deutlicher von der 0 abweichen.

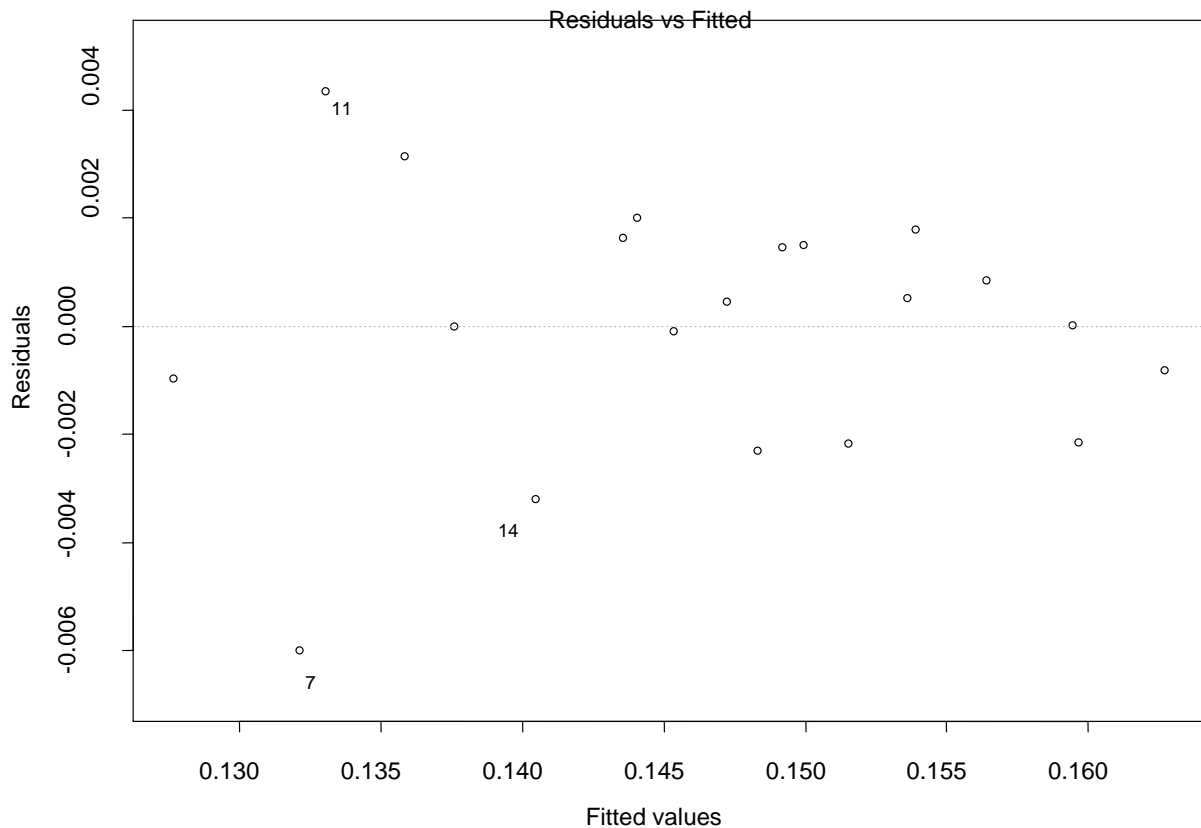


Abb. 4.4.4: Residuenplot für das einfache lineare Modell erster Ordnung

Eine weitere wichtige Modelldiagnostik ist die *Lack-of-fit* Überprüfung. Hierbei wird untersucht, ob das angepasste (theoretische) Modell die echten Beobachtungen gut erklärt (vorhersagt). Dabei werden die echten Werte gegen die vom Modell Vorhergesagten in einem Diagramm abgetragen. Falls die Punkte auf der Winkelhalbierenden liegen, ist die Anpassung gut. Abbildung 4.4.5 zeigt den *Lack-of-fit* Plot für das obige Beispiel. Abgesehen von einigen kleinen Abweichungen von der Linie, scheint das einfache lineare Modell für das Beispiel sehr plausibel zu sein.

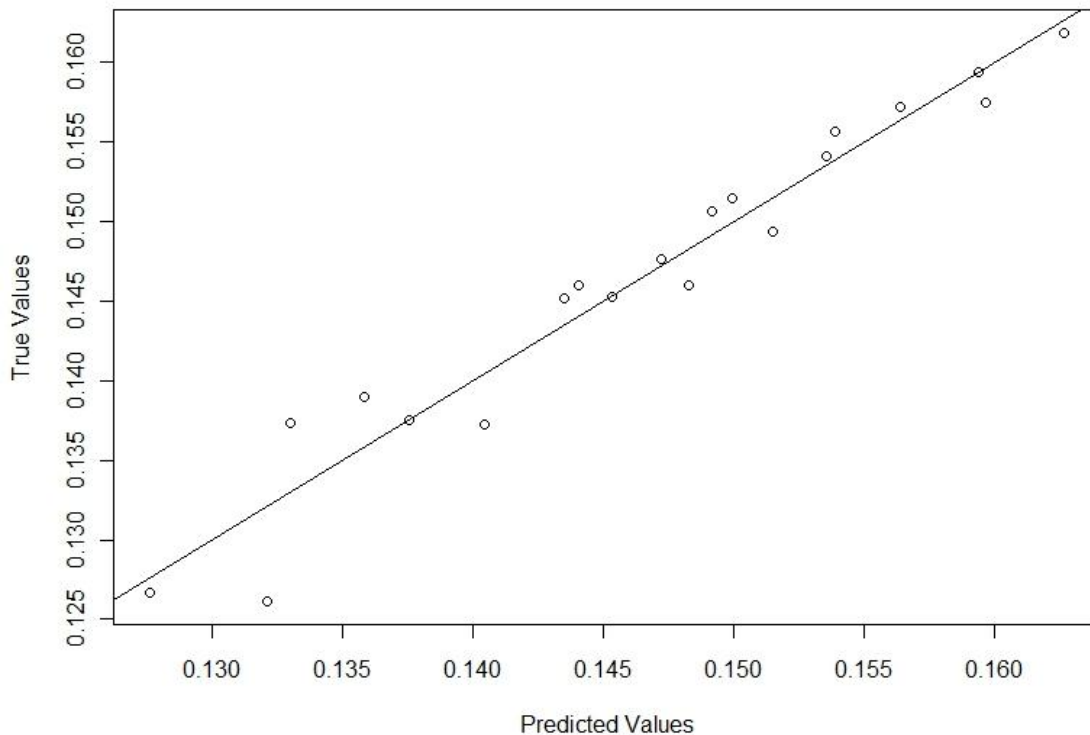


Abb. 4.4.5: Lack-of-fit Plot für das einfache lineare Modell erster Ordnung

Generalisierte Lineare Modelle

Obwohl klassische lineare Modelle in verschiedensten Situationen anwendbar sind, gibt es manchmal Fälle, in denen die lineare Vorhersage nicht exakt die Realität widerspiegelt. Für die Modulierung der Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der FL-Zusammensetzung würde das bedeuten, dass in gewissen Situationen die Vorhersage für die Druckfestigkeit bei einer unbekanntem Mischung negative Ergebnisse liefern kann - was keinen physikalischen Sinn ergibt. Um dieses Problem zu lösen, können generalisierte lineare Modelle (GLMs) angewendet werden. Die folgende kurze Einführung in GLMs beruht auf (McCulloch & Searle 2001).

Wie der Name schon andeutet, sind GLMs eine Generalisierung von linearen Modellen. Sie lassen verschiedene Verteilungen für die Zielvariable zu, nicht nur die Normalverteilung:

$$Y \sim F$$

wobei F eine Verteilung aus der Exponentialfamilie ist. Das ist eine große Klasse von Verteilungen, die eine bestimmte Form besitzen. Die Normalverteilung gehört zu dieser Familie. Weiterhin wird die Zielvariablen-Vorhersage nicht direkt linear in Abhängigkeit von den Regressoren modelliert. Die Verknüpfung wird durch die sogenannte Linkfunktion g , die vorge-

geben ist und nicht linear sein muss, modelliert. Das GLM zweiter Ordnung mit n Regressoren sieht zum Beispiel folgendermaßen aus:

$$\hat{y} = \mu$$

$$g(\mu) = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{j=1}^n b_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i} b_{ij} x_i x_j$$

Damit hängt die mittels der Linkfunktion g transformierte Vorhersage $\mu = \hat{y}$ linear von den Regressoren ab, aber nicht μ direkt. Wenn g als die Identitätsfunktion gewählt wird und F als die Normalverteilung, so entsteht wieder das klassische lineare Modell, das zuvor beschrieben wurde. Die Möglichkeit F und g zu wählen sorgt für mehr Flexibilität bei der Modellanpassung. Da sich die Theorie von klassischen linearen Modellen direkt auf GLMs übertragen lässt, sind GLMs eine sehr gute Erweiterung von Regressionsmodellen.

Für die Modellierung der formulierten Kalke erwies sich die Wahl von F als die Normalverteilung und $g(\mu) = \log(\mu)$ für die Linkfunktion als sehr geeignet. Somit gilt für die Vorhersage der Druckfestigkeit mit einem allgemeinen GLM zweiter Ordnung mit n Regressoren folgende Relation:

$$\hat{y} = \exp \left(b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{j=1}^n b_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i} b_{ij} x_i x_j \right)$$

Die Vorhersage hängt nun exponentiell von den Regressoren ab und nicht direkt linear. Dieses Modell passt bei der Druckfestigkeitsprognose besser und liefert nur positive Vorhersagen.

Scheffé Lineare Modelle

Die folgende Beschreibung von Mischungsmodellen basiert auf (Myers et al. 2009 & Cornell 2002).

Bei den klassischen linearen Modellen, die oben beschrieben wurden, wird davon ausgegangen, dass die Faktoreinstellungen für die verschiedenen Regressoren unabhängig von den Faktorstufen der anderen erklärenden Variablen sind. Im vorliegenden Projekt, geht es um sogenannte Mischungsexperimente. Bei dieser speziellen Art von Experimenten sind die Regressoren Komponenten einer Mischung und sind somit proportional zu einander und nicht mehr unabhängig. Die klassische lineare Regressionstheorie kann in diesem Fall nicht ohne Modifikationen angewendet werden.

Bei Mischungsproblemen wird angenommen, dass die beobachteten Werte für die Zielvariable nur von dem Verhältnis derjenigen Komponenten abhängen, die aktiv in der Mischung vorkommen, und nicht von der absoluten Menge. Weiterhin werden die Komponentenanteile als

Prozentsatz modelliert und mit Werten aus dem Intervall $[0,1]$ kodiert. Für eine beliebige Mischung mit n Komponenten müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

$$\begin{aligned} x_i &\in [0,1], i \in \{1, \dots, n\} \\ \sum_{i=1}^n x_i &= 1 \end{aligned}$$

Diese zwei Bedingungen können nun benutzt werden, um die sogenannten kanonischen oder Scheffé Polynome herzuleiten, die eine Verallgemeinerung der klassischen linearen Modelle für Mischungsexperimente darstellen. Zu diesem Zweck wird die schon bekannte Formel für ein lineares Modell zweiter Ordnung (mit quadratischen Effekten und Interaktionen) betrachtet:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{j=1}^n b_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i} b_{ij} x_i x_j$$

Im Fall von Mischungen, gilt $x_1 + \dots + x_n = 1$. Daraus folgt direkt: $x_i^2 = x_i(1 - \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j)$.

Wird b_0 mit $1 = \sum_{i=1}^n x_i$ in obiger Formel multipliziert und die Substitution für x_i^2 benutzt so folgt:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= b_0 \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i \left(1 - \sum_{j=1; j \neq i}^n x_j \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i} b_{ij} x_i x_j \\ &= \sum_{i=1}^n (b_0 + b_i + b_{ii}) x_i - \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i \sum_{j \neq i} x_j + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i} b_{ij} x_i x_j \\ &= \sum_{i=1}^n b_i^* x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i} b_{ij}^* x_i x_j \end{aligned}$$

Es gelten weiterhin die Identitäten:

$$b_i^* = b_0 + b_i + b_{ii}$$

$$b_{ij}^* = b_{ij} - b_{ii} - b_{jj}, i, j = 1, 2, \dots, n; i < j.$$

Die Scheffé Polynome zweiten Grades, die oben hergeleitet wurden, sind exakt äquivalent zu den klassischen Polynomen zweiten Grades, mit den Bedingungen $x_i \in [0,1], i \in \{1, \dots, n\}$ und $\sum_{i=1}^n x_i = 1$ (Cox 1971).

Versuchspläne

Eines der Hauptziele dieses Forschungsvorhabens ist es, den Raum der zulässigen Mischungskombinationen zu erforschen und Aussagen über „gute“ Mischungen oder sogar gute Bereiche zu treffen. Dabei muss beachtet werden, dass die Anzahl an Versuchen limitiert ist und passend zwischen den verschiedenen, sich gegenseitig ausschließenden, Kombinationsmöglichkeiten aufgeteilt werden muss. Dazu wurde für die erste Versuchsreihe (133 Versuche) angenommen, dass der Replikationsfehler zu vernachlässigen ist. Diese Ausgangssituation hat die Anwendung von sogenannten raumfüllenden Versuchsplänen (Fang et al. 2006) motiviert anstatt der Üblichen, beispielsweise D-optimalen Versuchspläne, die sehr oft Wiederholungsversuche verlangen. Raumfüllende Versuchspläne dagegen haben das Ziel, Versuche so zu gestalten, dass ein möglichst großer Teil des Versuchsraums abgetastet wird.

Raumfüllende Versuchspläne werden üblicherweise so konstruiert, dass sie bezüglich einer vorgegebenen Metrik optimal sind. Diese vordefinierten Maßzahlen sind ein Indikator dafür, wie gut die Punkte in einem beliebigen Versuchsplan im Raum gestreut sind. Die für dieses Projekt verwendeten Metriken sind die „Wrap-Around Discrepancy“ (Fang et al. 2006), „Mesh Ratio“ (Gunzburger & Burkardt 2004) und „Mindist“ (Gunzburger & Burkardt 2004; Jonshon et al. 1990).

Da es rechnerisch sehr aufwändig ist, eine Optimierungsprozedur durchzuführen, um den optimalen Versuchsplan bezüglich der aufgezählten Metriken zu finden, wurde hier eine „diskretisierte“ Optimierung angewendet. Das heißt, es wurden nach dem Zufallsprinzip bei jeder der 4 Möglichkeiten die Komponenten zu mischen, jeweils 10 Millionen Kandidatenversuchspläne erzeugt. Von diesen Kandidaten wurden diejenigen ausgewählt, die die besten Werte bezüglich der ausgewählten Metriken hatten.

Jeder der statistischen Versuchspläne lässt sich als Pyramide darstellen, auf deren 4 Eckpunkten jeweils eine Komponente „sitzt“. Der Massenanteil dieser „Eck-Komponente“ an der Mischung beträgt 100%. Die Abbildungen 4.4.6 und 4.4.7 zeigen ein Beispiel für so einen Versuchsplan. Die blauen Punkte stellen durchgeführte Versuche dar. Die räumliche Position von jedem Punkt enthält die Information über die Komponentenverhältnisse des betrachteten Versuchs. Blau markiert sind die Bereiche, die nicht zulässig sind. In Abbildung 4.4.6 ist der Bereich in dem $CL_{90} \geq 80\%$ ist mit blau markiert und in Abbildung 4.4.7 der Bereich, in dem Zement die vorgegebene 50% Grenze überschreitet.

Jeder Versuchsplan umfasst 4 Komponenten, die miteinander in bestimmten Verhältnissen gemischt werden. Die Versuchspläne beinhalteten zunächst 8 Mischungen von denen die 28-Tage Druckfestigkeiten bestimmt wurden. Insgesamt gab es 16 Versuchspläne mit jeweils 8 Versuchen und somit 128 Gesamtversuche. Die 16 Versuchspläne wurden in 4 Kombinationen zusammengefasst (Abb.4.4.2).

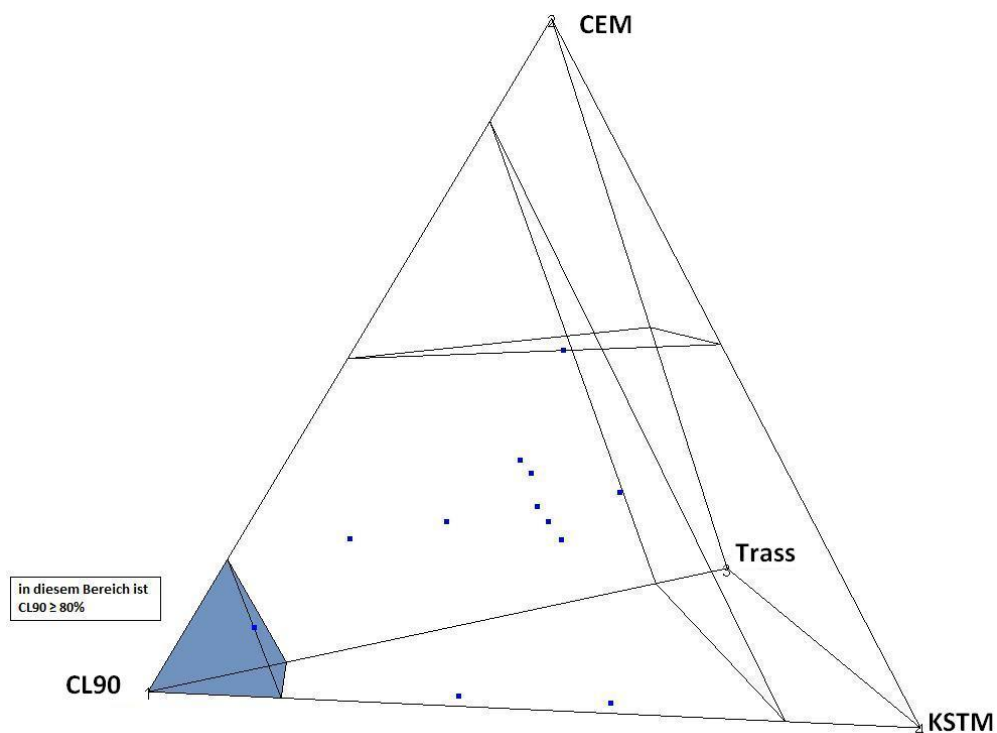


Abb. 4.4.6: Räumliche Darstellung des Versuchsplans: CL90/CEM/Trass/KSTM

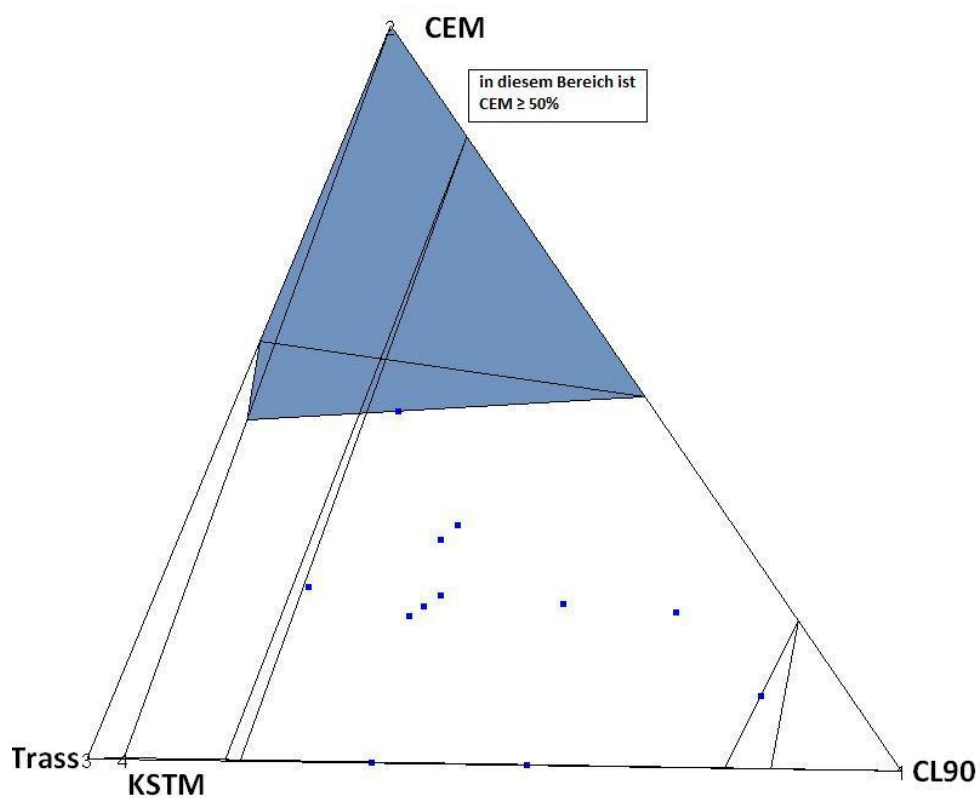


Abb. 4.4.7: Räumliche Darstellung des Versuchsplans: CL90/CEM/Trass/KSTM

5 Versuchsergebnisse und Diskussion

5.1 Charakterisierung der Rohstoffe

5.1.1 Kalkhydrat

Tabelle 5.1.1 zeigt die Charakterisierung der verwendeten Kalkhydrate. Alle Kalkhydrate liegen mit ihren Werten für den SO_3 -Gehalt (wasser- und kristallwasserfrei), die Korngröße und das freie Wasser deutlich unter den Grenzwerten der EN 459-1 für Formulierte Kalke, so dass bei Mischung mit weiteren FL-Komponenten diese Anforderungen ebenfalls eingehalten werden.

Im Gegensatz zu den CL90-Kalkhydraten besitzen die CL80-Kalkhydrate deutliche Mengen an den hydraulisch wirksamen Phasen Belit und Tricalciumaluminat (Röntgendiffraktogramme im Anhang), was sich in einer größeren Druckfestigkeit der aus ihnen hergestellten FL zeigt (Tabellen: Prüfungen an Formulierten Kalken, Anhang). Die Probe CL80 weist gegenüber der Probe CL80_vgl einen doppelt so hohen Gehalt an SiO_2 auf, was sich in einem deutlich größeren Gehalt an Belit (C_2S) zeigt (Abb. 5.1.1). Aus diesem Grund sind die Druckfestigkeiten ein und derselben FL-Zusammensetzung und bei ein- und demselben W/B, bei Verwendung der Probe CL80 größer als bei Verwendung der Probe CL80_vgl (Tabellen: Prüfungen an Formulierten Kalken, Anhang). Die Probe CL80_vgl enthält im Gegensatz zur Probe CL80 noch eine deutliche Menge an Calcit, vermutlich aufgrund einer nicht vollständigen Calcinierung beim Brennvorgang.

Die Schüttdichte des Kalkhydrats CL90 ist mit $0,51 \text{ kg/dm}^3$ sehr hoch. Abbildung 5.1.2, die Korngrößenverteilung der Probe, zeigt den Grund hierfür. Die Dichteverteilung weist zwei Maxima auf. Das Kalkhydrat setzt sich annähernd aus Partikeln zweierlei Korngrößen zusammen, so dass die Partikel mit der kleineren Korngröße die Lücken zwischen den Partikeln mit der größeren Korngröße ausfüllen. Dies ist bei der Probe CL80 nicht der Fall (Abb. 5.1.3). Hier gibt es ein Maximum in der Dichteverteilung. Auch die gegenüber der Probe CL80 deutlich größere spezifische Oberfläche von CL90 spiegelt diesen Sachverhalt und die damit einhergehende höhere Schüttdichte der Probe CL90 wieder.

Der Siebrückstand $> 0,09 \text{ mm}$ der Proben CL90 und CL80 kommt dadurch zustande, dass sich die $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Agglomerate bei der Luftstrahlsiebung nicht vollständig gelöst haben. Wie aus den Korngrößenverteilungen zu erkennen ist, liegt die Teilchengröße beider Proben vollständig weit unterhalb $0,09 \text{ mm}$. Bei der Laserdiffraktometrie wird die Probe durch den angewendeten Ultraschall vollständig dispergiert.

Parameter / Probenbezeichnung	CL90	CL80	CL90_vgl	CL80_vgl
Glühverlust = Kristallwasser + CO ₂ + freies Wasser [Masse%]	24,7	20,1	25,7	24,0
CO ₂ [Masse%]	0,60	1,10	1,48	4,82
Freies Wasser [Masse%]	0,40	0,74	0,75	0,44
Kristallwasser = GV – CO ₂ – freies Wasser [Masse%]	23,7	18,3	23,5	18,7
Available lime (Ca(OH) ₂) [Masse%]	97,0	69,8	93,5	75,5
CaO (Produkt wasser- u. kristallwasserfrei nach EN 459-2)	98,6	83,0	96,5	84,0
MgO (Produkt wasser- u. kristallwasserfrei nach EN 459-2)	0,7	2,0	0,4	2,7
CO ₂ (Produkt wasser- u. kristallwasserfrei nach EN 459-2)	0,8	1,4	2,0	6,0
SO ₃ (Produkt wasser- u. kristallwasserfrei nach EN 459-2)	0	0,4	0,1	0,2
CaO [Masse%]	74,8	67,2	73,1	68,0
MgO [Masse%]	0,52	1,60	0,34	2,19
SiO ₂ [Masse%]	< 0,01	6,86	0,18	3,40
Fe ₂ O ₃ [Masse%]	0,02	1,06	0,10	0,29
Al ₂ O ₃ [Masse%]	0,01	2,26	0,13	0,81
Na ₂ O [Masse%]	0,01	0,08	0,04	0,03
K ₂ O [Masse%]	< 0,01	0,60	0,03	0,33
BaO [Masse%]	< 0,01	0,01	nicht gemessen	nicht gemessen
SrO [Masse%]	0,02	0,18	0,01	0,02
MnO ₂ [Masse%]	0,02	0,03	0,02	nicht gemessen
SO ₃ [Masse%]	0,01	0,36	0,10	0,19
0,09 mm Siebrückstand [Masse%]	3,8	3,0	0,9	1,9
0,2 mm Siebrückstand [Masse%]	0	0,2	0,1	0
Raumbeständigkeit [mm]	0	0,1	0	0
Spezifische Oberfläche [m ² /g]	17,6	9,3	nicht gemessen	nicht gemessen
Röntgenphasenanalyse	Portlandit	Portlandit, Larnit (Belit), Tricalciumaluminat, Quarz	Portlandit, Calcit	Portlandit, Calcit, Larnit (Belit), Tricalciumaluminat, Quarz
	d ₁₀ = 1,95	d ₁₀ = 1,66	nicht gemessen	nicht gemessen
Korngrößenverteilung [µm]	d ₅₀ = 6,97	d ₅₀ = 5,92	nicht gemessen	nicht gemessen
	d ₉₀ = 20,24	d ₉₀ = 15,75	nicht gemessen	nicht gemessen
Schüttdichte [kg/dm ³]	0,51	0,46	0,47	0,48

Tab. 5.1.1: Vergleich der verwendeten Kalkhydrate

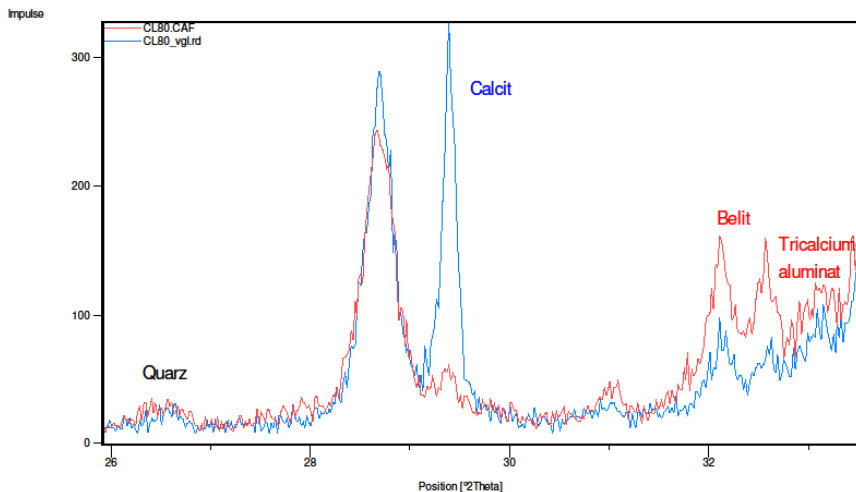
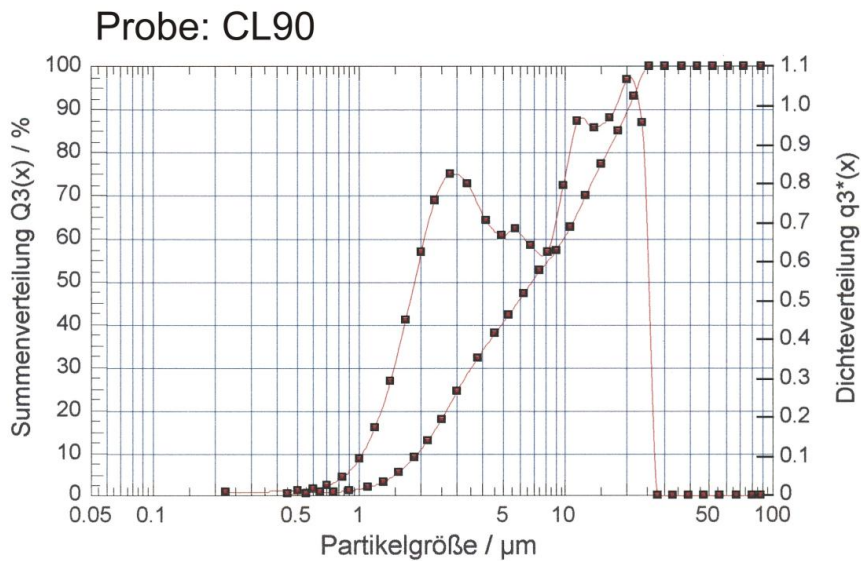


Abb. 5.1.1: Mineralphasenvergleich der Kalkhydrate CL80 und CL80_vgl

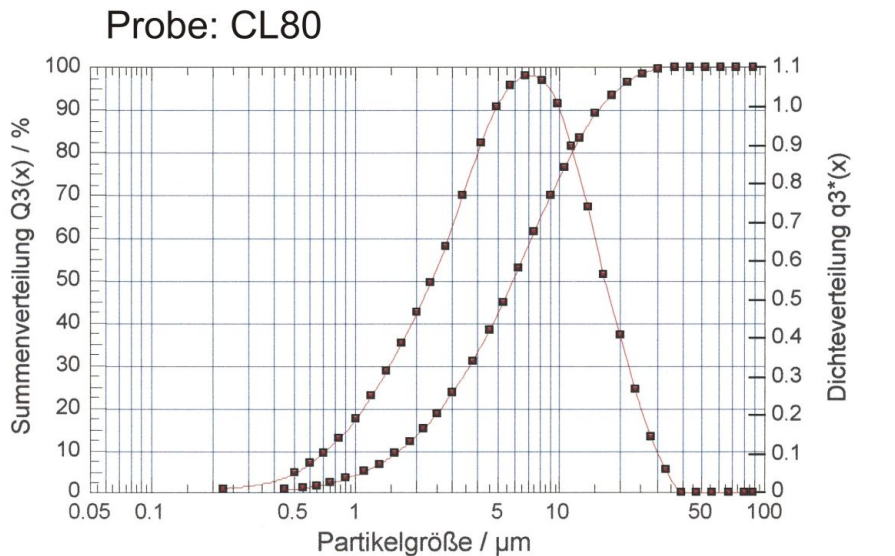
Flüssigkeit Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer 120,00 s	Meßbereich	R2: 0.25/0.45...87.5µm
-Pause 90,00 s	Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl 100,00 %	Zykluszeit	1000ms
	Referenzmessung	00:20:29, 0,00 %
	Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)



Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
0,45	0,26	1,85	8,68	7,50	52,13	30,50	100,00
0,55	0,37	2,15	12,73	9,00	57,06	36,50	100,00
0,65	0,47	2,50	17,67	10,50	62,37	43,50	100,00
0,75	0,61	3,00	24,18	12,50	69,63	51,50	100,00
0,90	0,96	3,75	31,91	15,00	77,07	61,50	100,00
1,10	1,76	4,50	37,47	18,00	84,73	73,50	100,00
1,30	3,02	5,25	41,92	21,50	92,95	87,50	100,00
1,55	5,23	6,25	47,07	25,50	100,00		
x10 =	1,95	x50 =	6,97	x90 =	20,24		
Q(1) =	1,36%	Q(2) =	10,71%	Q(90) =	100,00%		
				copt =	0,00 %		

Abb. 5.1.2: Korngrößenverteilung des Kalkhydrats CL90

Flüssigkeit	Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer	120,00 s	Meßbereich	R2: 0.25/0.45...87.5µm
-Pause	90,00 s	Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl	100,00 %	Zykluszeit	1000ms
		Referenzmessung	00:04:32, 0,00 %
		Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)



Volumenverteilung							
x0/µm		Q3/%		x0/µm		Q3/%	
0,45	0,45	1,85	11,85	7,50	61,14	30,50	99,55
0,55	0,86	2,15	14,87	9,00	69,58	36,50	100,00
0,65	1,39	2,50	18,41	10,50	76,31	43,50	100,00
0,75	2,02	3,00	23,44	12,50	83,06	51,50	100,00
0,90	3,09	3,75	30,87	15,00	88,89	61,50	100,00
1,10	4,72	4,50	38,01	18,00	93,36	73,50	100,00
1,30	6,51	5,25	44,67	21,50	96,48	87,50	100,00
1,55	8,89	6,25	52,62	25,50	98,43		

x10 =	1,66	x50 =	5,92	x90 =	15,75
Q(1) =	3,91%	Q(2) =	13,36%	Q(90) =	100,00%
				copt =	15,19 %

Abb. 5.1.3: Korngrößenverteilung des Kalkhydrats CL80

5.1.2 Zement

Bei den verwendeten Zementen handelt es sich um Portlandzementklinker (CEM I 42,5 R-NA; CEM I 42,5 R-HS/NA). Beide Zemente besitzen laut Hersteller einen niedrigen Alkaligehalt, der in der Größenordnung des Alkaligehalts der Probe CL80 liegt. CEM_HS besitzt zusätzlich einen hohen Sulfatwiderstand. Statt der Phase Tricalciumaluminat (C₃A) findet man im CEM_HS die Phase Tetracalciumaluminatferrit (C₄AF). Durch den Einsatz von HS-Portlandzementen wird das Reaktionspotential an neu gebildeten dehnungsfördernden Phasen aufgrund des geringen C₃A-Gehalts eingeschränkt. Es bildet sich nur in geringem Umfang Ettringit, der zudem aufgrund eines höheren Eisengehalts in der Ettringitstruktur und einer damit verbundenen anderen Morphologie eine geringere Treibwirkung hervorruft (VDZ 2002).

Parameter / Probenbezeichnung	CEM_NA	CEM_HS
Glühverlust = Kristallwasser + CO ₂ + freies Wasser [Masse%]	1,92	2,42
CO ₂ [Masse%]	1,47	1,17
Freies Wasser [Masse%]	0,12	0,60
Kristallwasser = GV – CO ₂ – freies Wasser [Masse%]	0,33	0,65
SO ₃ (Produkt wasser- u. kristallwasserfrei nach EN 459-2)	3,46	2,11
CaO [Masse%]	65,6	63,3
MgO [Masse%]	0,92	0,80
SiO ₂ [Masse%]	22,60	19,90
Fe ₂ O ₃ [Masse%]	1,39	6,77
Al ₂ O ₃ [Masse%]	3,50	3,99
Na ₂ O [Masse%]	0,21	0,15
K ₂ O [Masse%]	0,48	0,68
BaO [Masse%]	0,03	0,03
SrO [Masse%]	0,16	0,19
MnO ₂ [Masse%]	0,04	0,12
SO ₃ [Masse%]	3,34	2,02
0,09 mm Siebrückstand [Masse%]	1,2	0
0,2 mm Siebrückstand [Masse%]	0	0
Rohdichte [Mg/m ³]	3,11	3,18
Mahlfeinheit [cm ² /g]	3430	4380
Röntgenphasenanalyse	C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A, C ₄ AF, Anhydrit	C ₃ S, C ₂ S, C ₄ AF, Gips
C ₃ S [Masse%], nach (Bogue 1929, Stark & Wicht 2000)	69,7	69,9
C ₂ S [Masse%], nach (Bogue 1929, Stark & Wicht 2000)	12,2	4,3
C ₃ A [Masse%], nach (Bogue 1929, Stark & Wicht 2000)	6,9	0
C ₄ AF [Masse%], nach (Bogue 1929, Stark & Wicht 2000)	4,2	20,6
	d ₁₀ = 2,21	d ₁₀ = 1,54
Korngrößenverteilung [µm]	d ₅₀ = 15,37	d ₅₀ = 10,46
	d ₉₀ = 48,85	d ₉₀ = 33,14
Schüttdichte [kg/dm ³]	1,23	1,20

Tab. 5.1.4: Vergleich der verwendeten Portlandzemente

Der Gehalt an Sulfat, ausgedrückt als SO_3 , im wasser- und kristallwasserfreien Portlandzement CEM_HS beträgt 3,46 %. Nach EN 459-1 muss der SO_3 -Gehalt im Formulierten Kalk ≤ 2 % sein, was mit einem Gehalt von $< 57,8$ % CEM_NA im FL erreicht wäre.

Aufgrund desselben Gehalts an C_3S -Phase (70 Masse%), welche für eine hohe 28T-Druckfestigkeit verantwortlich ist, unterscheiden sich die beiden Zement-Ausgangspuren bezüglich der statistischen Vorhersagemodelle nicht.

Beide Zemente liegen mit ihren Werten für die Korngröße und das freie Wasser deutlich unter den Grenzwerten der EN 459-1 für Formulierte Kalke, so dass bei Mischung mit weiteren FL-Komponenten diese Anforderungen ebenfalls eingehalten werden.

5.1.3 Hüttensand

Tabelle 5.1.5 zeigt die Charakterisierung der verwendeten Hüttensande. Alle Hüttensande liegen mit ihren Werten für die Korngröße und das freie Wasser deutlich unter den Grenzwerten der EN 459-1 für Formulierte Kalke, so dass bei Mischung mit weiteren FL-Komponenten diese Anforderungen ebenfalls eingehalten werden.

Um zu prüfen in wie weit sich die Mahlfeinheit von ein und demselben Hüttensand bemerkbar macht, wurden Formulierte Kalke, die einmal die Probe HS_f und ein anderes mal die Probe HS_vgl enthielten hinsichtlich der 28T-Druckfestigkeit, der 56T-Druckfestigkeit und der Verarbeitbarkeit nach EN 459 geprüft (Tabellen: Prüfungen an Formulierten Kalken, Anhang). Hierbei zeigten sich keinerlei Unterschiede aufgrund der höheren Mahlfeinheit der Probe HS_vgl. Weiterhin zeigten sich trotz des deutlich höheren Blaine-Wertes der Probe HS_vgl keine Unterschiede bezüglich der Korngrößenverteilung mittel Laserdiffraktometrie (Abbildungen: Korngrößenverteilung, Anhang).

Anhand der Laserdiffraktogramme im Anhang erkennt man, dass die Korngrößenverteilung der Probe HS_g gegenüber den beiden anderen Hüttensandmehlen zu deutlich höheren Korngrößen hin verschoben ist. Außerdem enthält HS_g im Gegensatz zu den beiden anderen Hüttensanden außer einer Glasmatrix noch die Minerale Gips und Anhydrit (Abbildungen: Röntgendiffraktogramme, Anhang), was sich in einem höheren Sulfatgehalt und in einem höheren Glühverlust äußert. Der Gehalt an Sulfat, ausgedrückt als SO_3 im wasser- und kristallwasserfreien Hüttensandmehl HS_g beträgt 2,35 %. Nach EN 459-1 muss der SO_3 -Gehalt im Formulierten Kalk ≤ 2 % sein, was mit einem Gehalt von $< 85,1$ % HS_g im FL erreicht ist.

Des Weiteren besitzt HS_g eine deutlich höhere Basizität als die beiden anderen Hüttensandmehle.

Parameter / Probenbezeichnung	HS_g	HS_f	HS_vgl
Glühverlust = Kristallwasser + CO ₂ + freies Wasser [Masse%]	1,40	0,40	0,38
CO ₂ [Masse%]	0,38	0,24	0,23
Freies Wasser [Masse%]	0,42	0,13	0,10
Kristallwasser = GV – CO ₂ – freies Wasser [Masse%]	0,60	0,03	0,05
SO ₃ (Produkt wasser- u. kristallwasserfrei nach EN 459-2)	2,37	0,45	0,63
CaO [Masse%]	43,70	40,60	40,50
MgO [Masse%]	5,17	8,19	8,30
SiO ₂ [Masse%]	34,0	36,50	36,10
Fe ₂ O ₃ [Masse%]	0,42	0,48	0,44
Al ₂ O ₃ [Masse%]	10,80	10,50	10,50
Na ₂ O [Masse%]	0,26	0,27	0,30
K ₂ O [Masse%]	0,45	0,51	0,50
BaO [Masse%]	0,08	0,09	0,09
SrO [Masse%]	0,06	0,06	0,06
MnO ₂ [Masse%]	0,34	0,40	0,35
TiO ₂ [Masse%]	1,05	0,85	1,00
SO ₃ [Masse%]	2,35	0,45	0,63
0,09 mm Siebrückstand [Masse%]	0	0	0
0,2 mm Siebrückstand [Masse%]	0	0	0
Rohdichte [Mg/m ³]	2,90	2,90	2,90
Mahlfeinheit [cm ² /g]	3530	4100	5310
Röntgenphasenanalyse	Glas, Gips, Anhydrit	Glas	nicht gemessen
	d ₁₀ = 1,86	d ₁₀ = 1,63	d ₁₀ = 1,67
Korngrößenverteilung [µm]	d ₅₀ = 12,96	d ₅₀ = 10,10	d ₅₀ = 10,30
	d ₉₀ = 34,95	d ₉₀ = 28,79	d ₉₀ = 28,16
Basizität (C+M)/S	1,44	1,34	1,35
Schüttdichte [kg/dm ³]	1,07	1,01	0,99

Tab. 5.1.5 Vergleich der verwendeten Hüttensandmehle

5.1.4 Kalksteinmehl

Die beiden Kalksteinmehle besitzen die Qualität LL nach EN 197-1. Das heißt, der Gehalt an organischen Bestandteilen (TOC) beträgt $\leq 0,2$ Masse%.

Unterschiede bestehen hinsichtlich des MgO-Gehalts, der sich in der Probe KSTM_vgl durch die Anwesenheit der Mineralphase Dolomit zeigt. Der höhere SiO₂-Gehalt in KSTM_vgl ist auf die Anwesenheit von Quarz zurückzuführen. Die Mahlfineinheit nach Blaine unterscheidet sich in den beiden Proben um 1100 [cm²/g].

Bei den Prüfungen nach EN 459 (Verarbeitbarkeit und 28-Tage Druckfestigkeit) zeigten Formulierte Kalke, die sowohl mit der Probe KSTM als auch zum Vergleich mit der Probe KSTM_vgl hergestellt wurden, ein identisches Verhalten (Tabellen: Prüfungen an Formulierten Kalken, Anhang). Der Unterschied in der Mahlfineinheit scheint sich nicht bemerkbar zu machen. Deshalb wurde zur Modellbildung lediglich die Probe KSTM herangezogen.

5.1.5 Trass

Die beiden verwendeten Trasse unterscheiden sich hinsichtlich ihres Mineralbestands. Während die Probe Trass_Bay deutliche Mengen an Calcit enthält (Abbildungen: Röntgendiffraktogramme, Anhang), was sich bei der chemischen Analyse durch einen im Vergleich zu Trass_Eif höheren Gehalt an CaO und CO₂ zeigt, enthält Trass_Eif die Minerale Leucit, Analcim und Chabasit.

Trass_Bay enthält im Gegensatz zu Trass_Eif das quellfähige Tonmineral Montmorillonit, welches nach (Liebig & Althaus 1999) für die in diesem Forschungsvorhaben gefundenen, niedrigeren Druckfestigkeiten von Trass_Bay enthaltenden FL-Mischungen gegenüber Trass_Eif enthaltenden FL verantwortlich ist. Der in diesem Forschungsvorhaben gefundene hohe Wasserbedarf von FL-Mischungen die Trass_Bay enthalten (Kap. 5.3.5), lässt sich, nach (Liebig & Althaus 1999), auf die hohe spezifische Oberfläche des Minerals Montmorillonit zurück führen.

Parameter / Probenbezeichnung	KSTM	KSTM_vgl
Glühverlust = Kristallwasser + CO ₂ + freies Wasser [Masse%]	43,9	43,7
CO ₂ [Masse%]	44,0	43,8
Freies Wasser [Masse%]	0,04	nicht gemessen
Kristallwasser = GV – CO ₂ – freies Wasser [Masse%]	0	0
Available lime (Ca(OH) ₂) [Masse%]	0,13	nicht gemessen
CaCO ₃ -Gehalt = CO ₂ -Gehalt * stöchiometr. Faktor 2,2742) [Masse%]	100,06	99,61
CaO [Masse%]	55,7	54,3
MgO [Masse%]	0,43	0,80
SiO ₂ [Masse%]	0,01	0,43
Fe ₂ O ₃ [Masse%]	0,05	0,13
Al ₂ O ₃ [Masse%]	0,06	0,19
Na ₂ O [Masse%]	0,01	0,01
K ₂ O [Masse%]	0,04	0,06
BaO [Masse%]	< 0,01	< 0,01
SrO [Masse%]	0,02	0,02
MnO ₂ [Masse%]	0,02	0,03
SO ₃ [Masse%]	0,01	0,08
0,09 mm Siebrückstand [Masse%]	7,32	8,97
0,2 mm Siebrückstand [Masse%]	0	0
Rohdichte [Mg/m ³]	2,71	2,72
Mahlfeinheit [cm ² /g]	2760	3870
Röntgenphasenanalyse	Calcit	Calcit, Dolomit, Quarz
	d ₁₀ = 3,49	d ₁₀ = 1,95
Korngrößenverteilung [µm]	d ₅₀ = 18,28	d ₅₀ = 14,45
	d ₉₀ = 78,36	d ₉₀ = 87,44
Schüttdichte [kg/dm ³]	1,15	1,17

Tab. 5.1.6: Vergleich der verwendeten Kalksteinmehle

Parameter / Probenbezeichnung	Trass_Bay	Trass_Eif
Glühverlust = Kristallwasser + CO ₂ + freies Wasser [Masse%]	12,70	6,67
CO ₂ [Masse%]	7,41	0,75
Kristallwasser = GV – CO ₂ [Masse%]	5,29	5,92
CaO [Masse%]	11,70	4,43
MgO [Masse%]	0,86	2,00
SiO ₂ [Masse%]	53,3	54,4
Fe ₂ O ₃ [Masse%]	4,18	5,62
Al ₂ O ₃ [Masse%]	12,1	16,0
Na ₂ O [Masse%]	2,01	2,93
Na ₂ O (wasserlöslich) [Masse%]	0,01	0,02
K ₂ O [Masse%]	2,26	4,62
K ₂ O (wasserlöslich) [Masse%]	0,12	0,02
BaO [Masse%]	0,10	0,09
SrO [Masse%]	0,03	0,09
MnO ₂ [Masse%]	0,09	0,25
SO ₃ [Masse%]	0,15	0,14
TiO ₂ [Masse%]	0,73	0,72
0,09 mm Siebrückstand [Masse%]	4,37	9,29
0,2 mm Siebrückstand [Masse%]	0	0
Rohdichte [Mg/m ³]	2,52	2,57
Mahlfeinheit [cm ² /g]	5080	5840
Röntgenphasenanalyse	Calcit, Quarz, Cristobalit, Montmorillonit, Anorthoklas	Na- Quarz, Sanidin, Leucit, Chlorit, Analcim, Illit, Chabasit
	d ₁₀ = 1,72	d ₁₀ = 1,72
Korngrößenverteilung [µm]	d ₅₀ = 21,88	d ₅₀ = 15,43
	d ₉₀ = 96,48	d ₉₀ = 70,97
Schüttdichte [kg/dm ³]	0,97	0,96

Tab. 5.1.7: Vergleich der verwendeten Trassmehle

5.2 Reaktivität

Mittels kalorimetrischer Messungen wurden sowohl der Wärmeflussverlauf als auch der Gesamtenergieumsatz der reaktiven Bindemittel nach dem Anmachen mit Wasser aufgezeichnet. Anhand Abbildung 5.2.1 ist erkennbar, dass die beiden Zemente einen deutlich größeren Gesamtenergieumsatz aufweisen als die Kalkhydrate. Die erhöhten Anfangswerte sind auf eine Beeinflussung durch das Einbringen der Probe in die Messapparatur zurückzuführen, da die Temperatur im Kalorimeterblock zu diesem Zeitpunkt geringer war als die Raumtemperatur.

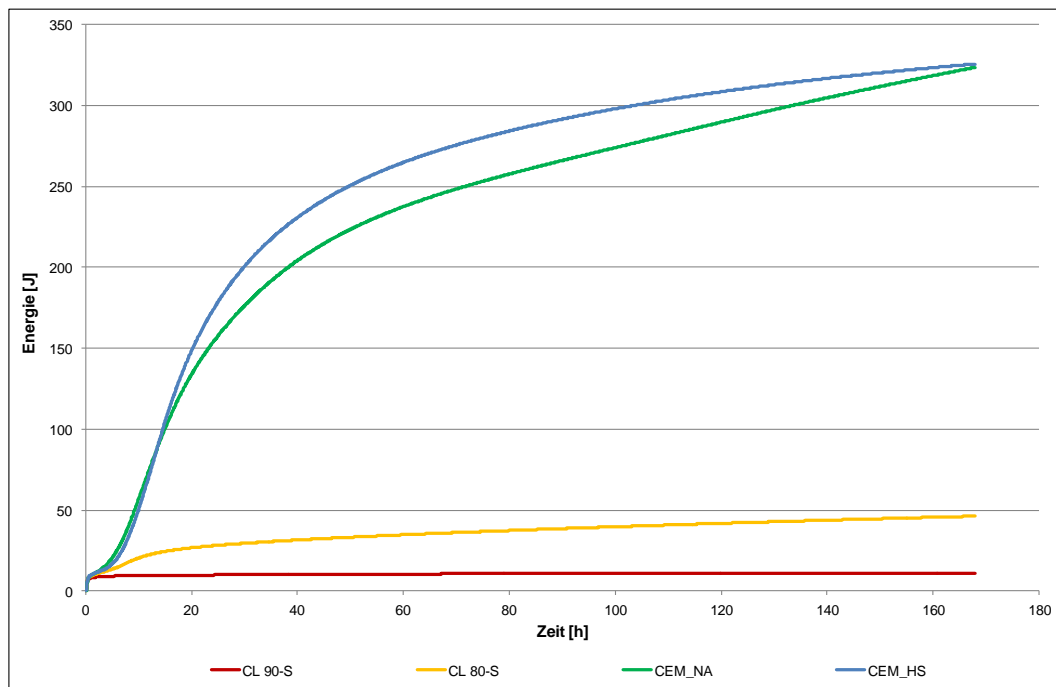


Abb. 5.2.1: Gesamtenergieumsatz der verwendeten Zemente und Kalkhydrate

Große Unterschiede sind zwischen den beiden Zementen nicht zu verzeichnen. Der Zement CEM_HS setzt innerhalb der ersten Stunden mehr Energie frei, während der Zement CEM_NA im weiteren Verlauf noch Energie umsetzt. Die langsamere, kontinuierlichere Energieabgabe des CEM_NA ist auf den höheren Anteil C_2S zurückzuführen (Kap. 5.1.2). Die graphische Darstellung in Abbildung 5.2.2 verdeutlicht den unterschiedlichen Wärmefluss der verwendeten Zemente.

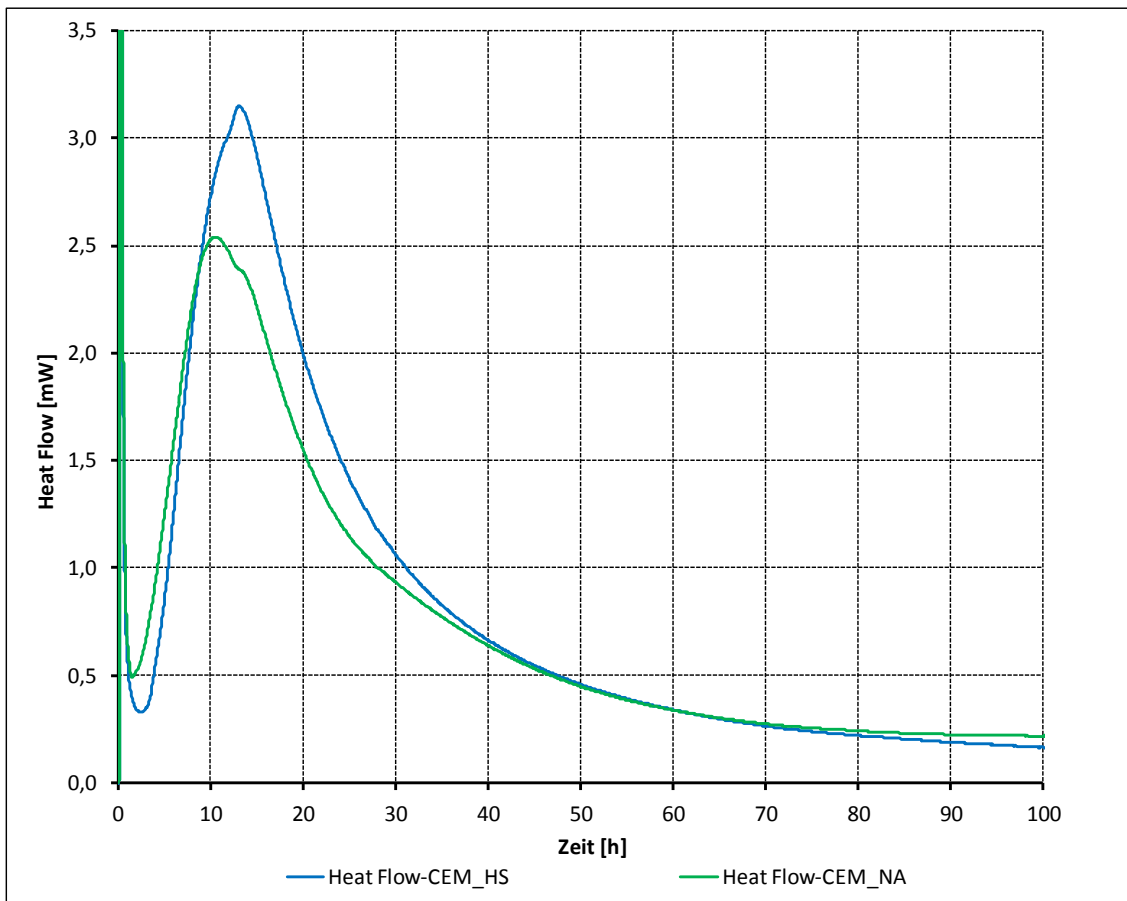


Abb. 5.2.2: Wärmeflussverlauf der verwendeten Zemente

Der Wärmeflussverlauf der verwendeten Kalkhydrate (Abb. 5.2.3) zeigt für die Probe CL90 keine exotherme Reaktion. Für das Kalkhydrat CL80 ist eine Reaktion zu verzeichnen, die in Vergleich zu den Zementen deutlich geringer ausfällt. Das Maximum des Wärmeflusses ist hier nach etwa 7 h gemessen. Diese Wärmeentwicklung ist auf den Hydratationsprozess, bedingt durch die Anteile hydraulisch wirksamer Phasen im Material (Kap. 5.1.1), zurückzuführen.

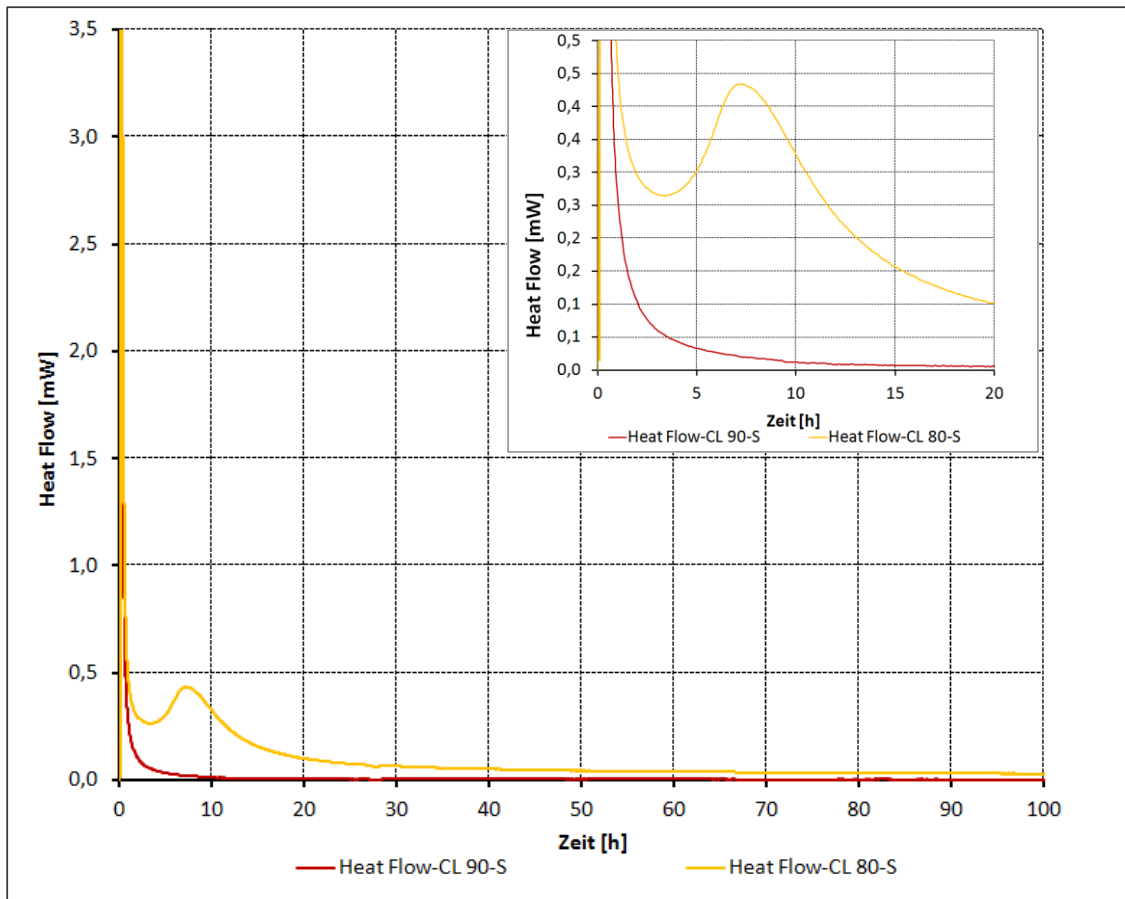


Abb. 5.2.3: Wärmeflussverlauf der verwendeten Kalkhydrate

Abbildung 5.2.4 stellt den Gesamtenergieumsatz bei Zugabe von Wasser für Hüttensand und die beiden Trasse sowohl ohne als auch mit Zugabe von Kalkhydrat dar. Auch hier sind die erhöhten Anfangswerte auf eine Beeinflussung durch das Einbringen der Probe in die Messapparatur zurückzuführen.

Während für den Hüttensand auch ohne Zugabe von Kalkhydrat eine exotherme Reaktion gemessen wurde (Kap. 2.2.7), verhalten sich die Trasse inert. Sie reagieren erst bei der Zugabe des Anregers (Kap. 2.2.4). Die Kurve der Probe Trass_Bay + CL 90 steigt zwischen 5 und 10 Stunden stärker an und flacht dafür im weiteren Verlauf mehr ab als die Kurve der Probe Trass_Eif + CL 90, für die eine kontinuierliche Steigung erkennbar ist. Für den Hüttensand ist mit Kalkzugabe ein gesteigerter Energieumsatz zu verzeichnen.

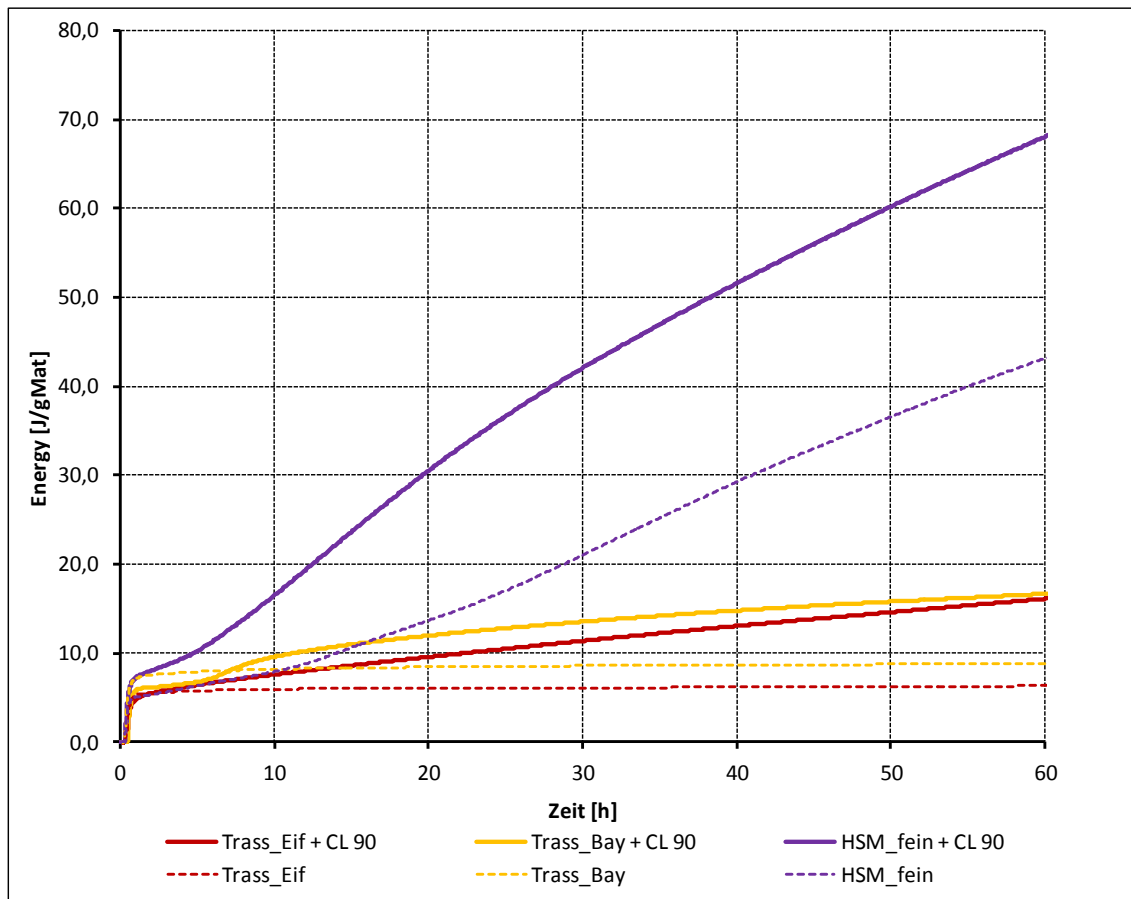


Abb. 5.2.4: Gesamtenergieumsatz von Hüttensand und Trass mit und ohne Kalkhydratzugabe

Bei Betrachtung der Reaktivität einer ausgewählten FL-Mischungsserie, deren Zusammensetzung in Tabelle. 5.2.1 zusammengestellt ist, sind die mischungsabhängigen Energieentwicklungen erkennbar (Abb. 5.2.5). Mit zunehmendem Zementgehalt steigen die Kurven innerhalb der ersten Stunden deutlich an. Durch die einsetzende Hydratationsreaktion wird Energie frei. Der Hüttensandanteil bewirkt eine geringere, jedoch kontinuierlichere Steigung der Kurven, was durch die langsamer ablaufende Reaktion hervorgerufen wird. Bei gleichem Zementgehalt (Proben H 25 und H 31 sowie H 26 und H 28) ist eine größere Steigung für die Kurven von Proben mit dem höheren Hüttensandanteil erkennbar.

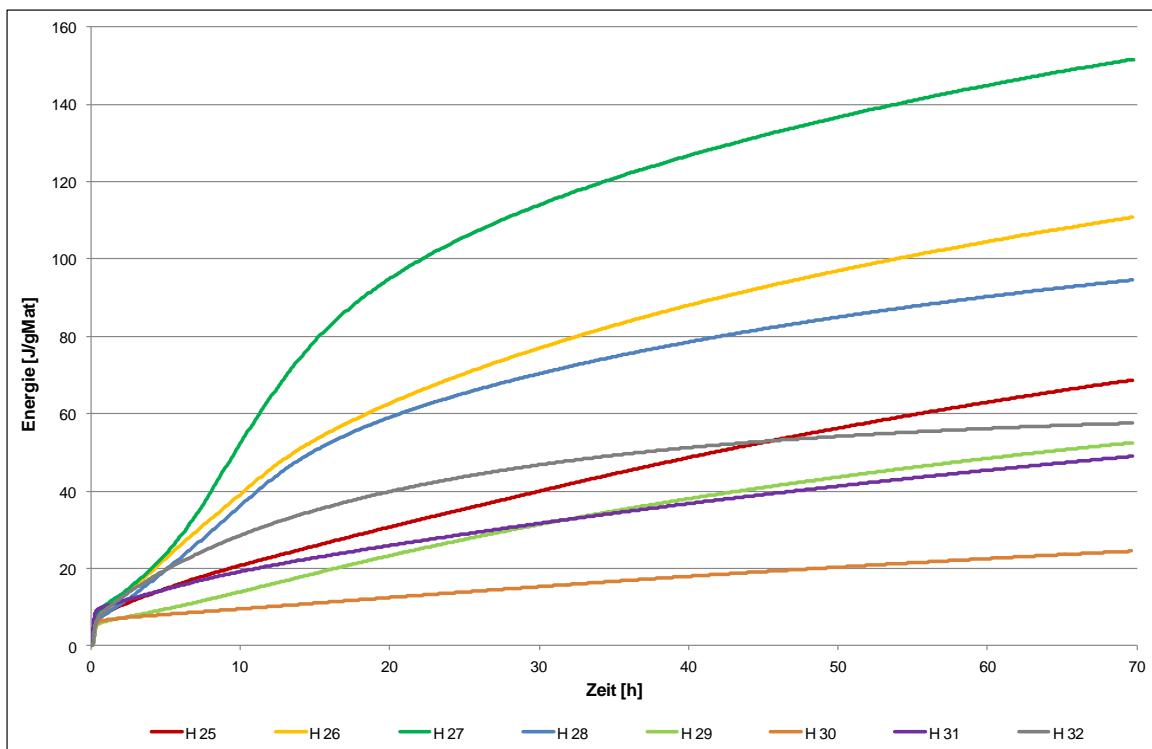


Abb. 5.2.5: Gesamtenergieumsatz der der FL-Mischungen H 25 bis H 32

Probe	CL 90 [%]	CEM_HS [%]	HS_fein [%]	KSTM [%]	CEM+HS [%]	Energie [J] t = 70 h	DF 28 d [N/mm ²]
H 25	60	5	30	5	35	19,08	12,51
H 26	50	25	20	5	45	30,78	17,56
H 27	25	45	5	25	50	42,12	21,44
H 28	30	25	5	40	30	26,26	8,08
H 29	20	0	40	40	40	14,59	7,35
H 30	15	0	10	75	10	6,80	1,56
H 31	20	5	20	55	25	13,61	4,88
H 32	80	15	0	5	15	15,99	1,9

Tab. 5.2.1: Mischungszusammensetzung H 25 bis H 32 mit zugehörigen Druckfestigkeiten nach 28 d

Abbildung 5.2.6 verdeutlicht den Zusammenhang von Energieumsatz und Festigkeitsentwicklung. Bei Werten rechts der Trendlinie handelt es sich um Mischungen mit höherem Zement- als Hüttensand-Gehalt, die einen Großteil der Energie bereits nach 70 Stunden umgesetzt haben. Proben links der Trendlinie weisen höhere Hüttensandanteile auf. Deren Reaktion verläuft langsamer, so dass ein größerer Anteil Energie noch nach 70 Stunden umgesetzt wird und zur erhöhten Nacherhärtung der Proben führt.

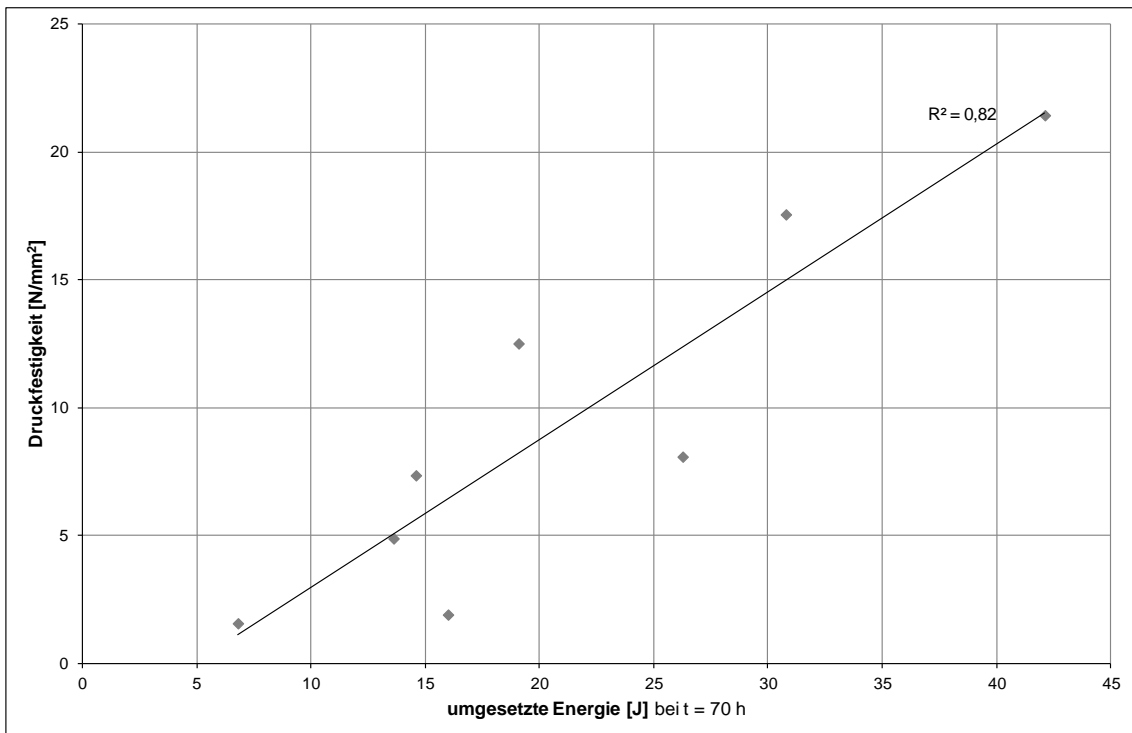


Abb. 5.2.6: Druckfestigkeit in Abhängigkeit der umgesetzten Energie

5.3 Charakterisierung der Formulierten Kalke

5.3.1 Vergleich von Mischungen mit CL80 gegenüber Mischungen mit CL90

Die Wirksamkeit der langsam erhärtenden hydraulischen Phase C₂S in der Ausgangsprobe CL80 wird anhand von Tabelle 5.3.1 deutlich. Die Druckfestigkeiten der FL-Mischungen die CL80 enthalten, steigen bei den Druckfestigkeitsprüfungen von 7- auf 28 Tage noch stark an. In den FL-Mischungen, die mit der Probe CL90 angesetzt wurden, ist die Druckfestigkeitszunahme von 7- auf 28 Tage deutlich geringer. In allen dargestellten Mischungen wurde derselbe Zement verwendet. Das W/B-Verhältnis betrug 0,6.

FL-Zusammensetzung: Kalkhydrat / CEM_NA [Masse%]	CL80		CL90	
	7T-DF [MPa]	28T-DF [MPa]	7T-DF [MPa]	28T-DF [MPa]
80 / 20	5,2	10,4	1,7	2,3
70 / 30	8,6	14,4	3,9	4,9

Tab. 5.3.1: Weitere Zunahme der Druckfestigkeit von bei Lagerung von 28 gegenüber 7 Tagen (W/B = 0,6)

5.3.2 Vergleich von Mischungen mit CL80 gegenüber Mischungen mit CL80_vgl

Den Einfluss des Gehalts an hydraulisch wirksamen Phasen im CL80-Kalkhydrat auf die 28d-Druckfestigkeit macht Tabelle. 5.3.2 deutlich. Die 28T-Druckfestigkeit des mit der Ausgangsprobe CL80 formulierten Kalkes ist aufgrund des höheren Gehalts der hydraulisch wirksamen Phase C₂S doppelt so groß wie die des mit CL80_vgl Hergestellten.

FL-Komponenten	Zusammensetzung [Masse%]	Verfügbare Kalk [Masse%]	W/B	28T-DF [MPa]	Bezeichnung
CL80 / CEM_NA	80 / 20	52,8	0,6	10,4	FL A 5
CL80_vgl / CEM_NA		59,2		4,5	FL A 3,5

Tab. 5.3.2: Vergleich zweier CL80-Kalkhydrate hinsichtlich der 28T-Druckfestigkeit der aus ihnen hergestellten FL

5.3.3 DF-Vergleich: CEM_NA / HS_f in Formulierten Kalken

Den Verlauf der 7T- und 28T-Druckfestigkeiten von FL-Mischungen aus CEM_NA und CL90 bzw. HS_f und CL90 zeigt die Abbildung 5.3.1. Die angegebenen polynominiellen Fit-Funktionen gelten nur für den betrachteten Wertebereich von 0 bis 40 Masse% Zementanteil in der FL-Mischung. Betrachtet man zunächst die Kurvenverläufe der FL-Mischungen mit CEM_NA, so zeigt sich, dass mit zunehmendem CEM_NA-Gehalt in der Mischung die 7T- und 28T-Druckfestigkeit in beiden Fällen nicht linear ansteigt. Die Druckfestigkeitszunahme (Steigung der gefitteten Kurven) wird mit zunehmendem CEM_NA-Gehalt größer. Begründet werden kann dieses Verhalten dadurch, dass mit zunehmendem Zement-Gehalt und gleichzeitig abnehmendem Kalkhydrat-Gehalt der Verdünnungseffekt der Mischung verloren geht.

Die Verläufe der 7T- und 28T-Druckfestigkeiten in Abhängigkeit vom Gehalt an HS_f verhalten sich anders. Die Steigungen der gefitteten Kurven sind fast linear, mit einer leichten Tendenz, nach höheren HS_f-Gehalten hin flacher zu verlaufen. Die Steigungen der Fit-Kurven werden kleiner mit zunehmendem HS_f-Gehalt. Die Hydratationsreaktion des Hüttensandes wird bei hohen Hüttensandgehalten und niedrigen CL90-Gehalten gebremst, da weniger Anreger in Form von Kalkhydrat zur Verfügung steht.

Für Gehalte bis 25% Hüttensandmehl oder Zement, weisen FL-Mischungen mit CL90 und Hüttensand höhere 7T- und 28T-Druckfestigkeiten auf als FL-Mischungen mit CL90 und Zement. Ab 40 % Hüttensandmehl oder Zement drehen sich diese Verhältnisse um, da der Verdünnungseffekt, verursacht durch den CL90-Gehalt in der Mischung mit Zement, abnimmt. Gleichzeitig wird die Hydratationsreaktion des Hüttensandes durch den abnehmenden Anteil an Anregersubstanz (CL90) gebremst.

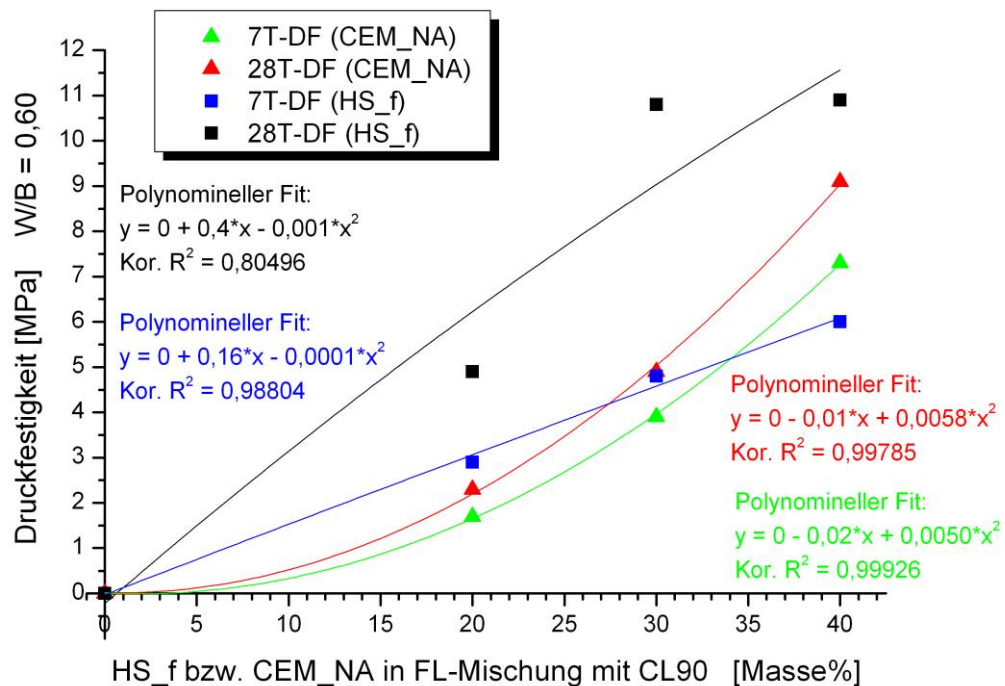


Abb. 5.3.1: 7T- und 28T-Druckfestigkeiten von FL-Mischungen aus CL90/CEM_NA bzw. CL90/HS_f

5.3.4 DF-Vergleich: HS_g / HS_f in Formulierten Kalken

Der direkte Vergleich der Druckfestigkeiten von FL-Mischungen, die mal mit der Probe HS_g und mal mit der Probe HS_f hergestellt wurden, lässt keine Tendenz erkennen, dass mit einem der beiden verwendeten Hüttensande höhere Druckfestigkeiten erzielt werden könnten. Der Tabelle 5.3.3 entnimmt man, dass man in neun Fällen mit der Probe HS_g eine höhere Druckfestigkeit erreicht und in sechs Fällen, mit der Ausgangsprobe HS_f (rot markierte Zahlen). Demnach macht sich der Basizitätsunterschied der beiden Hüttensandmehle nicht in einem Unterschied der Druckfestigkeiten bemerkbar.

	CL90 [%]	CL80 [%]	CEM_NA [%]	CEM_HS [%]	HS_f [%]	HS_g [%]	KSTM [%]	Schüttdichte [kg/dm ³]	W/B	7d DF [MPa]	28d DF [MPa]	56d DF [MPa]	Δ (DF) [MPa]	FL-Klasse
1				40				0,90		4,9				
1a					40	40		0,95		5,2			- 0,3	
1b	20			40			40	0,90	0,50		7,6		- 2,9	C 5
1c					40	40		0,95			10,5			
1d				40				0,90				8,6	- 4,1	
1e					40			0,95				12,7		
2	20			40		40		0,95	0,55		7,4		- 1,4	C 3,5
2a					40	40					8,8			
3	15			10		10	75	0,98	0,55		2,4		- 0,2	C 2
3a					10	10		1,00			2,6			
4	60		5	30		30	5	>0,60 _{calc}	0,55		12,5		- 0,3	-
4a					30	30		0,64			12,8			
5	50		25	20		20	5	>0,60 _{calc}	0,55		17,5		- 2,9	-
5a					20	20		0,71			14,6			
6	25		45	5		5	25	>0,60 _{calc}	0,55		21,4		- 5,6	-
6a					5	5					15,8			
7	30		25	5		4	40	>0,60 _{calc}	0,55		8,0		- 2,1	B/C 3,5
7a					4	4					5,9			B/C 2; 3,5
8	20		5	20		20	55	>0,60 _{calc}	0,55		4,0		- 1,6	C 2; 3,5
8a					20	20					5,6			
9	60		5	30		30	5	>0,60 _{calc}	0,55		12,7		- 0,5	-
9a					30	30					13,2			
10	50		25	20		20	5	>0,60 _{calc}	0,55		16,4		- 0,8	-
10a					20	20					15,7			
11	25		45	5		5	25	>0,60 _{calc}	0,55		23,1		- 5,5	-
11a					5	5					17,6			
12	30		25	5		4	40	>0,60 _{calc}	0,55		8,6		- 2,2	B/C 3,5
12a					4	4					6,4			B/C 2; 3,5
13	20		5	20		20	55	>0,60 _{calc}	0,55		4,9		- 0,8	C 2; 3,5
13a					20	20					5,7			

Tab. 5.3.3: Vergleich der Proben HS_g und HS_f hinsichtlich der Druckfestigkeit der aus ihnen hergestellten FL

5.3.5 Vergleich von Mischungen mit Trass_Bay gegenüber Mischungen mit Trass_Eif

	CL80 [%]	CEM_NA [%]	CEM_HS [%]	Trass_Bay [%]	Trass_Eif [%]	KSTM [%]	Schüttichte [kg/dm ³]	W/B	28d DF [MPa]	Δ (28d DF) [MPa]	FL-Klasse
1				60			>0,60 _{calc}		3,3		
1a	20				60	20	0,78	0,55	4,1	- 0,8	-
2				15			0,59	0,55	10,8		
2a					15		0,58		14,1	- 3,3	
3	55	25		15		5	0,59	0,60	8,5		B 3,5; 5
3a					15		0,58		11,0	- 2,5	B 5
4				15			0,85	0,55	2,4		
4a	20	10			15	55	>0,60 _{calc}		3,2	- 0,8	
5				5				0,55	19,0		
5a	30	50			5	15	>0,60 _{calc}		24,2	- 5,2	
6				20				0,55	11,7		
6a	20	35			20	25	>0,60 _{calc}		15,5	- 3,8	
7				35				0,55	7,4		C 3,5
7a	30	20			35	15	>0,60 _{calc}		10,5	- 3,1	
8				30				0,55	1,9		
8a	30				30	40	>0,60 _{calc}		2,7	- 0,8	C 2
9				14,5			<0,60 _{calc}	0,55	6,3		
9a					14,5		0,51		7,5	- 1,2	
10	75,5	10		14,5			<0,60 _{calc}	0,60	5,3		
10a					14,5		0,52		6,0	- 0,7	A 3,5
11				44,7				0,55	5,7		
11a	45,3	10			44,7		>0,60 _{calc}		8,1	- 2,4	C 3,5
12				67,3				0,55	5,8		
12a	22,7	10			67,3		>0,60 _{calc}		8,2	- 2,4	C 3,5
13				14,5				0,55	3,7		
13a	45,3	10			14,5	30,2	>0,60 _{calc}		4,6	- 0,9	B/C 2
14				15				0,55	11,0		
14a	55		25		15	5	<0,60 _{calc}		12,8	- 1,8	
15				15				0,55	2,2		
15a	20		10		15	55	>0,60 _{calc}		3,2	- 1,0	
16				5				0,55	21,9		
16a	30		50		5	15	>0,60 _{calc}		23,1	- 1,2	
17				20				0,55	12,2		
17a	20		35		20	25	>0,60 _{calc}		14,9	- 2,7	
18				35				0,55	7,6		
18a	30		20		35	15	>0,60 _{calc}		9,7	- 2,1	C 3,5
19				14,5				0,55	6,3		
19a					14,5				7,5	- 1,2	
20	75,5		10	14,5			<0,60 _{calc}	0,60	5,2		
20a					14,5				5,9	- 0,7	A 3,5
21				44,7				0,55	5,8		B/C 3,5
21a	45,3		10		44,7		>0,60 _{calc}		7,5	- 1,7	
22				67,3				0,55	5,7		C 2, 3,5
22a	22,7		10		67,3		>0,60 _{calc}		7,5	- 1,8	C 3,5
23				14,5				0,55	3,7		
23a	45,3		10		14,5	30,2	>0,60 _{calc}		4,5	- 0,8	B/C 2

Tab. 5.3.4: Vergleich der Proben Trass_Eif und Trass_Bay hinsichtlich der Druckfestigkeit der aus ihnen hergestellten FL

Tabelle 5.3.4 entnimmt man, dass bei gleicher FL-Zusammensetzung die 28T-Druckfestigkeiten der, mit der Probe Trass_Eif hergestellten Mörtel deutlich höher liegen als die der mit Trass_Bay hergestellten. Die Ursache hierfür sehen (Liebig & Althaus 1999) in der Quellfähigkeit des Minerals Montmorillonit, welches nur in Trass_Bay nicht aber in Trass_Eif zu finden ist (Röntgendiffraktogramme im Anhang).

Auch der gegenüber FL-Mischungen, die Trass_Eif enthalten, deutlich höhere Wasserbedarf von FL-Mischungen, die Trass_Bay enthalten, lässt sich nach (Liebig & Althaus 1999) auf die hohe spezifische Oberfläche des Montmorillonits zurückführen. Abbildung 5.3.2 zeigt dies anschaulich. In allen abgebildeten Mischungen beträgt der CEM_HS-Gehalt 20 Masse% und die Summe aus CL90 und Trass 80 Masse%.

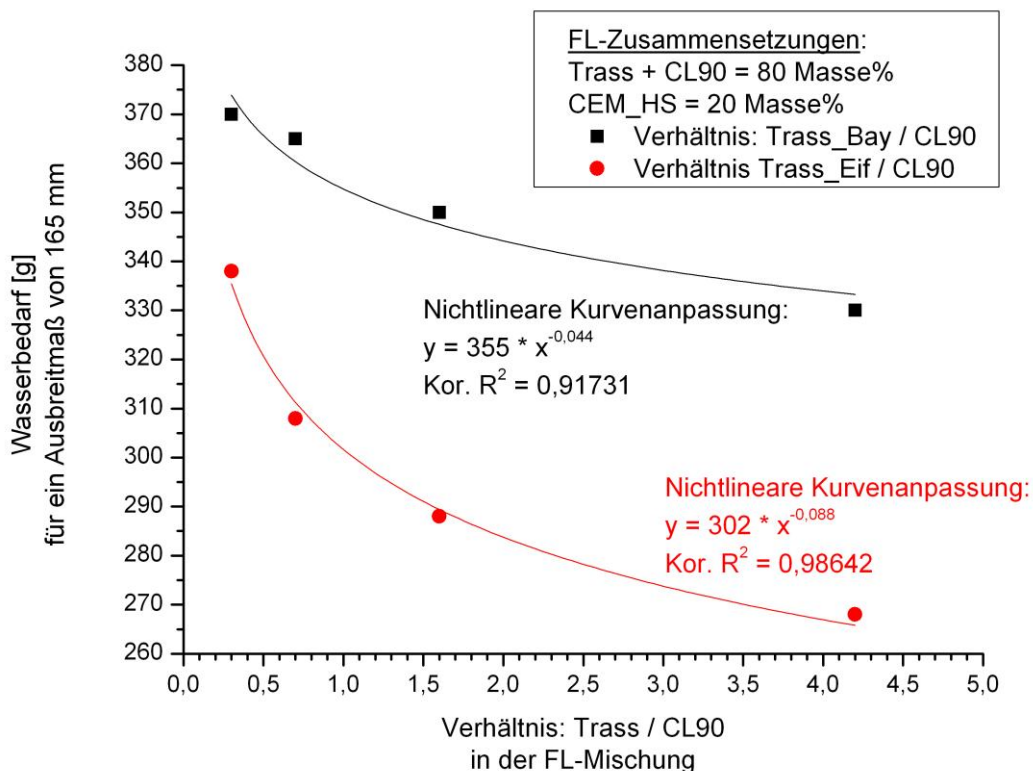


Abb. 5.3.2: Vergleich des Wasserbedarfs von FL-Mischungen mit Trass_Bay und FL-Mischungen mit Trass_Eif

Abbildung 5.3.2 entnimmt man:

Für ein und dasselbe Ausbreitmaß braucht man bei gleicher Zusammensetzung des FL deutlich mehr Wasser, wenn man den bayrischen Trass benutzt, als wenn man den Eifeltrass benutzt.

- Geht das Verhältnis von CL90 zu Trass gegen Null (kein Trass in der FL-Mischung), so nähern sich die Werte für den Wasserbedarf (die beiden Fit-Kurven) einander an.
- Das Kalkhydrat CL90 hat einen höheren Wasserbedarf als die Trasse.

5.3.6 Änderung der Druckfestigkeit bei Änderung des W/B

	CI.90 [%]	CI.80 [%]	CEM ₁ NA [%]	CEM ₁ HS [%]	Trass_Bay [%]	Trass_Elf [%]	KSTM [%]	HS _g [%]	HS _f [%]	A.L. [%]	Schüttdichte [kg/dm ³]	W/B	28d DF [MPa]	7d DF [MPa]	Erhöhung W/B um:	Erniedrigung DF um: [MPa]	Erniedrigung 28d DF bezogen auf den Ausgangswert, um:	Fl-Klasse	
1																		-	
1a		70	5					25		46,3	0,53	0,55 0,60	12,1 10,7		0,05	1,4	12%	A5	
2		75	5				15	5		49,5 ^{calc}	<0,6 ^{calc}	0,55 0,60	5,7 4,8			0,9	16%	A3,5	
3		70		5				25		45,3	<0,6 ^{calc}	0,55 0,60	12,1 10,4			1,7	14%	A/B5	
4		75		5			15	5		49,5 ^{calc}	<0,6 ^{calc}	0,55 0,60	5,5 4,2			1,3	24%	A3,5	
5		55	25		15		5			36,3 ^{calc}	0,59	0,55 0,60	10,8 8,5			2,3	21%	B 5	
6		75,5	10		14,5					49,8 ^{calc}	<0,6 ^{calc}	0,55 0,60	6,3 5,3			1,0	19%	A3,5	
7		55	25			15	5			36,3 ^{calc}	0,58	0,55 0,60	14,1 11,0			3,1	22%	B5	
8		75,5	10			14,5				49,8 ^{calc}	0,51	0,55 0,60	7,5 6,0			1,5	20%	A 3,5	
9		75,5		10	14,5					49,8 ^{calc}	<0,6 ^{calc}	0,55 0,60	6,3 5,2			1,1	17%	A3,5	
10		55		25	15		5			36,3 ^{calc}	<0,6 ^{calc}	0,55 0,60	12,8 10,0			2,8	22%	B5	
11		75,5		10		14,5				49,8 ^{calc}	<0,6 ^{calc}	0,55 0,60	7,5 5,9			1,6	21%	A3,5	
12	60		40							58,2 ^{calc}	0,68	0,50	13,5			0,10	4,4	33%	A5
12a												0,60	9,1						
13												0,50		10,7					
13a	0,60		7,3																
14	70		30						68,3	0,63	0,50	7,6			3,4		32%	A5	
14a											0,60	4,9							
15											0,50		4,9						
15a	0,60		3,9																
16	60								58,2 ^{calc}	0,66	0,50	14,7			2,7		36%	A5	
16a											0,60	10,9							
17											0,50		9,6						
17a											0,60		6,0						
18	70								67,7	0,62	0,50	12,7			1,0		20%	A5	
18a											0,60	10,8							
19											0,50		7,3						
19a	0,60		4,8																

Anm.: „calc“ bedeutet, dass der Wert für den verfügbaren Kalk nicht gemessen, sondern aus dem Wert für den Gehalt im reinen Kalkhydrat berechnet wurde.

Tab. 5.3.5: Änderung der Druckfestigkeit bei Änderung des W/B

Die Baukalknorm EN 459-2 gibt für die Zusammensetzung des Mörtels, an dem die 7T- und 28T-Druckfestigkeiten des FL bestimmt werden, in Abhängigkeit von der Schüttdichte des FL und der angestrebten Druckfestigkeitsklasse, 4 verschiedene W/B-Verhältnisse vor. In den statistischen Modellen konnte jedoch nur ein konstanter W/B von 0,55 berücksichtigt werden, da sich die Anzahl der Versuche sonst auf einen zeitlich nicht mehr vertretbaren Rahmen erhöht hätte. Um die Auswirkungen des W/B auf die Druckfestigkeit des Formulierten Kalks trotzdem erfassen zu können, wurde in den in Tabelle 5.3.5 dargestellten Mischungen das W/B-Verhältnis variiert.

Bezogen auf den Wert der Druckfestigkeit bei kleinerem W/B lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Erhöhung des W/B um 0,05 → Erniedrigung der DF um 12-24 % (Mittel: 19 ± 4 %).
- Erhöhung des W/B um 0,10 → Erniedrigung der DF um 15-38 % (Mittel: 29 ± 8 %).
- Dabei ist es egal, ob es sich um die 7T- oder 28T-Druckfestigkeit handelt.
- Die Änderung der Druckfestigkeit mit der Änderung des W/B ist somit nicht linear.

Dass die Druckfestigkeit mit steigendem W/B nicht linear sinkt, lässt sich auch aus Abbildung 5.3.3 erkennen. Unter der Annahme dass die 28T-Druckfestigkeit bei einem Wert von 100 Masse% CL90 in der FL-Mischung 0 MPa beträgt und die Druckfestigkeit einer FL-Mischung aus 100 Masse% CEM_NA, nach Herstellerangabe, 59,4 MPa erreicht, wurden die vorhandenen Werte (Tabellen: Prüfungen an Formulierten Kalken, Anhang) polynominell gefittet. Die Abbildung zeigt die 28T-Druckfestigkeiten von FL-Mischungen aus Kalkhydrat und Zement bei W/B-Verhältnissen von 0,5 und 0,6. Kurvenverlauf und Steigung der gefitteten Kurven für die FL-Mischungen mit einem W/B von 0,6 zeigen für die beiden Kalkhydrate CL90 und CL90_vgl in der Mischung mit CEM_NA eine gute Übereinstimmung. Das Ergebnis war aufgrund der Probencharakterisierung zu erwarten, da beide Kalkhydrate keine hydraulisch wirksamen Phasen besitzen. Auch die deutlich unterschiedlichen Schüttdichten der beiden Kalkhydrate machen sich, bei gleichem W/B, nicht in der Druckfestigkeit bemerkbar. Mit steigendem W/B, von 0,5 auf 0,6 ändert sich allerdings sowohl der Kurvenverlauf als auch die Steigung der gefitteten Kurve, so dass keine Linearität zwischen Druckfestigkeit und W/B erwartet werden kann.

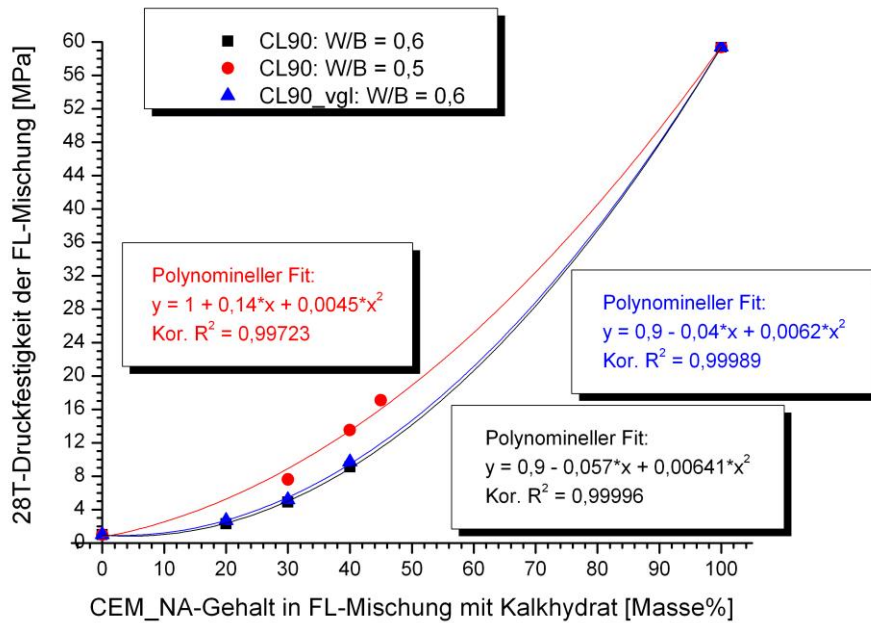


Abb. 5.3.3: Abhängigkeit der 28T-Druckfestigkeit vom W/B-Verhältnis in FL-Mischungen aus Kalkhydrat und Zement

5.3.7 Auswirkungen der Schüttdichte des Kalkhydrats auf den W/B nach EN 459-2

Nach EN 459-2 ändert sich das für die Zusammensetzung des Norm-Mörtels erforderliche W/B-Verhältnis bei der Schüttdichte von $0,60 \text{ kg/dm}^3$. Abbildung 5.3.4 zeigt, wie sich der Anteil der verwendeten Kalkhydrate in einer Mischung mit Zement bzw. Hüttensand auf die Schüttdichte des Formulierten Kalkes auswirkt. Für Kalkhydrate mit Schüttdichten zwischen $0,46$ und $0,51$ liegt man bei einem Anteil < 55 Masse% in einer FL-Mischung mit Zement, bei einer Schüttdichte $> 0,60 \text{ kg/dm}^3$. Bei einem Kalkhydrat-Massenanteil > 77 % ist die Schüttdichte aller FL-Mischungen, unabhängig von den verwendeten Komponenten, stets $< 0,60 \text{ kg/dm}^3$, da Zement die höchste Schüttdichte aller FL-Komponenten besitzt. Tabelle 5.3.6 listet die Schüttdichten aller verwendeten FL-Komponenten auf. Bei der Verwendung von Tass muss allerdings berücksichtigt werden, dass dieser mit einer relativ geringen Schüttdichte zur Schüttdichte des FL beiträgt. Unter Berücksichtigung der gemessenen Schüttdichten (Tabellen: Prüfungen an Formulierten Kalken, Anhang) lässt sich jedoch die Aussage treffen, dass ein Massenanteil von < 50 % Kalkhydrat eine Schüttdichte des FL von $> 0,60 \text{ kg/dm}^3$ bedingt.

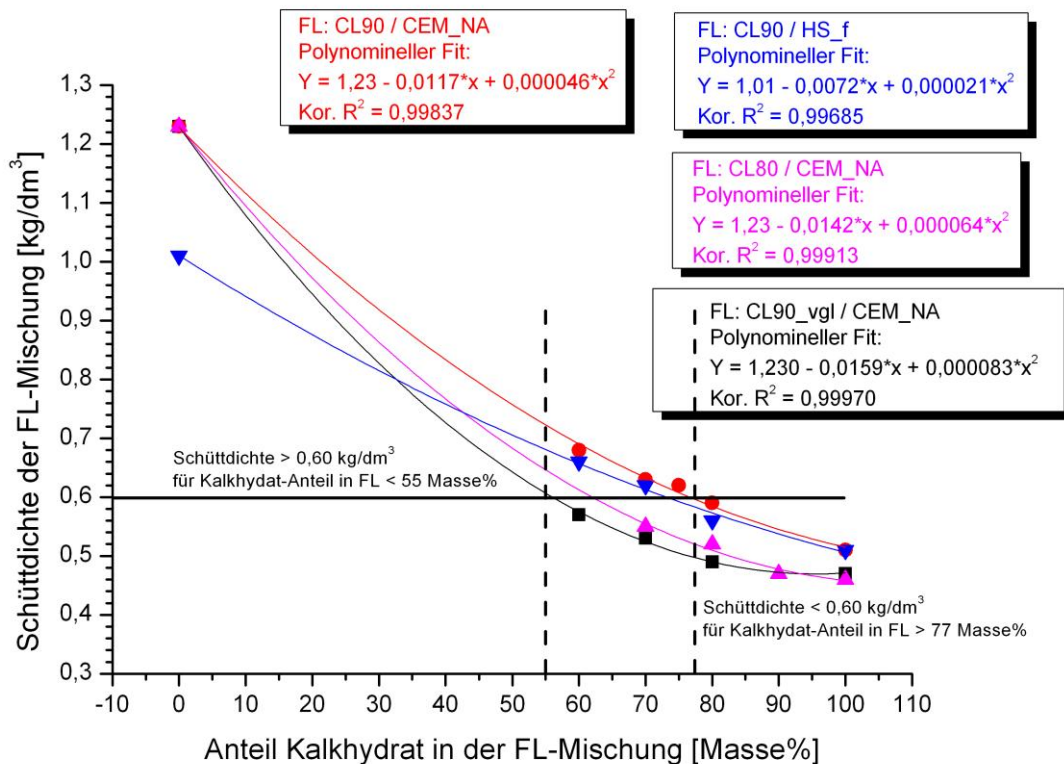


Abb. 5.3.4: Änderung der Schüttdichten von FL-Mischungen aus Kalkhydrat und Zement bzw. Kalkhydrat und Hüttensand

Komponente	Schüttdichte [kg/dm ³]
CL80	0,46
CL90_vgl	0,47
CL80_vgl	0,48
CL90	0,51
Trass_Eif	0,96
Trass_Bay	0,97
HS_vgl	0,99
HS_f	1,01
HS_g	1,07
KSTM	1,15
KST_vgl	1,17
CEM_HS	1,20
CEM_NA	1,23

Tab. 5.3.6: Schüttdichten der Ausgangskomponenten

5.3.8 Erstarrungszeiten nach EN 459

Die Erstarrungszeiten stellen nach EN 459-1 eine physikalische Anforderung an Formulierten Kalk dar. Anhand der hierzu durchgeführten Versuche (Tabellen: Prüfungen an Formulierten Kalken, Anhang) zeigte sich, dass Probleme hinsichtlich eines nur knapp eingehaltenen Erstarrungsendes lediglich in Mischungen auftraten, die kein Zement und damit keine schnell erhärtende C_3S -Komponente enthielten. Ein Massengehalt von 10 % CEM 42,5 R scheint erforderlich um eine ausreichend schnelle Erstarrung zu erreichen.

Dieses Ergebnis zeigt sich auch bei der Bestimmung der Reaktivität von FL-Mischungen mittels isothermer Kalorimetrie (Kap.5.2).

5.3.9 Raumbeständigkeit nach EN 459

Eine weitere physikalische Anforderung an Formulierten Kalk stellt die Raumbeständigkeit nach EN 459-1 dar. Die Tabellen: Prüfungen an Formulierten Kalken im Anhang zeigen, dass alle hinsichtlich der Raumbeständigkeit geprüften FL die Norm erfüllen. Die Ausdehnung des Prüfkörpers erreichte maximal lediglich 10 % des Grenzwertes.

5.3.10 Luftgehalt nach EN 459

EN 459-1 beschränkt den Luftgehalt in Formuliertem Kalk auf Werte ≤ 25 %. Der Luftgehalt der geprüften FL-Mischungen betrug, da keine Luftporenbildner vorhanden waren, lediglich 14 % von diesem Wert.

5.3.11 Auswirkung des Available Lime-Gehalts im Kalkhydrat auf die FL-Mischung

Verfahrensbedingt kann es bei der Bestimmung des A.L.-Gehalts in Formuliertem Kalk zu einer Abweichung zwischen dem, mit Hilfe des bekannten A.L.-Gehalts des Kalkhydrats, berechneten Wert und dem experimentell bestimmten Wert kommen.

Bei der Bestimmung des A.L.-Gehalts in Kalkhydraten (EN 459-2) wird das Kalkhydrat zunächst, durch Reaktion mit Zucker als Calciumsaccharat in Lösung gebracht. Diese Lösung wird anschließend mit Salzsäure gegen Phenolphthalein als Indikator titriert (Säure-Base-Reaktion). Die Formulierten Kalke werden, nachdem ihr Anteil an Kalkhydrat in eine Calciumsaccharat-Lösung überführt wurde, filtriert. Das Filtrat wird mit Salzsäure gegen Phenolphthalein als Indikator titriert. Die Tabellen 5.3.7 und 5.3.8 zeigen, dass es bei der Filtration anscheinend zu Verlusten an Available Lime kommt. Diese Verluste machen sich besonders bei CL80-haltigen Formulierten Kalken bemerkbar, da das Filtrat, aufgrund der nicht in Lösung gehenden Bestandteile des CL80, massenanteilig größer ist als das Filtrat der Mischungen mit

CL90. Gegenüber der unfiltrierten Lösung muss hierdurch eine größere Diskrepanz auftreten als bei der CL90-Lösung.

Die rechte Spalte der Tabellen zeigt den jeweils zurück gerechneten Gehalt an A.L. im Kalkhydrat. Als Ausgangswert für die Rechnung wurde der experimentell bestimmte A.L.-Gehalt des Formulierten Kalkes herangezogen. Dieser Wert wurde auf 100 Masse% Kalkhydrat umgerechnet. Die in fast allen Fällen zu kleineren A.L.-Gehalten gegenüber dem experimentell bestimmten A.L.-Gehalt des Kalkhydrats verschobenen Werte sind deutlich zu erkennen.

Komponenten	Zusammensetzung: FL [Massenanteil in %]	CL90-Gehalt im FL [Massenanteil in %]	Available Lime (experimentell) im FL [Massenanteil in %] (A.L. _{exp} im FL)	Available Lime (berechnet auf 100% CL90 im FL) [Massenanteil in %] (A.L. _{calc} inCL90)
CL90	100	100	97,0	97,0
CL90/CEM_NA	70 / 30	70	68,3	97,6
	80 / 20	80	77,1	96,4
CL90/HS_f	70 / 30	70	67,7	96,7
	80 / 20	80	75,3	94,1
CL90/HS_vgl	70 / 30	70	66,9	95,6
CL90/CEM_NA/KSTM	80 / 10 / 10	80	77,7	97,1
	80 / 5 / 15	80	76,8	96,0
	40 / 20 / 40	40	39,3	98,3
	40 / 10 / 50	40	39,2	98,0
CL90/HS_f/KSTM	15 / 10 / 75	15	13,9	92,7
CL90/HS_g/KSTM	15 / 10 / 75	15	14,1	94,0

(A.L._{calc} inCL90) = 100 * (A.L._{exp} im FL) / (CL90-Gehalt im FL)

Tab. 5.3.7: Extrapolation des in den FL bestimmten Available Lime-Gehalts auf eine Massenanteil von 100 % CL90

Komponenten	Zusammensetzung: FL [Massenanteil in %]	CL80-Gehalt im FL [Massenanteil in %]	Available Lime (experimentell) im FL [Massenanteil in %] (A.L. _{exp} im FL)	Available Lime (berechnet auf 100% CL80 im FL) [Massenanteil in %] (A.L. _{calc} inCL80)
CL80	100	100	69,8	69,8
CL80/CEM_NA	70 / 30	70	46,0	65,7
	80 / 20	80	52,8	66,0
CL80/CEM_HS	80 / 20	80	53,5	66,9
CL80/CEM_HS/KSTM	50 / 10 / 40	50	32,3	64,6
CL80/CEM_NA/KSTM	50 / 10 / 40	50	33,2	66,4
	50 / 20 / 30	50	32,8	65,6
	50 / 30 / 20	50	33,5	67,0
CL80/CEM_NA/KSTM_vgl	50 / 10 / 40	50	33,3	66,6
CL80/CEM_NA/HS_g	70 / 5 / 25	70	46,3	66,1
CL80/CEM_HS/HS_g	70 / 5 / 25	70	45,3	64,7
CL80/Trass_Eif/KSTM	20 / 60 / 20	20	12,8	64,0
	30 / 30 / 40	30	18,7	62,3

(A.L._{calc} inCL80) = 100 * (A.L._{exp} im FL) / (CL80-Gehalt im FL)

Tab. 5.3.8: Extrapolation des in den FL bestimmten Available Lime-Gehalts auf eine Massenanteil von 100 % CL80

Ausgangssprobe	A.L. experimentell bestimmt [Massenanteil%]	A.L. berechnet aus Ergebnissen für FL-Mischungen [Massenanteil%]
CL90	97,0	96 ± 2
CL80	69,8	66 ± 1

Tab. 5.3.9: Diskrepanz des experimentell bestimmten A.L.-Gehalts der verwendeten Kalkhydrate von dem aus an FL-Mischungen experimentell ermittelten, berechneten Wert

Die Tabelle 5.3.9 veranschaulicht, dass sich, vor allem bei FL-Mischungen die CL80 enthalten, der A.L.-Gehalt des Kalkhydrats scheinbar erniedrigt, so dass mit einem niedrigeren A.L.-Gehalt gerechnet werden muss.

5.3.12 Zeitabhängigkeit der Druckfestigkeit

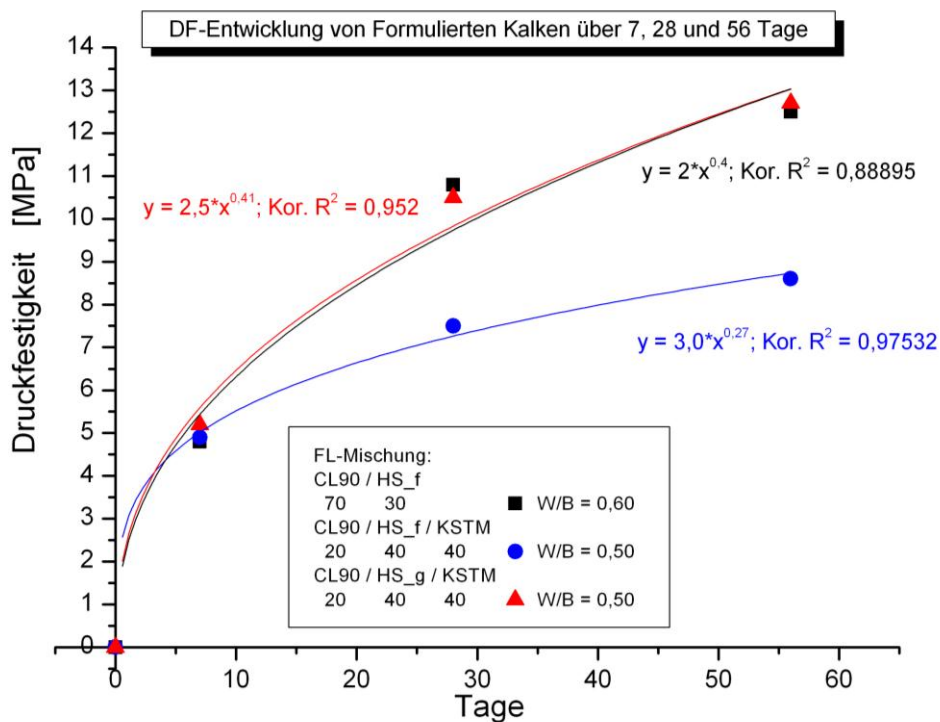


Abb. 5.3.5: Änderung der Druckfestigkeit mit der Zeit von hüttensandhaltigen Formulierten Kalken

Um einen Eindruck davon zu gewinnen in wie weit Formulierte Kalke, die Hüttensand oder Trass als Mischungsbestandteil enthalten, noch nach 28 Tagen weiter aushärten, wurde an einigen Mischungen die Druckfestigkeit nach 7, 28 und 56 Tagen bestimmt.

Hierbei zeigte sich, dass in FL-Mischungen mit Trass_Eif, HS_f oder HS_g die Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Zeit nichtlinear angepasst werden kann (Abbildungen 5.3.5, 5.3.6 und 5.3.7). Die Steigung der Fit-Kurven wird mit zunehmender Zeit (Tage) kleiner. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die angegebene Fit-Funktion nur für den Bereich bis 56 Tage gilt und diese Näherung je nach korrigiertem Bestimmtheitsmaß (Kor. R²) mal mehr oder mal weniger gut ist.

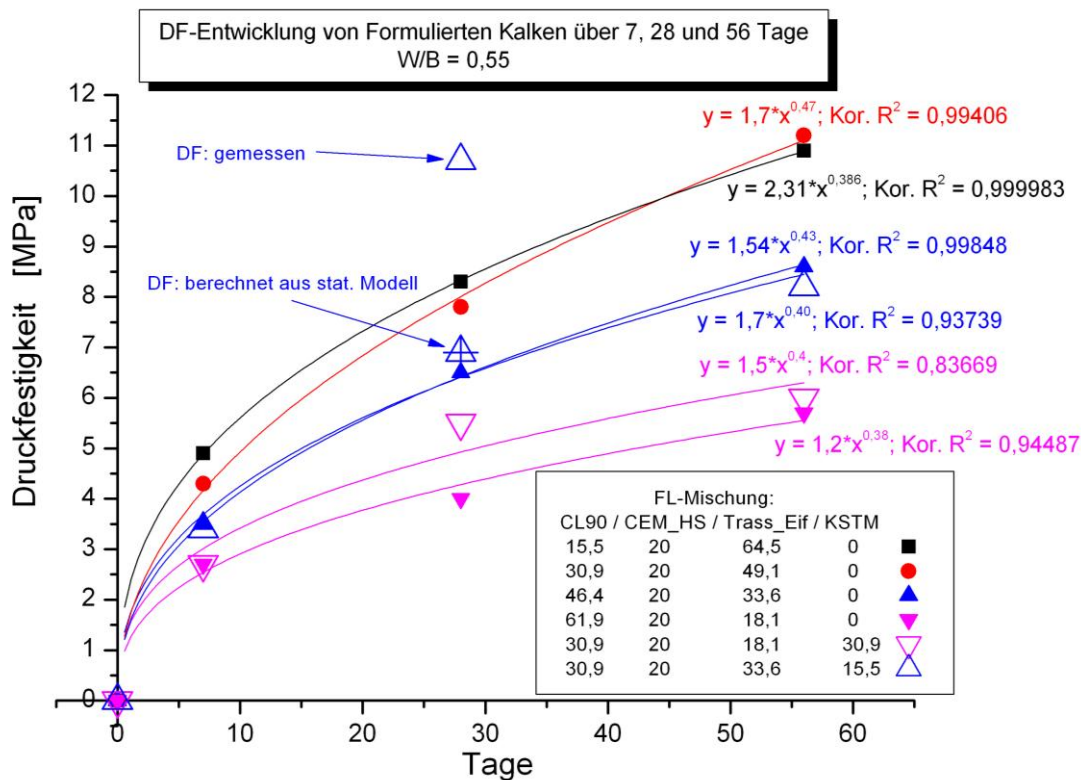


Abb. 5.3.6: Änderung der Druckfestigkeit mit der Zeit von Trass_Eif-haltigen Formulierten Kalken

Abweichend von diesem Verhalten zeigen sich die FL-Mischungen mit Trass_Bay. (Abb. 5.3.8). Hier ließ sich die Druckfestigkeitsentwicklung nicht annähern. Die Kurven wurden zwischen den einzelnen Werten interpoliert. Es sieht so aus, als sei die Druckfestigkeitsentwicklung hier nach 56 Tagen bereits abgeschlossen. Lediglich die beiden Mischungen mit den höchsten Trassgehalten (64,5 und 49,1 Masse%) zeigen die leichte Tendenz einer weiteren Zunahme der Druckfestigkeit mit der Zeit. Für diese beiden FL-Zusammensetzungen wurden die 28-Tage Druckfestigkeiten mit Hilfe des statistischen Modells berechnet. Die dem statistischen Modell entnommenen Werte (Abbildungen. 5.3.10 und 5.3.11) weichen deutlich von den experimentell ermittelten Werten (Abb. 5.3.8) ab. Vermutlich lag hier ein Mischungsfehler oder ein Fehler in der W/B-Zusammensetzung vor. Da das W/B-Verhältnis für das statistische Modell 0,55 betrug, liegen die berechneten Werte wahrscheinlich leicht über den Sollwerten für das Diagramm.

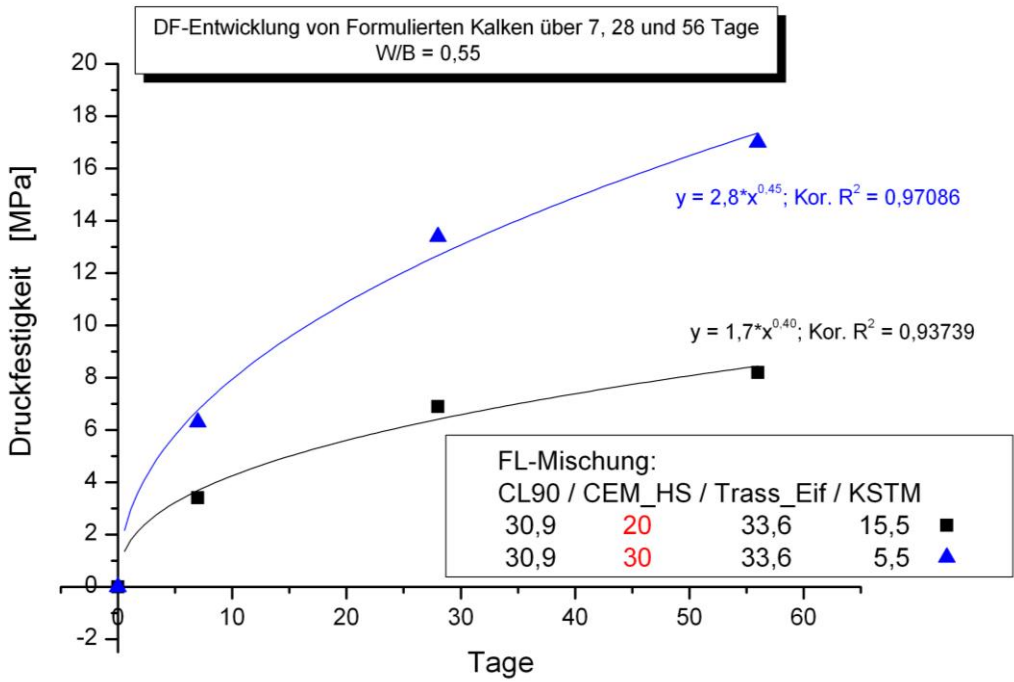


Abb. 5.3.7: Änderung der Druckfestigkeit mit der Zeit von Trass_Eif-haltigen Formulierten Kalken bei Variation des Zement-Gehalts

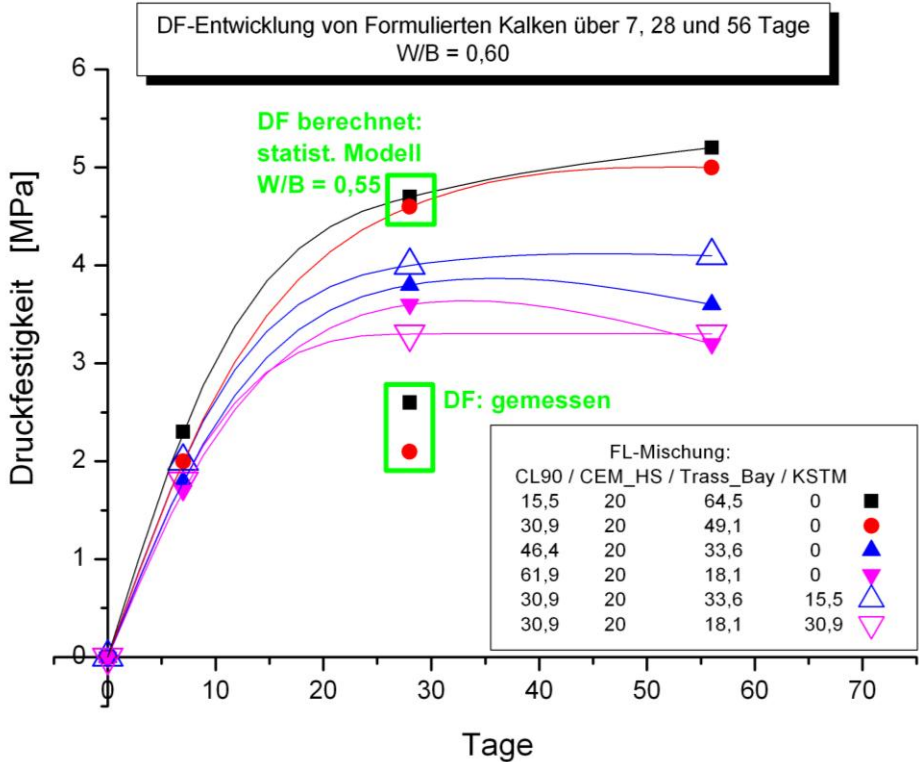


Abb. 5.3.8: Änderung der Druckfestigkeit mit der Zeit von Trass_Bay-haltigen Formulierten Kalken

Auch für die FL-Zusammensetzung mit 33,6% Trass_Eif, die auch KSTM enthielt, musste der Wert der 28T-Druckfestigkeit mit Hilfe des statistischen Modells berechnet werden (Abbildungen 5.3.9 und 5.3.6). Auch hier zeigte sich die Fehler ausgleichende Wirkung der Statistik.

Dass die Druckfestigkeiten der beiden FL-Mischungen mit den höchsten Trassgehalten (64,5 und 49,1 Masse%) trotz Unterschiede im Trassgehalt annähernd dieselben Druckfestigkeiten aufweisen, liegt anscheinend daran, dass in der Mischung mit 64,5% Trass die vorhandenen 15,5% Kalkhydrat nicht ausreichen, um die Hydratationsreaktion vollständig ablaufen zu lassen. Somit liegt nicht reagierender Trass (sowohl bayrischer als auch rheinischer) in dieser Mischung vor.

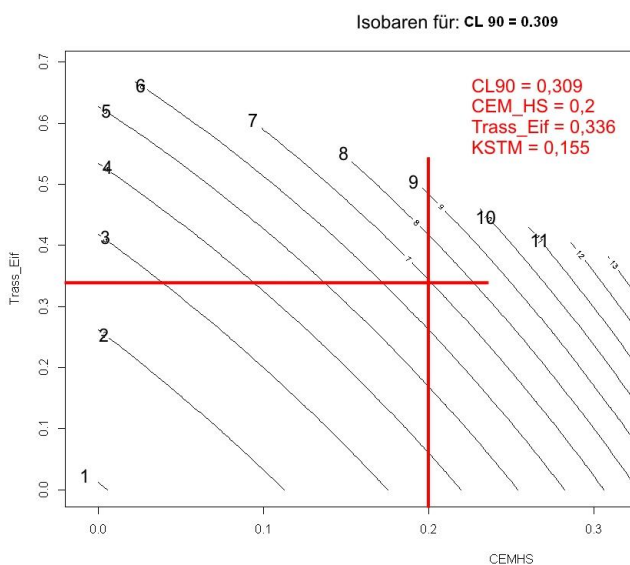


Abb. 5.3.9: 2D-Projektion des statistischen Modells CL90 / CEM_HS / Trass_Eif / KSTM für CL90 = const. = 30,9 %

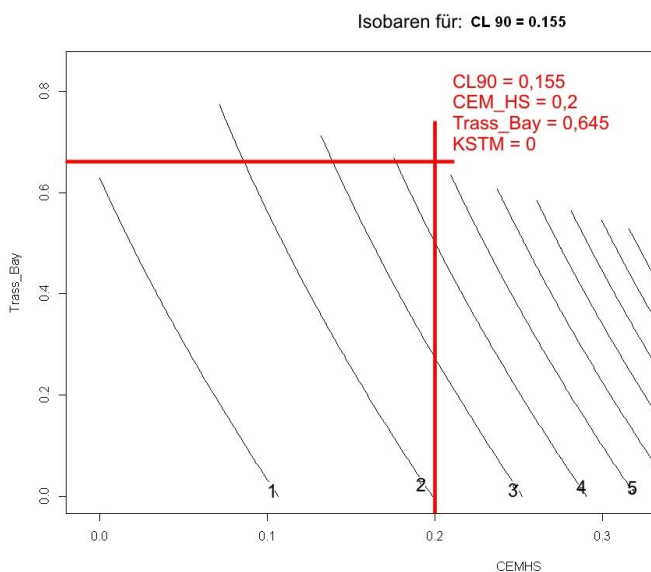


Abb. 5.3.10: 2D-Projektion des statistischen Modells CL90 / CEM_HS / Trass_Bay / KSTM für CL90 = const. = 15,5 %

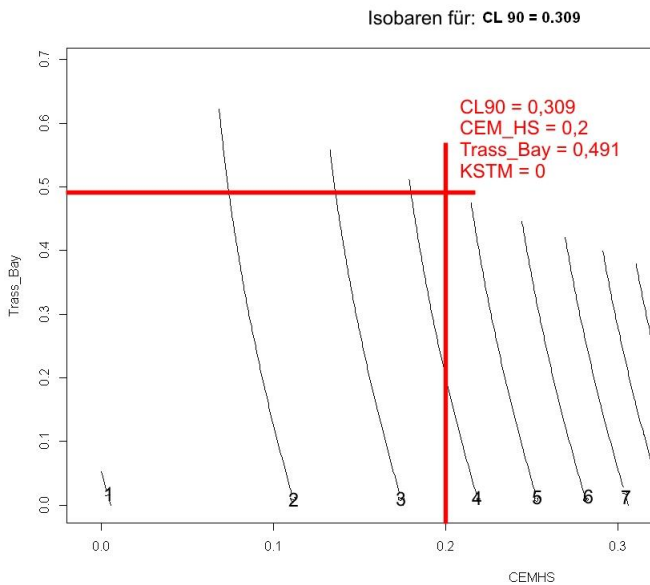


Abb. 5.3.11: 2D-Projektion des statistischen Modells CL90 / CEM_HS / Trass_Bay / KSTM für CL90 = const. = 30,9 %

5.3.13 Statistische Modelle

In diesem Kapitel werden die Modelle vorgestellt, die für die endgültige Druckfestigkeitsvorhersage benutzt wurden. Es wird die Anpassungsgüte diskutiert und Auffälligkeiten werden thematisiert.

Wie erwähnt, wurde die Modellbildung und Validierung in zwei Schritte aufgeteilt. Im ersten Schritt erfolgte die Modellanpassung an 133 Versuche. Um möglichst viele Informationen über den Versuchsraum zu sammeln, wurden in diesem Schritt raumfüllende Versuchspläne verwendet, die hohen Wert auf Exploration legen und keine Versuchswiederholungen verlangen.

In der zweiten Phase erfolgte die Modellvalidierung und Überprüfung. In diesem Schritt wurden 40 weitere Experimente durchgeführt, die gleichmäßig auf die Modelle für die verschiedenen Komponenten aufgeteilt wurden. Die Versuchspläne wurden „manuell“ erstellt, indem Informationen von den vorhandenen Modellen berücksichtigt wurden, wobei im Hinblick auf die Validierung auch Wiederholungsexperimente durchgeführt wurden.

Nach der zweiten Phase wurden die 40 Validierungsversuche dafür benutzt, die bestehenden Modelle zu verbessern, indem sie zusätzlich zu den bisherigen 133 Versuchen in die Modellbildung mit aufgenommen wurden. Die aktualisierten Modelle werden in diesem Kapitel dargestellt und untersucht, mittels der in Kap.4 beschriebenen Diagnostiken.

Modell für CL90 und Hüttensand

Die für das Modell mit den Komponenten CL90, Zement (CEM_HS und CEM_NA), Hüttensand (HS_f und HS_g) und KSTM gewählten erklärenden Variablen sowie die geschätzten Koeffizienten sind in Tabelle 5.3.10 zusammengefasst. Mit einem Doppelpunkt sind die modellierten Wechselwirkungen bezeichnet. Das Modell beinhaltet nach einer Variablenselektion alle Haupteffekte und einige Interaktionen (wie auch die anderen drei Modelle). Eine Tabelle mit den durchgeführten Versuchen befindet sich im Anhang (Tab. 8.5.1)

Variable	Schätzung (die Betas)
CL90	0.49
CEM_NA	5.68
CEM_HS	5.42
HS_f	1.36
HS_g	2.68
KSTM	1.43
CL90:HS_g	7.28
CL90:HS_f	7.61
CL90:KSTM	-3.57
CEM_NA:HS_f	3.59
CEM_NA:HS_g	-4.04
CEM_HS:HS_f	5.35
CEM_HS:HS_g	-3.77
HS_f:KSTM	1.36
HS_g:KSTM	0.47

Tabelle 5.3.10: Modell für CL90 und Hüttensand, Variablen und Parameterschätzungen

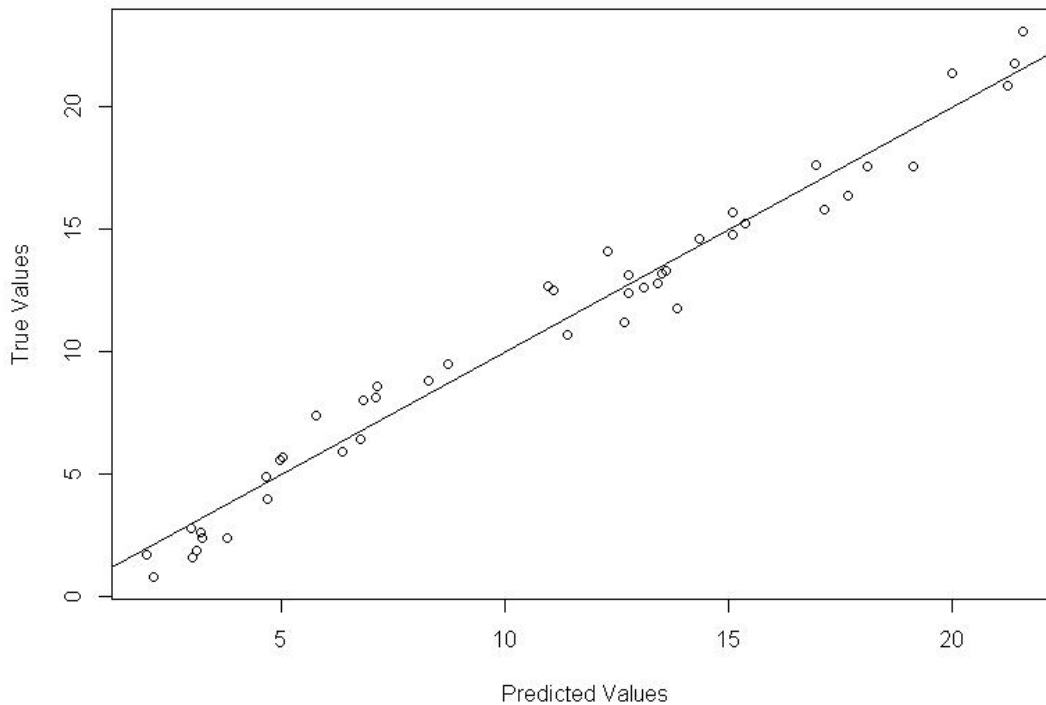


Abb. 5.3.12: Lack-of-fit Plot für das Modell mit CL90 und Hüttensand

Als erste wichtige Analyse des Modells wird der Lack-of-fit Plot betrachtet. Dieser Plot kann einen Eindruck geben, wie gut die beobachteten Daten von dem Modell erklärt werden. In Abbildung 5.3.12 ist zu sehen, dass die vom Modell vorhergesagten Druckfestigkeiten sehr gut mit den echten Werten übereinstimmen. Die Punkte liegen idealerweise nah an der Linie, aber nicht perfekt auf der Linie, so dass das Modell nicht nur die Versuchsdaten (alle Punkte auf einer Linie) sondern auch die Umgebung gut erklärt.

Die überzeugende Anpassung wird auch im Residuenplot bestätigt (Abb. 5.3.13). An diesem Plot kann abgelesen werden, wie stark die angepassten Werte von den beobachteten abweichen. Außerdem können potentielle Ausreißer identifiziert werden und wichtige Modellannahmen geprüft werden. Hier wird deutlich, dass die Punkte unsystematisch um 0 streuen. Damit kann die unerwünschte Eigenschaft der Heteroskedastizität ausgeschlossen werden. Eine weitere Erkenntnis von Abbildung 5.3.13 ist, dass die Abweichung zwischen vorhergesagten und beobachteten Druckfestigkeiten maximal 1.8 MPa beträgt, wobei die meisten Abweichungen zwischen -1.25 MPa und 1.25 MPa liegen. Weiterhin deutet der Plot nicht darauf hin, dass es in den Daten Ausreißer gibt, da keine Beobachtungen auffällig von der 0 abweichen.

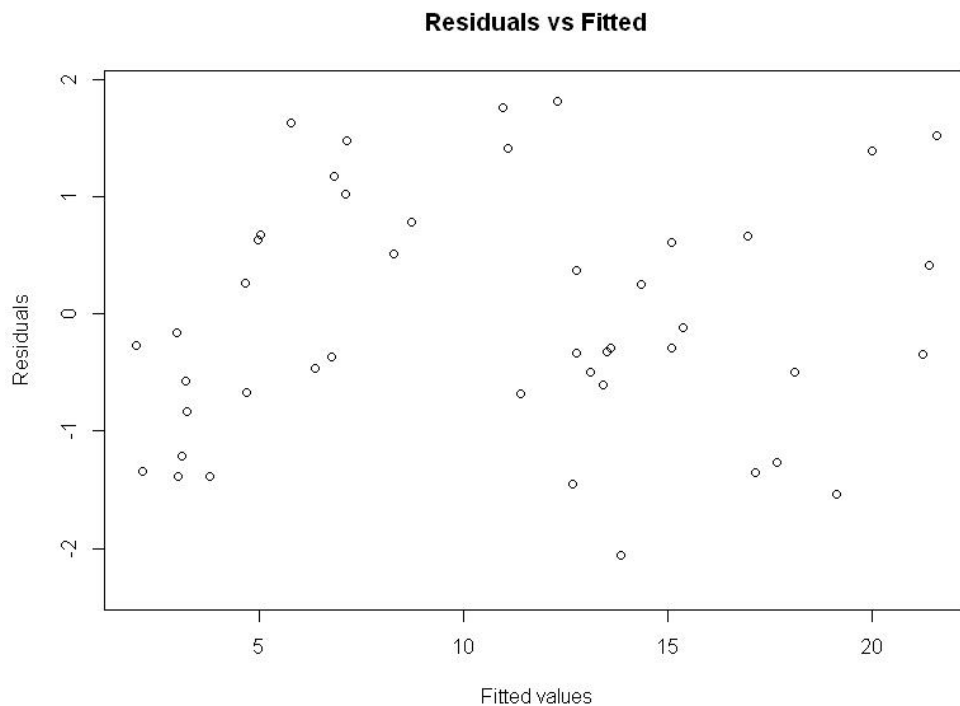


Abb. 5.3.13: Residuenplot für das Modell mit CL90 und Hüttensand

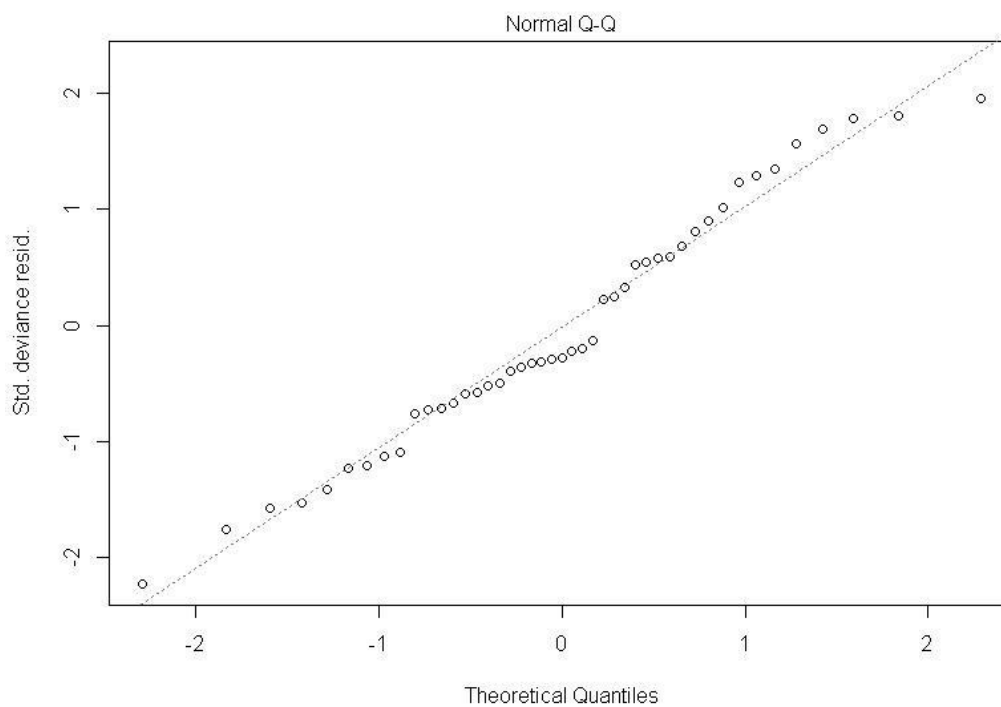


Abb. 5.3.14: QQ-Plot für das Modell mit CL90 und Hüttensand

Die Überprüfung der Residuen zeigt eine hohe Modellqualität. Es bleibt nur noch zu untersuchen, ob die Verteilungsannahme der Normalverteilung für die Fehler erfüllt ist. Zu diesem Zweck wird ein QQ-Plot erstellt. In Abbildung 5.3.14 ist zu sehen, dass die theoretischen Werte der Normalverteilung (Quantile) und die beobachteten Residuen nicht erheblich voneinander abweichen (die Punkte liegen sehr nah an der Linie), was bestätigt, dass die angenommene Normalverteilung der statistischen Fehler gültig ist.

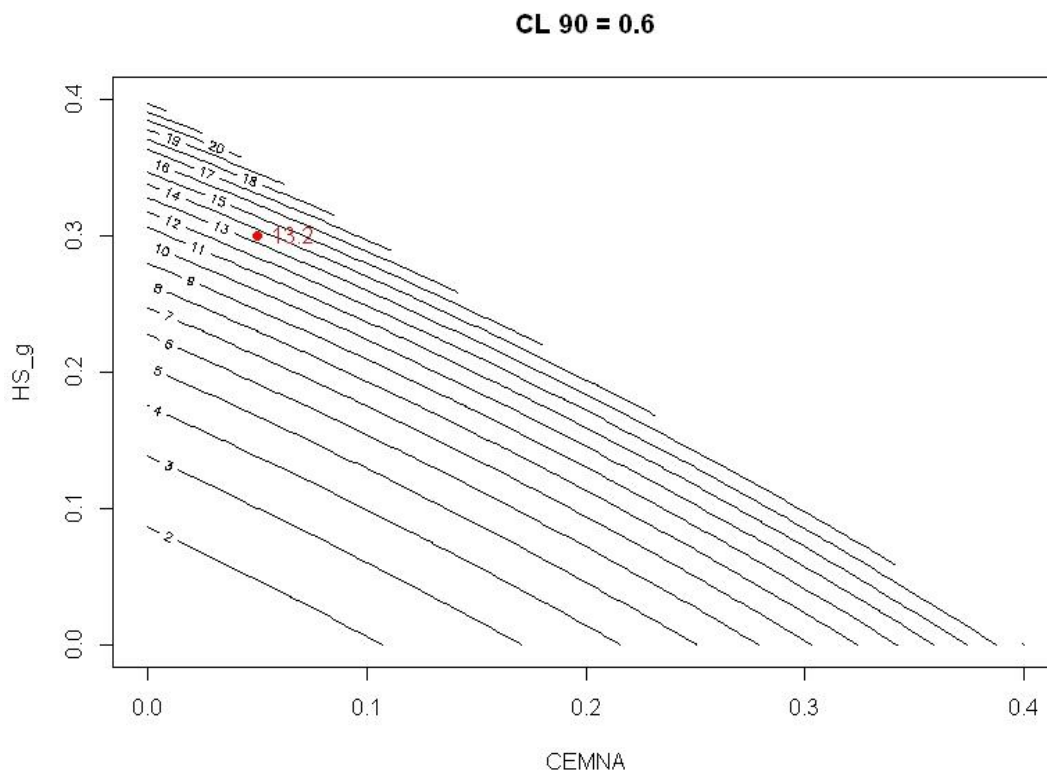


Abb. 5.3.15: Modellanpassung für Hüttensand, und CL 90 = 60%

Insgesamt zeigt die Modellüberprüfung, dass das ausgewählte Modell für CL90 und Hüttensand alle Voraussetzungen erfüllt und relativ genau die beobachteten Daten erklärt. In Abbildung 5.3.15 wird ein Beispiel für die Anpassung und Vorhersage mit dem Modell dargestellt. Der CL90 Gehalt ist konstant. Die Abszisse zeigt den Zement-Gehalt (CEM_{NA}) und die Ordinate gibt den Hüttensand-Gehalt (HS_g) wieder. Der Gehalt an KSTM ergibt sich nach

$$1 - (\text{CL90} + \text{CEM}_{\text{NA}} + \text{HS}_{\text{g}})$$

aus den anderen Komponenten. Die bezifferten Linien stellen die Vorhersagewerte für die Druckfestigkeit dar, die von dem Modell geliefert werden (Isobaren). Zu sehen ist beispielsweise, dass das Modell für CL90 = 0.6, CEM_{NA} = 0.1, HS_g = 0.2 (und somit KSTM = 0.1) eine

Druckfestigkeit von etwa 7 MPa vorhersagt. Der rote Punkt in der Abbildung ist ein durchgeführtes Experiment (mit $CL_{90} = 0.6$, $CEM_{NA} = 0.05$, $HS_g = 0.3$ und $KSTM = 0.05$ mit beobachteter Druckfestigkeit von 13.2 MPa). An dieser Stelle decken sich die Vorhersage und die durch ein Experiment verifizierte Druckfestigkeit sehr gut. Die Vorhersage des Modells kann jedoch nur in einer Umgebung um die schon getesteten Mischungen als aussagekräftig angenommen werden.

Modelle für CL 80 und Hüttensand; CL 90 und Trass; CL 80 und Trass

Das Modell für CL 90 und Hüttensand wurde oben ausführlicher analysiert. Da alle drei Modelle strukturell sehr ähnlich sind, werden die übrigen Modelle kürzer betrachtet.

Variable (CL80 Sand)	Schätzung	Variable (CL90 Trass)	Schätzung	Variable (CL80 Trass)	Schätzung
CL80	1.55	CL90	-0.66	CL80	1.62
CEMNA	5.83	CEMNA	6.64	CEMNA	4.6
CEMHS	5.62	CEMHS	6.71	CEMHS	4.68
HS_f	0.01	Trass_Eif	1.68	Trass_Eif	0.81
HS_g	1.8	Trass_Bay	0.07	Trass_Bay	0.95
KSTM	0.45	KSTM	-1.91	KSTM	1.46
CL80:HS_g	4.16	CL90:Trass_Bay	1.91	CL80:Trass_Bay	-0.34
CL80:HS_f	6.21	CL90:Trass_Eif	3.75	CL80:Trass_Eif	1.31
CL80:KSTM	-0.87	CL90:KSTM	6.97	CL80:KSTM	-1.92
CEMNA:HS_f	2.24	CEMNA:Trass_Eif	-2.84	CEMNA:Trass_Eif	7.97
CEMNA:HS_g	-1.83	CEMNA:Trass_Bay	-0.81	CEMNA:Trass_Bay	5.31
CEMHS:HS_f	3.36	CEMHS:Trass_Bay	0.53	CEMHS:Trass_Bay	5.16
CEMHS:HS_g	-2.72	CEMHS:Trass_Eif	-3.28	CEMHS:Trass_Eif	6.44
HS_f:KSTM	10.42	Trass_Eif:KSTM	0.44	Trass_Eif:KSTM	-3.61
HS_g:KSTM	7.63	Trass_Bay:KSTM	0.36	Trass_Bay:KSTM	-4.23

Tabelle 5.3.11: Regressoren und Schätzungen für die angepassten Modelle

In Tabelle 5.3.11 wird eine Modellübersicht von den ausgewählten erklärenden Variablen und den entsprechenden Schätzungen dargestellt. Die Tabellen mit den durchgeführten Versuchen sind im Anhang zu finden in (Tabellen: 8.5.2, 8.5.3, 8.5.4).

Es wird dieselbe graphische Analyse wie für das CL90- und Hüttensand-Modell durchgeführt. In Abbildung 5.3.16 werden die Lack-of-fit Plots dargestellt. Alle drei Plots deuten darauf hin, dass die Modelle sehr gut die beobachteten Druckfestigkeiten erklären.

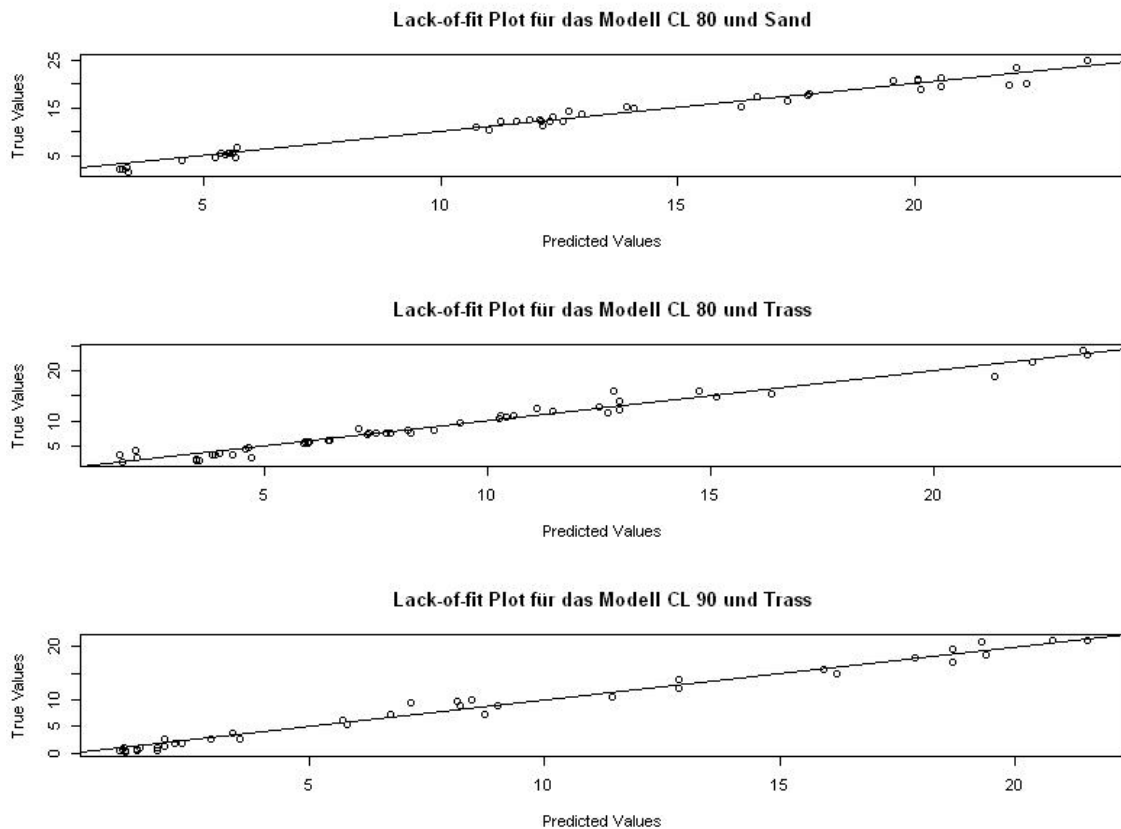


Abb. 5.3.16: Lack-of-fit Plot für die angepassten Modelle

Abbildung 5.3.17 zeigt die Residuen-plots für die vorhandenen Modelle. In dieser Abbildung sind weiterhin keine Indizien dafür zu sehen, dass die Modelle nicht valide sind. Die Residuen streuen unsystematisch um 0 und es sind keine deutlichen Abweichungen festzustellen. Die Lücken in den Abbildungen für CL80 – Hüttensand und für CL80 – Trass fallen auf. In diesen Bereichen wurden keine Druckfestigkeiten beobachtet.

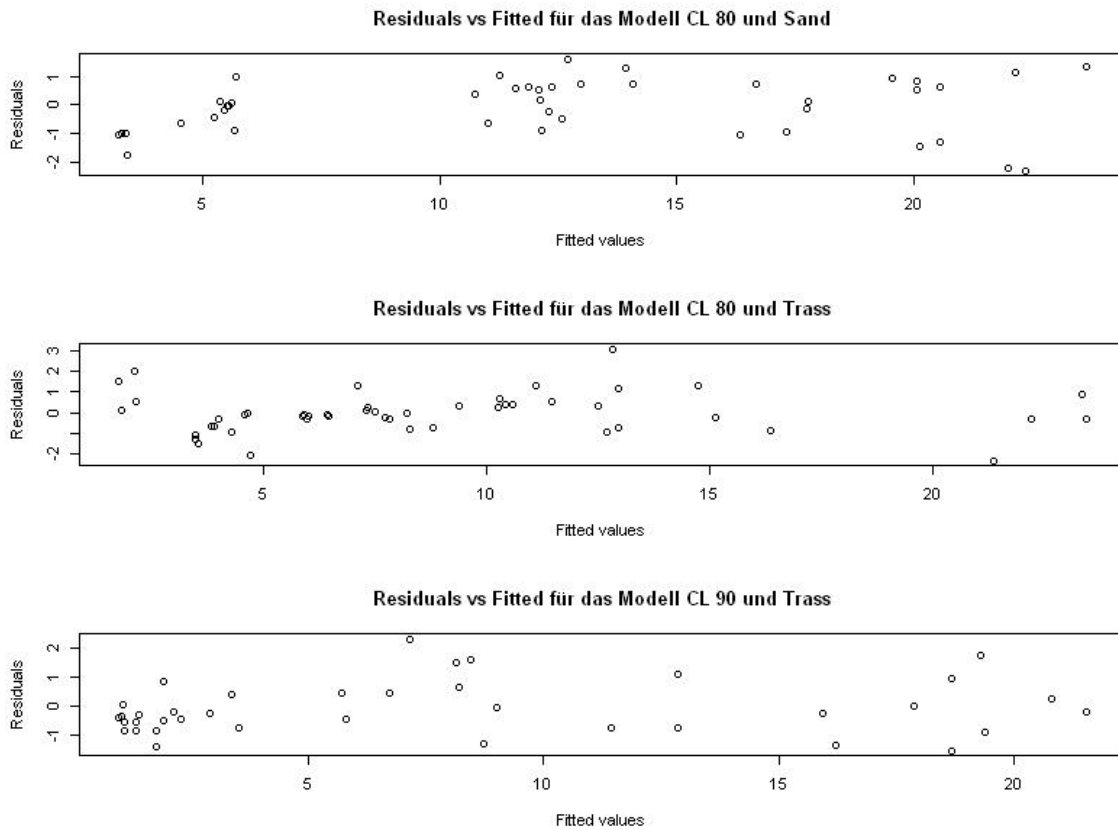


Abb. 5.3.17: Residuenplot für die angepassten Modelle

Die letzte Diagnostik, die zu prüfen ist, sind die QQ-Plots für die drei Modelle – in Abbildung 5.3.18. Diese zeigt, dass die Modellannahmen erfüllt sind, da die Residuen, abgetragen gegen die Quantile der Normalverteilung, auf der Linie mit 45 Grad Steigung liegen. Somit erklären die Modelle für CL80 und Hüttensand; CL90 und Trass sowie CL80 und Trass die beobachteten Druckfestigkeiten gut und sind validiert.

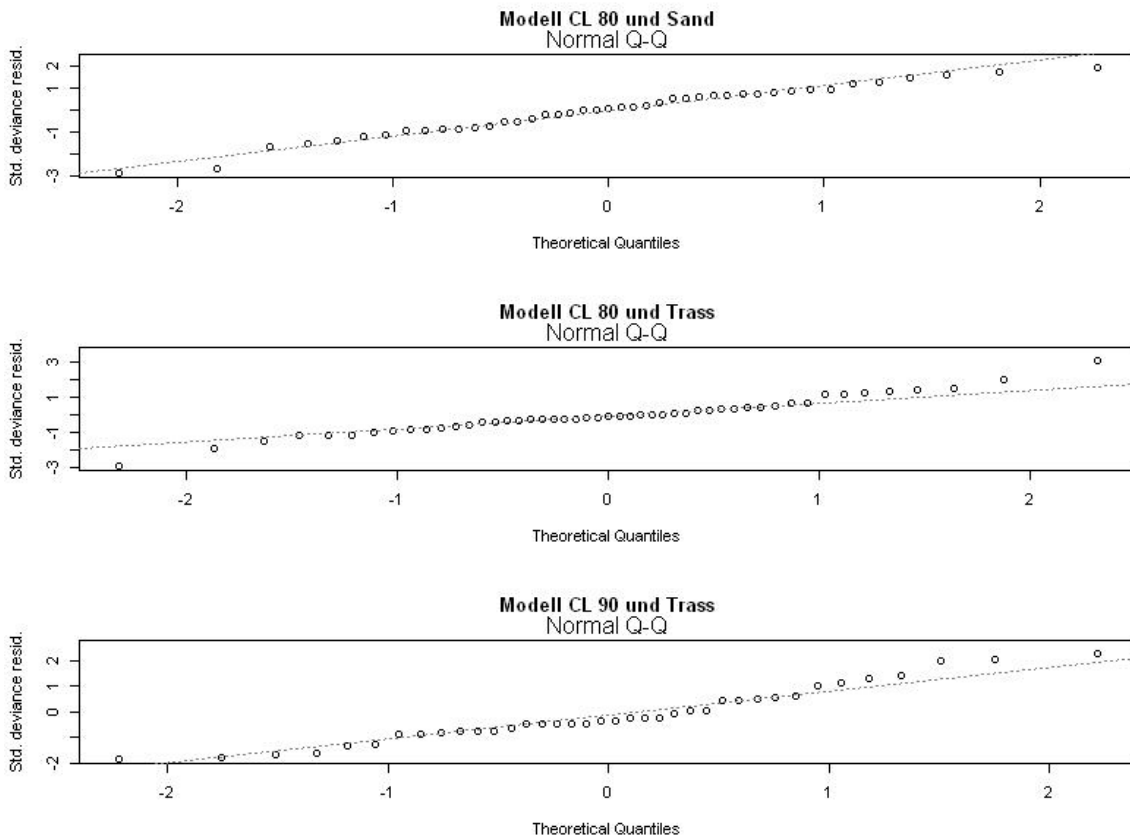


Abb. 5.3.18: QQ-Plots für die angepassten Modelle

5.3.14 Ergebnisse der statistischen Modelle

Die Ergebnisse aus den statistischen Modellen sind im Anhang dieser Arbeit in Form von 2D-Projektionen abgebildet (Abbildungen: 2D Projektionen der statistischen Modelle, Anhang). Dargestellt sind die Projektionen für konstante Kalkhydratgehalte von 20, 30, 40 und 50 Masse% der FL-Mischung. Auf der Abszisse der Graphen steht der Gehalt an CEM_{NA} oder CEM_{HS}. Auf der Ordinate stehen die Komponenten HS_f, HS_g, Trass_{Eif} oder Trass_{Bay}. Der Gehalt an Kalksteinmehl in der FL-Mischung ergibt sich nach

$$\text{KSTM} = 100 \text{ Masse\%} - (\text{Kalkhydrat} + \text{Zement} + \text{Hüttensand oder Trass})$$

Die Isobaren in den Graphen sind mit den Druckfestigkeiten [MPa] beschriftet.

Bei Kalkhydrat-Gehalten bis 50 Masse% ist die Schüttdichte der FL-Mischung größer als 0,60 kg/dm³ (Vgl. Kapitel: Auswirkungen der Schüttdichte des Kalkhydrats auf den W/B nach EN 459-2). Betrachtet man nur die Isobaren bis zu einem Maximal-Wert von 10 MPa, so kann man, da das Modell auf einem W/B = 0,55 basiert, aus den Graphiken direkt die normativ gültige Druckfestigkeitsklasse des FL ablesen.

Als Ergebnisse der statistischen Modelle lassen sich aus den Graphiken ableiten:

- Aus allen statistischen Modellen geht hervor, dass sich die 28d DF einer FL-Mischung nicht unterscheidet, wenn man CEM_NA gegen CEM_HS austauscht (Vgl. Kapitel: Charakterisierung der Rohstoffe → Zement).
- Bei allen Modellen erreicht man bezüglich ein und derselben FL-Zusammensetzung bei Verwendung des CL80 eine um 2 – 6 MPa höhere Druckfestigkeit als mit CL90 (Vgl. Kapitel: Charakterisierung der Rohstoffe → Kalkhydrat).
- Bleibt man mit der Zugabe von CL80 oder CL90 im FL unter 50 Masse%, so kann man aus den statistischen Modellen, solange die 28d DF unter 10 MPa liegt, die FL-Klasse (2 oder 3,5) direkt herleiten. Der für die Modelle gewählte W/B-Wert von 0,55 entspricht unter diesen Umständen dem nach EN 459-2 geforderten.
- Für Gehalte von CEM + HS > 50 Masse% im FL wird die Vorhersage der 28d DF ungenau, da in diesem Bereich zu wenige Mischungen getestet wurden (Vgl. Kapitel: Statistische Modelle → Vorversuche und Einschränkungen zur Reduktion der Versuchszahl).
- Im System CL80/CEM/HS/KSTM sinkt bei CL80-Gehalten < 30 Masse% die Druckfestigkeit bei einem HS-Gehalt > 50%. Dies ist im System CL90/CEM/HS/KSTM nicht zu beobachten. Wahrscheinlich ist bei CL80-Gehalten von < 30 Masse% der Available Lime Gehalt zu niedrig, um eine Hydratation des Hüttensands zu bewirken (Vgl. Kapitel: FL-Komponenten, daraus hergestellte Bindemittel und Mörtel → Hüttensand).
- HS_f und HS_g verhalten sich in den FL hinsichtlich der 28d DF gleich (Vgl. Kapitel: DF-Vergleich: HS_g / HS_f in Formulierten Kalken). Lediglich bei einem HS-Gehalt > 50% erreicht man bei gleicher FL-Zusammensetzung mit HS_g bei CEM < 15% deutlich (2 – 6 MPa) höhere Druckfestigkeiten. Für CEM > 15% dreht sich dieser Sachverhalt um. Bei Hüttensandgehalten > 50 Masse% wird das Vorhersagemodell allerdings ungenau, da eine der Einschränkungen zur Reduktion der Versuchszahl war: Hüttensand + Zement < 50 Masse%.
- Im Modell CL80/CEM/HS_g/KSTM nimmt, bei CL80 < 0,25 Masse%, die 28d DF bei Zugabe von CEM, von 0 auf 20 % ab, wenn der Gehalt an HS = 60 % beträgt. Hier zeigt sich wieder, dass die Modelle für Gehalte von CEM + HS > 0,5 % nicht mehr gut angepasst sind.
- Mit Trass_Eif erhält man bei gleicher FL-Zusammensetzung um 1 – 7 MPa höhere 28d DF als mit Trass_Bay (Vgl. Kapitel: Vergleich von Mischungen mit Trass_Bay gegenüber Mischungen mit Trass_Eif).

- Im Modell CL80/CEM/Trass/KSTM ist die druckfestigkeitsbestimmende Komponente der Zement. Eine Erhöhung des Trass-Gehalts von 10 auf 50 Masse% wirkt sich, bei CEM = const. auf die 28d DF mit lediglich einer Erhöhung von 1 -3 MPa aus.
- Im Modell CL90/CEM/Trass/KSTM verhalten sich die beiden Trasse ziemlich unterschiedlich. Während sich die 28d DF, genau wie im Modell mit CL80, bei einer Erhöhung des Trass_Bay-Gehalts von 10 auf 50 Masse% um 1 – 3 MPa erhöht, steigt sie im Modell mit Trass_Eif deutlich, um 3 – 8 MPa.

5.3.15 Bedienungsanleitung: EDV-gestützte Berechnungshilfe zum statistischen Modell

Aus den Daten der statistischen Modelle wurde eine EDV-gestützte Berechnungshilfe erstellt, welche bei einer Eingabe der FL-Zusammensetzung die 28T Druckfestigkeit der Mischung bei einem W/B = 0,55 berechnet. Abbildung 5.3.19 zeigt die Benutzeroberfläche der EDV-gestützten Berechnungshilfe.

- In dem oberen Drittel der Oberfläche wählt man 3 Komponenten aus. Aus dem linken Kästchen wählt man entweder das Kalkhydrat CL90 oder das Kalkhydrat CL80. Aus dem mittleren Kästchen wählt man entweder den Zement CEM_NA oder den Zement CEM_HS. Aus dem rechten Kästchen wählt man entweder das Hüttensandmehl HS_f, das Hüttensandmehl HS_g, das Trassmehl Trass_Eif oder das Trassmehl Trass_Bay. Kalksteinmehl muss nicht ausgewählt werden, da sein Massenanteil in der FL-Mischung durch den Massenanteil der übrigen Komponenten geregelt ist.
- In dem mittleren Drittel der Benutzeroberfläche trägt man auf der linken Seite (grüne Kästchen) die Massenanteile der gewünschten Zusammensetzung ein. Hierbei ist zu beachten, dass die Massenanteile der Komponenten nicht in % angegeben werden, sondern in 0,01 %. Die Summe aller Komponenten addiert sich zu 1. Weiterhin ist zu beachten, dass statt einem Komma ein Punkt verwendet wird (statt 0,1 wird 0.1 eingegeben).
- Wenn alle Komponenten eingegeben sind, drückt man auf den „Mischen“-Button. Im großen grünen Kästchen wird dann die für die gewählte Zusammensetzung berechnete Druckfestigkeit in [MPa] angegeben. In demselben Kästchen können auch folgende Fehlermeldungen erscheinen, die sich aus den Einschränkungen zur Reduktion der Versuchszahl ergeben (Vgl. Kapitel: Statistische Modelle):
 - CL90 muss weniger als 0.8 sein → In diesem Fall wird keine Druckfestigkeit angezeigt.
 - CL90 muss mehr als 0.15 sein → In diesem Fall wird keine Druckfestigkeit angezeigt.
 - CL80 muss mehr als 0.2 sein → In diesem Fall wird keine Druckfestigkeit angezeigt.
 - CEM muss weniger als 0.5 sein → In diesem Fall wird keine Druckfestigkeit angezeigt.

- Die Summe der Komponenten muss 1 ergeben → In diesem Fall wird keine Druckfestigkeit angezeigt.
- Vorsicht: für Mischungen mit Zement + Sand > 0.50 ist die Vorhersage weniger informativ. → Die angegebene Druckfestigkeit ist mit einem großen Fehler behaftet.

In allen Fällen, in denen die Druckfestigkeit 20 MPa übersteigt erscheint zusätzlich folgende Fehlermeldung:

- Vorsicht: Druckfestigkeiten > 20 MPa liegen außerhalb des nach EN 459 zugelassenen Bereichs → In diesem Fall wird keine Druckfestigkeit angezeigt.

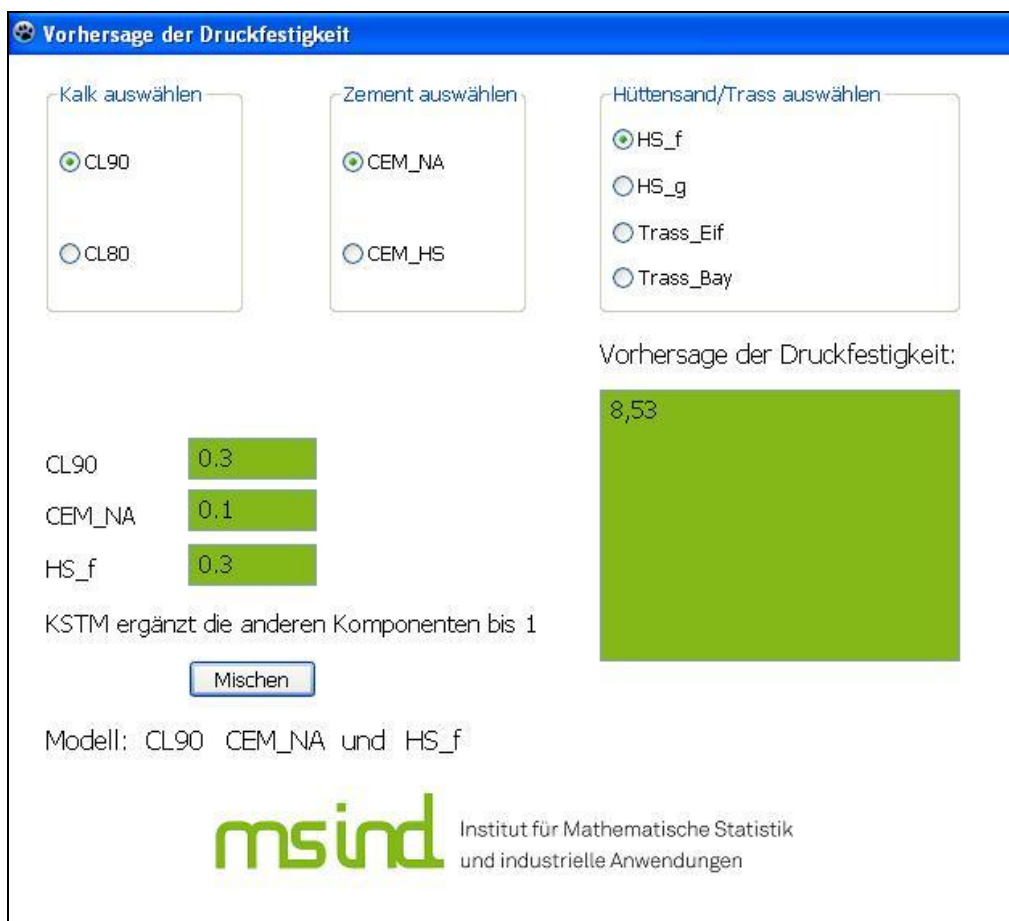


Abb. 5.3.19: Benutzeroberfläche der EDV-gestützten Berechnungshilfe

5.4 Charakterisierung der aus den Formulierten Kalken hergestellten Mörtel

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchungen wurde eine Reihe von FL-Mischungen ausgewählt, die ein breites Spektrum der Mischungsmöglichkeiten abdecken, um weiterführende Mörtelanalysen durchzuführen.

Nr.	CL90 [%]	CL80 [%]	CEM_HS [%]	HS_g [%]	Trass_Bay [%]	Trass_Eif [%]	FL-Klasse	Zusammensetzung des Trockenmörtels	Ausbreitmaß [mm]	Wasser / Trockenmörtel	Rohdichte des Frischmörtels [kg/m ³]	28d DF [MPa]	Druckfestigkeitsklasse	28d BZ [MPa]	Dyn. E-Modul mittels Resonanzfrequenz [N/mm ²]	Festmörtelrohichte [kg/dm ³]
1		46,4	20		33,6		B/C 3,5	12 % FL + 88 % KST-Brechsand	189	0,15	2140	1,5	M1, CS I	0,6	3000	1,91
2		75,5	10			14,5	A 3,5		185	0,15	2130	1,0	CS I	0,4	2000	1,91
3		80		20			A 5		187	0,15	2120	1,8	M1, CS I	0,4	3700	1,90
4	70			30			A 5		187	0,16	2110	1,4	M1, CS I	0,5	2700	1,88
5	60		40				A 5		190	0,15	2110	1,9	M1, CS I	0,6	3600	1,91
6	45		10			45	B 3,5		181	0,14	2140	0,8	CS I	0,1	1600	1,92
7	46,4		20		33,6		A/B 2		181	0,15	2130	0,8	CS I	0,4	1350	1,92
8		80	20				A 5		181	0,15	2130	1,7	M1, CS I	0,7	3700	1,91

Tab. 5.4.1: Charakterisierung einiger FL-basierter Mörtel vor und nach 28 Tagen

Nr.	CL90 [%]	CL80 [%]	CEM_HS [%]	HS_g [%]	Trass_Bay [%]	Trass_Eif [%]	FL-Klasse	Zusammensetzung des Trockenmörtels	Ausbreitmaß [mm]	Wasser / Trockenmörtel	Rohdichte des Frischmörtels [kg/m ³]	56d DF [MPa]	56d BZ [MPa]	Dyn. E-Modul mittels Resonanzfrequenz [N/mm ²]	Festmörtelrohichte [kg/dm ³]	Carbonatisierungstiefe [mm]
1a		46,4	20		33,6		B/C 3,5	12 % FL + 88 % KST-Brechsand	189	0,15	2140	1,6	0,5	3210	1,92	2,0
2a		75,5	10			14,5	A 3,5		185	0,15	2130	1,1	0,3	3120	1,91	1,5
3a		80		20			A 5		187	0,15	2120	2,0	0,4	2100	1,89	1,5
4a	70			30			A 5		187	0,16	2110	1,5	0,3	2620	1,88	1,5
5a	60		40				A 5		190	0,15	2110	2,1	0,7	4130	1,92	1,5
6a	45		10			45	B 3,5		181	0,14	2140	0,8	0,1	1490	1,93	2,0
7a	46,4		20		33,6		A/B 2		181	0,15	2130	0,7	0,2	1690	1,91	2,0
8a		80	20				A 5		181	0,15	2130	1,8	0,7	4030	1,91	1,5

Tab. 5.4.2: Charakterisierung einiger FL-basierter Mörtel vor und nach 56 Tagen

Die Tabellen 5.4.1 bis 5.4.4 zeigen die Ergebnisse der Frischmörtel- und Festmörtel-Versuche. Die Versuche erfolgten mit einer Trockenmörtel-Mischung aus 12 Masse% Formuliertem Kalk und 88 Masse% Kalksteinbrechsand (Körnung: 0 – 4 mm).

Nr.	CL90 [%]	CL80 [%]	CEM_NA [%]	CEM_HS [%]	HS_f [%]	Trass_Bay [%]	Trass_Eif [%]	KSTM [%]	FL-Klasse	Zusammensetzung des Trockenmörtels	Ausbreitmaß [mm]	Wasser / Trockenmörtel	28 d DF [MPa]	28 d BZ [MPa]	7 d DF [MPa]	7 d BZ [MPa]
A	30		25		5			40	B/C 3,5;5	12 % FL + 88 % KST-Brechsand	171	0,14	2,3	0,8	1,1	0,5
B	30		5		25			40	B/C 3,5;5		168	0,14	2,5	0,5	1,1	0,6
C	46,4			20		33,6			A/B 3,5		170	0,17	0,9	0,5	0,4	0,3
D		46,4		20		33,6			B/C 3,5;5		174	0,16	1,5	0,8	0,8	0,5
E		80		20					A 5		171	0,15	1,5	0,5	1,1	0,4
F		80			20				A 5		174	0,15	1,9	0,6	0,9	0,4
G	45			10			45		B 3,5		171	0,15	0,8	0,3	0,5	0,3
H	20			10			70		C 3,5		172	0,15	1,1	0,2	0,8	0,5
I	70				30				A5		175	0,16	2,0	0,5	1,0	0,7
J	50				30			20	A3		174	0,15	1,7	0,4	1,1	0,6

Tab. 5.4.3: Charakterisierung der FL-basierten Mörtelproben A bis J – Teil 1

Nr.	CL90 [%]	CL80 [%]	CEM_NA [%]	CEM_HS [%]	HS_f [%]	Trass_Bay [%]	Trass_Eif [%]	KSTM [%]	FL-Klasse	Zusammensetzung des Trockenmörtels	+ 28 d in Sulfatlösung DF [MPa]	+ 28 d in Sulfatlösung BZ [MPa]	Gesamtporosität [Vol.-%]	Wasseraufnahmekoeffizient [w]	F-T-W Absandungen [g]	Längenänderung 28 d [mm/m]
A	30		25		5			40	B/C 3,5;5	12 % FL + 88 % KST-Brechsand	2,1	0,9	24,1	1,83	0,04	1,070
B	30		5		25			40	B/C 3,5;5		2,6	1,2	23,8	1,94	0,06	1,916
C	46,4			20		33,6			A/B 3,5		1,1	0,9	25,5	2,50	0,30	0,933
D		46,4		20		33,6			B/C 3,5;5		1,7	1,1	24,1	2,21	0,02	0,833
E		80		20					A 5		-	-	23,7	1,82	0,02	0,773
F		80			20				A 5		-	-	24,7	1,67	0,06	0,507
G	45			10			45		B 3,5		-	-	27,8	1,49	0,13	2,944
H	20			10			70		C 3,5		-	-	25,7	1,50	0,43	1,558
I	70				30				A5		-	-	22,5	1,45	0,02	2,291
J	50				30			20	A3		-	-	25,8	1,59	0,04	2,218

Tab. 5.4.4: Charakterisierung der FL-basierten Mörtelproben A bis J – Teil 2

Aufgrund einer Reihe von Variablen in den Mischungszusammensetzungen sind die Ergebnisse der Mörteluntersuchungen für die Proben A bis J einander lediglich vergleichend gegenübergestellt.

Porosität

Die mittels der Quecksilberdruckporosimetrie ermittelten Gesamtporositäten der Mischungen sind in Abbildung 5.4.1 dargestellt. Sie umfassen den Bereich der Luftporen, Kapillarporen und Gelporen.

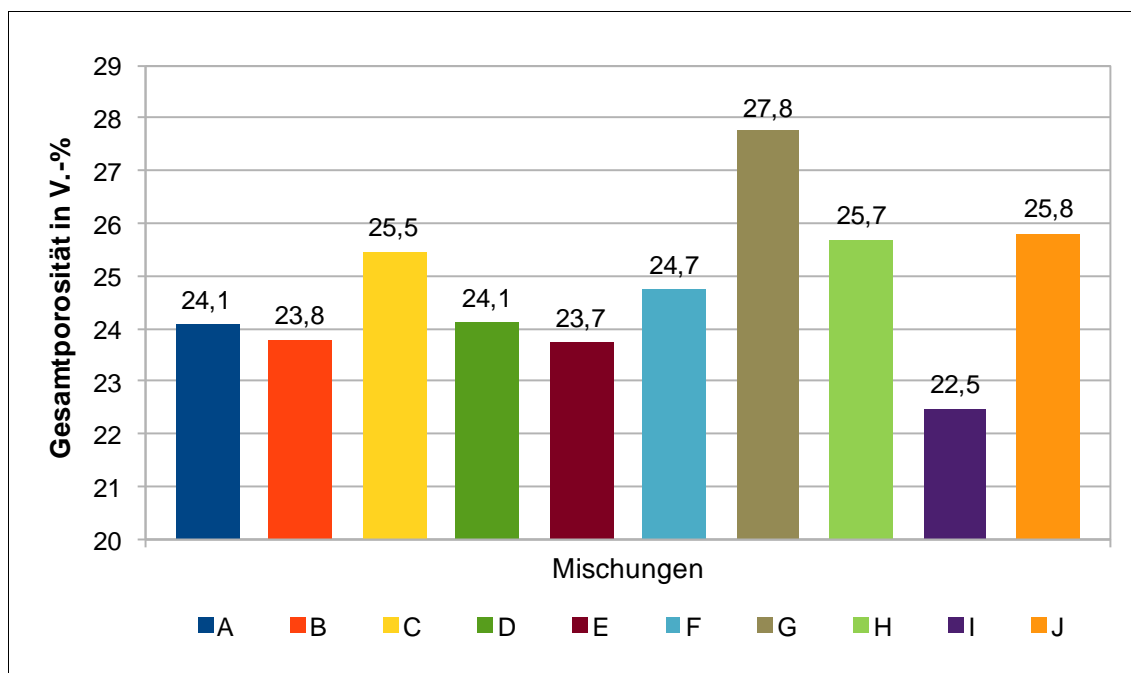


Abb. 5.4.1: Gesamtporosität der Mörtelmischungen in V.-%

Die Gesamtporosität in Vol.-% variiert zwischen 22,5 und 27,8. Während die Proben A und B sowie E und F, die sich jeweils durch ihren unterschiedlichen Zement- und Hüttensandanteil unterscheiden, ähnliche Werte aufweisen, sind für andere Proben größere Unterschiede zu verzeichnen. Für die Proben C und D, die in ihrer Kalksorte variieren, ist eine geringfügig höhere Porosität für die Mischung mit dem CL 90 vorhanden. Im Vergleich der Proben G und H, bei denen sich der Kalk- und Trassanteil gegenläufig zueinander verhalten, ist eine höhere Gesamtporosität für die Mischung mit dem geringen Trassanteil zu verzeichnen. Den mit 3,5 Prozentpunkten markantesten Unterschied weisen die Proben I und J auf. Hier bewirkt die teilweise Substitution von Kalkhydrat durch Kalksteinmehl eine gesteigerte Porosität.

In Abbildung 5.4.2 sind die benötigten Wassermengen zusammengestellt, die für 1.875 g Trockenmörtel ein Ausbreitmaß von 17 cm ergeben. Diese variieren zwischen 310 und 265 g.

Grundsätzlich ist mit zunehmendem Wassergehalt in den Mischungen eine Steigerung der Porosität zu erwarten, da zusätzliches Überschusswasser verdunstet und einen erhöhten Kapillarporenanteil zurücklässt (Stark & Wicht 2000).

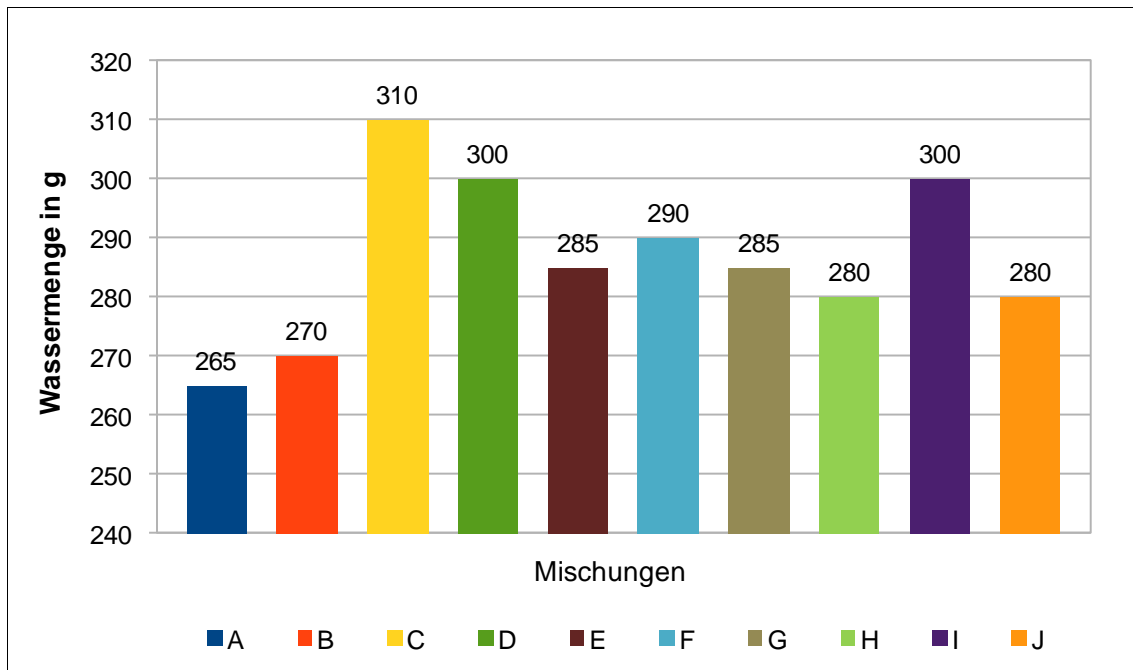


Abb. 5.4.2: Benötigte Wassermenge für ein Ausbreitmaß von 17 cm

Abweichungen dazu treten bei den Proben C, D, G und I auf. Die Bindemittelzusammensetzung der Proben C und D beinhaltet jeweils 34 % Trass_Bay. Die Proben G und H beinhalten ebenfalls Trass, jedoch handelt es sich hierbei um Trass_Eif. Die Anteile an Kalk und Zement liegen bei diesen Mischungen im Vergleich zu den restlichen Proben im Mittelfeld. Während für Mischungen mit Trass_Bay der Wasseranspruch bereits bei geringeren Mengen deutlich steigt, liegt die Gesamtporosität davon wenig beeinflusst im durchschnittlichen Bereich. Der erhöhte Wasseranspruch wird hier durch das Tonmineral Montmorillonit verursacht (Kap. 5.1.5 und 2.2.4). Für die beiden Mischungen mit Trass_Eif ist trotz vergleichbaren Wasseranspruchs eine deutlich geringere Gesamtporosität bei dem höheren Trassgehalt (70 % bei Probe H) zu verzeichnen. Der Grund für den gesteigerten Wasseranspruch der Mischung G, mit dem keine erhöhte Porosität einhergeht, liegt an den Mineralen Analcim und Chabasit, die in ihrer Kristallstruktur sehr große Hohlräume enthalten in die Wasser aufgenommen werden kann.

Ferner weist Probe I trotz des vergleichsweise hohen Wasseranteils die geringste Gesamtporosität auf. Für diese Probe ist ein relativ hoher Anteil an Kalkhydrat (70 % CL 90) zu verzeichnen. Die teilweise Substitution mit Kalksteinmehl (Probe J) verringert den Wasseranspruch, führt aber zu vergleichsweise höherer Porosität (siehe auch Proben A und B).

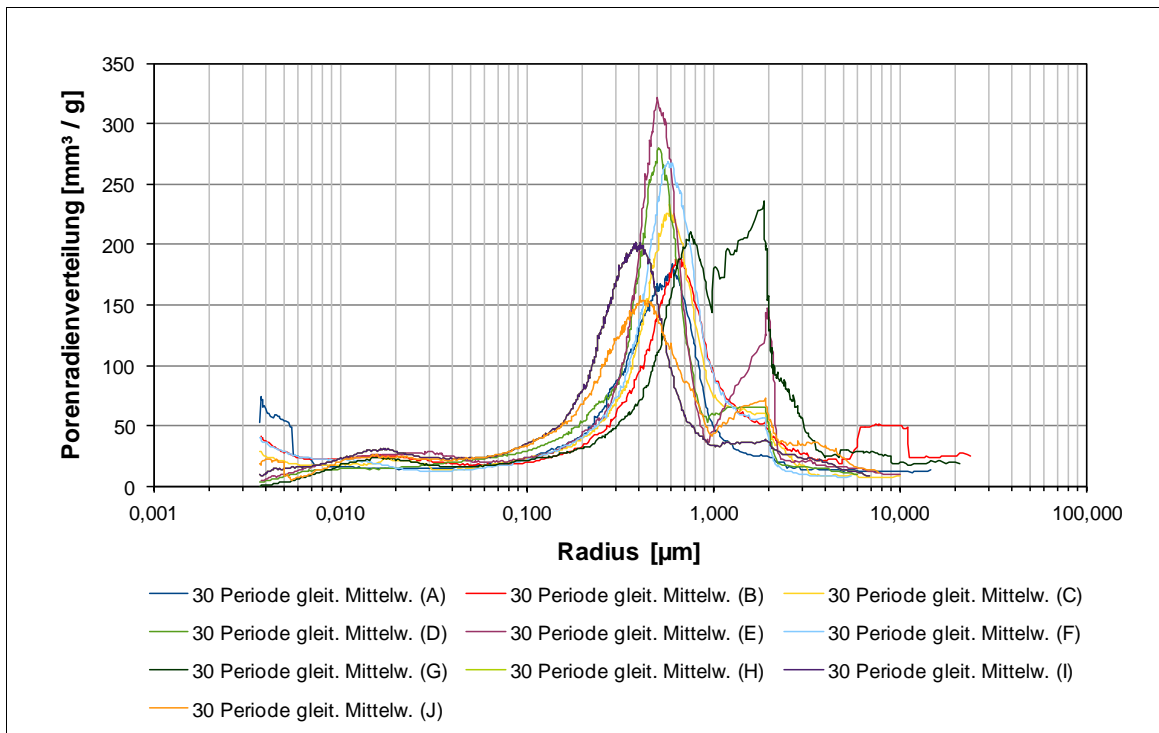


Abb. 5.4.3: Porenradienverteilung der Proben A bis J

Die Porenradienverteilung aller untersuchten Proben wird in Abbildung 5.4.3 für Porenradien der Kapillarporen mit einem Durchmesser von 0,004 bis 10 μm dargestellt. Das Maximum nahezu aller Proben liegt zwischen 0,3 und 0,8 μm . Vereinzelt ist eine bimodale Verteilung erkennbar.

Für eine bessere Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit ist in den folgenden Abbildungen jeweils nur die Porenradienverteilung ausgewählter Proben dargestellt. Die Abbildung 5.4.4 zeigt die Porenradienverteilung für die Proben A und B sowie E und F, die sich jeweils durch ihren Anteil an Zement und Hüttensand unterscheiden. Für die Proben A und B ist ein ähnlicher Kurvenverlauf mit einem vergleichbar ausgeprägten Maximum zwischen 0,6 und 0,7 μm zu verzeichnen. Die Kurve der Probe A verläuft jedoch leicht versetzt im feineren Bereich. Während für Probe B ein erhöhter Porenanteil mit einem Durchmesser von 5 bis 10 μm gemessen wurde, weist die Probe A einen leicht erhöhten Anteil von Poren mit einem Durchmesser von 0,003 bis 0,006 μm auf. Aufgrund eines wiederholten Abbruchs der Messung ist dieser Bereich nicht näher erfasst.

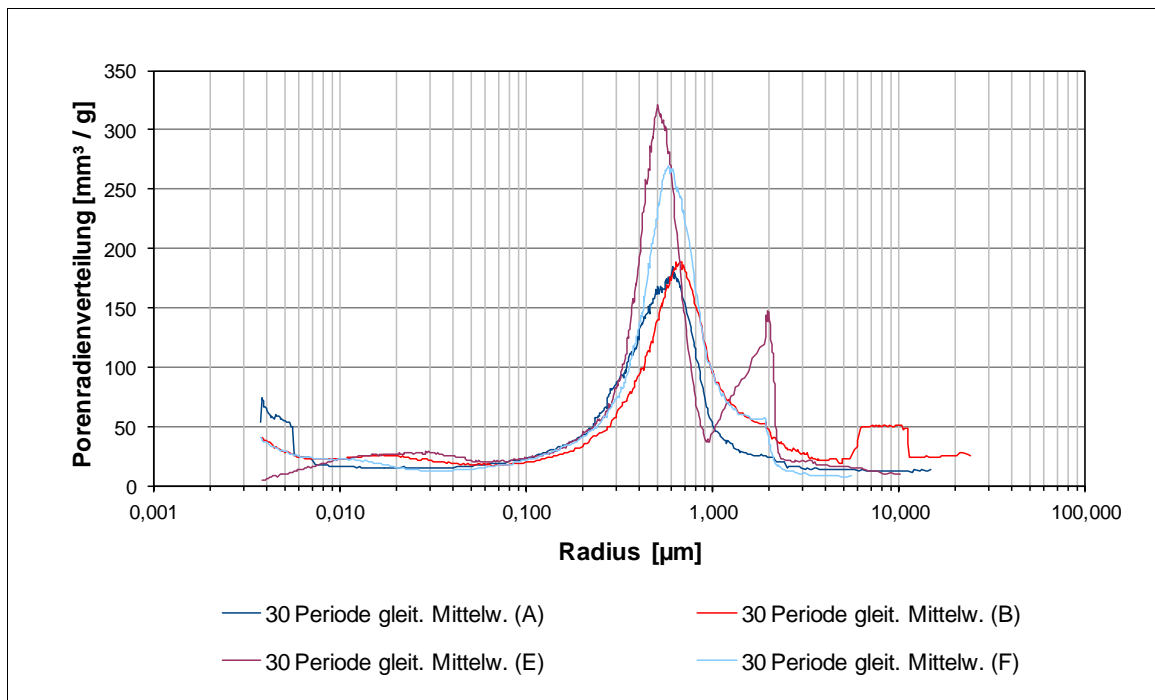


Abb. 5.4.4: Porenradialverteilung der Proben A und B sowie E und F

Die Proben E und F unterscheiden sich ebenfalls im Zement- und Hüttensandanteil. Anders als bei den Proben A und B wurden hier größere Mengen des Kalkhydrats CL 80 und kein Kalksteinmehl verwendet. Die Maxima der Proben E und F liegen ähnlich wie die Proben A und B bei 0,5 und 0,6 μm, sind jedoch deutlich ausgeprägter. Für die Probe E ist ein zweites deutliches Maximum bei 2 μm zu verzeichnen, das bei Probe F nur andeutungsweise auftritt. Allein auf die Substitution von Hüttensand durch Zement kann das Auftreten des zweiten Maximums jedoch nicht eindeutig zurückzuführen sein, da dieses Verhalten für die Proben A und B nicht festzustellen ist. Des Weiteren weisen weitere Proben ein zweites Maximum bei etwa 2 μm auf, obwohl sie statt Zement Hüttensand beinhalten.

Beim Vergleich der Proben C und D (Abb. 5.4.5), die sich durch das verwendete Kalkhydrat unterscheiden, fällt auf, dass das Maximum für Probe D ausgeprägter ist. Eine vergleichbare Ausprägung des Kurvenverlaufs ist für die Proben E und F zu erkennen, die ebenfalls CL 80 beinhalten.

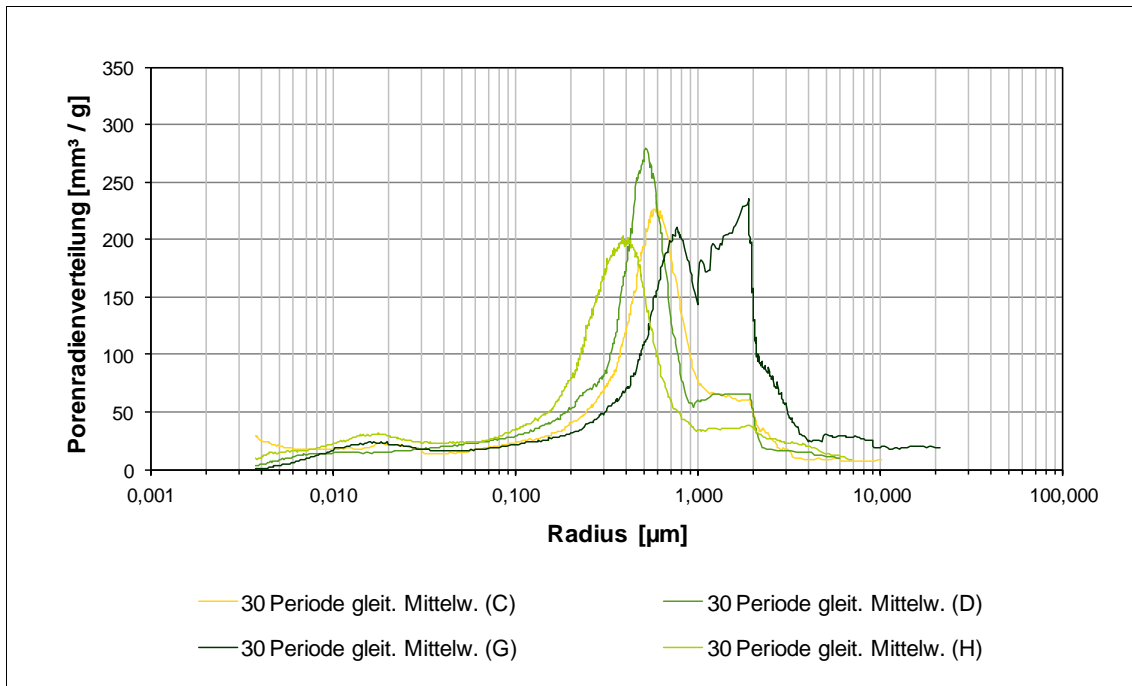


Abb. 5.4.5: Porenradialverteilung der Proben C und D sowie G und H

Die teilweise Substitution von Kalkhydrat durch Trass_Eif bewirkt bei den Proben G und H (Abb. 5.4.5) eine deutliche Verschiebung des Maximums von 0,8 μm in einen Bereich kleinerer Porendurchmesser von 0,4 μm . Der erhöhte Trassgehalt bewirkt hier ein dichteres und feineres Porengefüge, das sich auch in der Gesamtporosität auswirkt (Abb. 5.4.1). Für das ausgeprägte zweite Maximum bei 1,5 μm für Probe G und die damit verbundene hohe Gesamtporosität konnte im Rahmen dieser Untersuchungen kein näherer Zusammenhang gefunden werden.

Kapillare Wasseraufnahme

Die Untersuchungsergebnisse zur kapillaren Wasseraufnahme sind in Abbildung 5.4.6 in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Alle untersuchten Proben erreichten nach weniger als 300 Minuten ihre maximale Wasseraufnahme. Für die Proben C und D, die beide Trass_Bay enthielten, war in der geringsten Zeit die mitunter höchste Wasseraufnahme zu verzeichnen. Bei den Proben E und F sowie I und J war der Zeitraum bis zur maximalen Wasseraufnahme am höchsten. Diese Proben zeichnen sich durch vergleichsweise hohe Anteile von Kalkhydrat aus (80% CL 80 bei E und F und 70% bzw. 50% bei I und J). Für die Proben G und H, die beide Trass_Eif enthielten, war die geringste Wasseraufnahme zu verzeichnen.

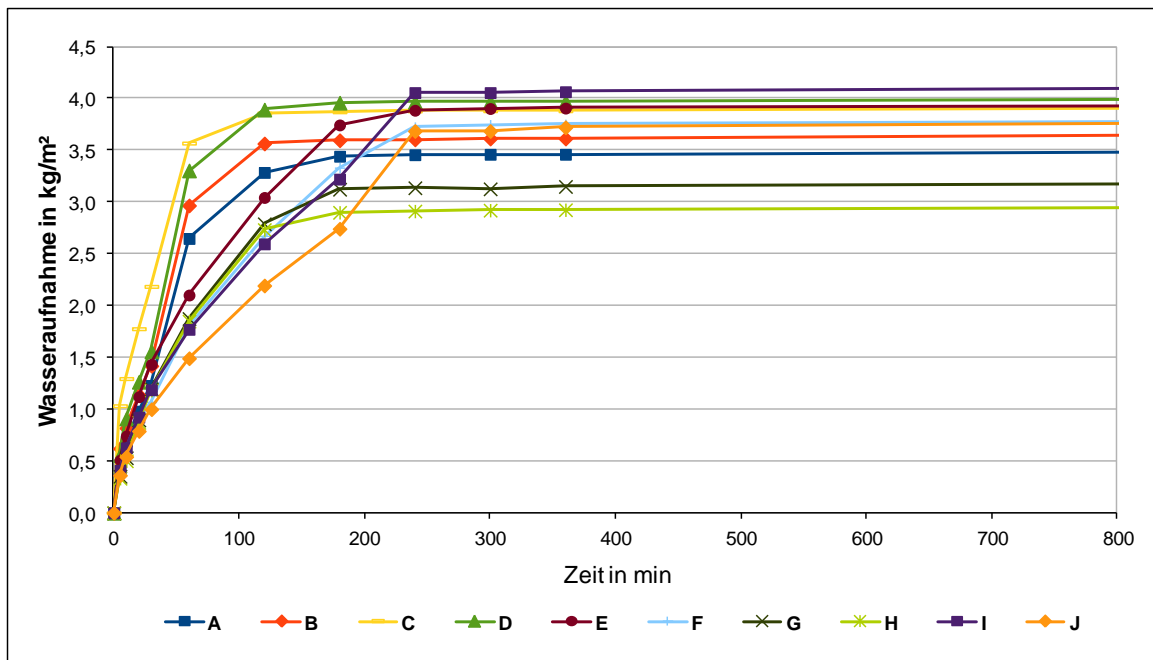


Abb. 5.4.6: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Zeit

Frost-Tau-Widerstand

Die Untersuchungen zum Frost-Tau-Widerstand ergaben für sämtliche Mörtelproben keine besonderen Auffälligkeiten. Es waren lediglich geringfügige Absandungen zu verzeichnen, deren Mengen in Tabelle 5.4.5 zusammengestellt sind. Die erhöhten Werte der Proben C und H sind auf ein Auseinanderbrechen der Proben im Zuge der Umlagerung zurückzuführen.

Probe	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Menge [g]	0,04	0,06	0,30*	0,02	0,02	0,06	0,13	0,43*	0,02	0,04

Tab. 5.4.5: Menge der Absandungen nach 15 Frost-Tauwechseln

Gefügeausbildung / Lichtmikroskopie

Die Ergebnisse der lichtmikroskopischen Gefügeuntersuchungen der FL-Mörtel sind im Folgenden anhand ausgewählter Proben dargestellt. Bei Betrachtung der Dünnschliffe im gekreuzten polarisierten Licht lassen sich die Bindemittelzusammensetzung, die Gesteinskörnung sowie Poren und Risse identifizieren.

Für sämtliche Proben (Abb. 5.4.7 – 5.4.12) ist eine gute Einbindung der Gesteinskörnung (a) in die Bindemittelmatrix (b) erkennbar. Anhand der bräunlichen Färbung ist für alle Proben eine fortgeschrittene Carbonatisierung im Randbereich zu verzeichnen. Für Probe A ist diese Carbonatisierung auch im mittleren Bereich ausgeprägter zu erkennen als bei den anderen Proben (Abb. 5.4.8, 5.4.10 und 5.4.12). Das Porengefüge variiert bei den hier dargestellten Proben.

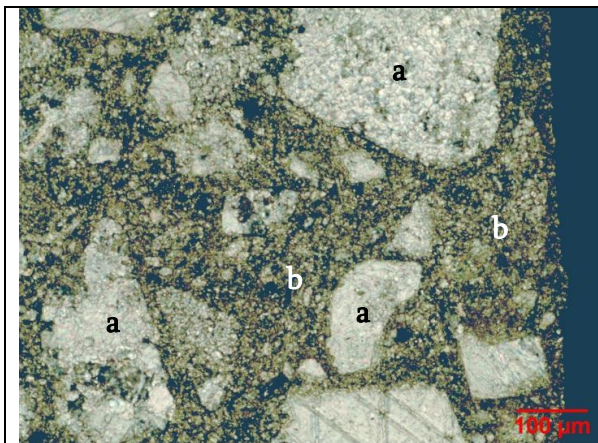


Abb. 5.4.7: Dünnschliffaufnahme der Probe A, Randbereich

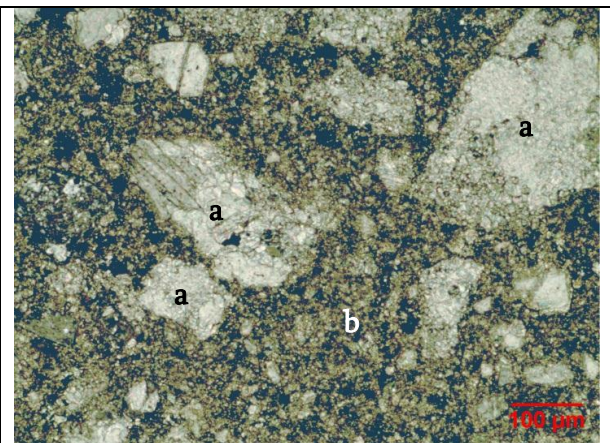


Abb. 5.4.8: Dünnschliffaufnahme der Probe A, mittlerer Bereich

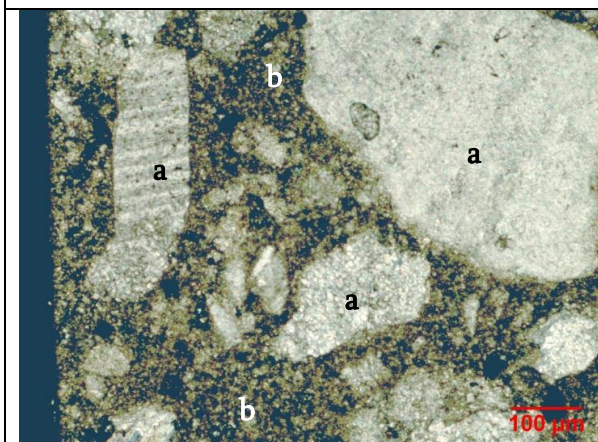


Abb. 5.4.9: Dünnschliffaufnahme der Probe F, Randbereich

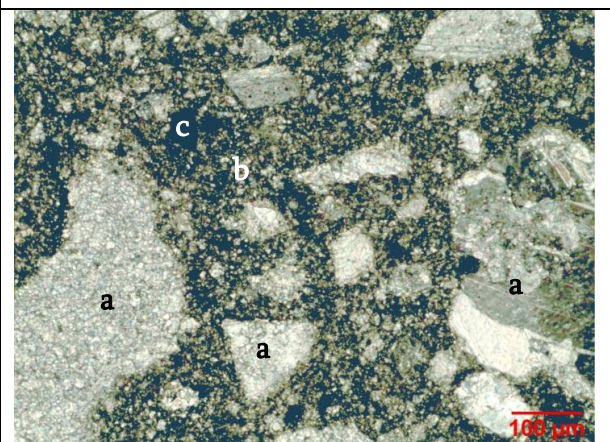


Abb. 5.4.10: Dünnschliffaufnahme der Probe F, mittlerer Bereich

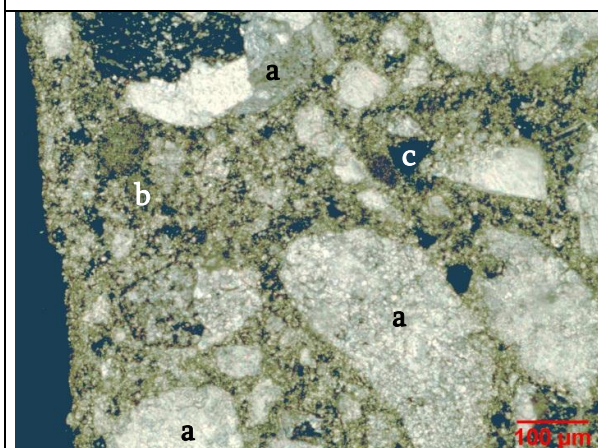


Abb. 5.4.11: Dünnschliffaufnahme der Probe J, Randbereich

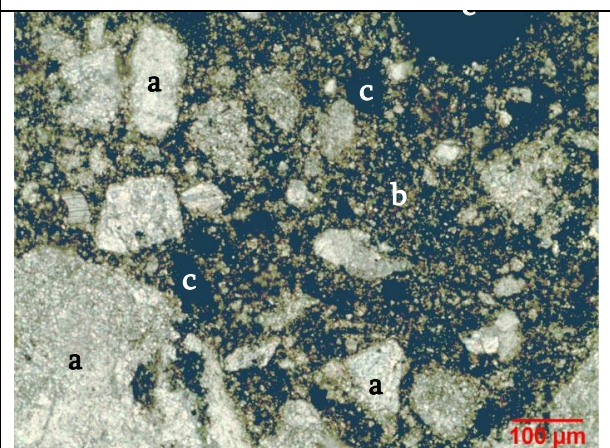


Abb. 5.4.12: Dünnschliffaufnahme der Probe J, mittlerer Bereich

Während für Probe A kaum ausgeprägtere Poren (c) zu verzeichnen sind, treten diese bei Probe F vereinzelt auf. Bei Probe J sind sowohl in Anzahl als auch Größe (siehe Abb. 5.4.12, obo-

rer rechter Bildrand) mehr Poren zu verzeichnen. Diese Beobachtungen korrelieren mit der gemessenen Gesamtporosität. Auffällige Verdichtungs-poren oder Risse sind in keiner der Proben vorhanden.

Quellen und Schwinden

Das Quell- und Schwindverhalten sämtlicher Mörtelmischungen über einen Zeitraum von 28 Tagen ist in Abbildung 5.4.13 dargestellt.

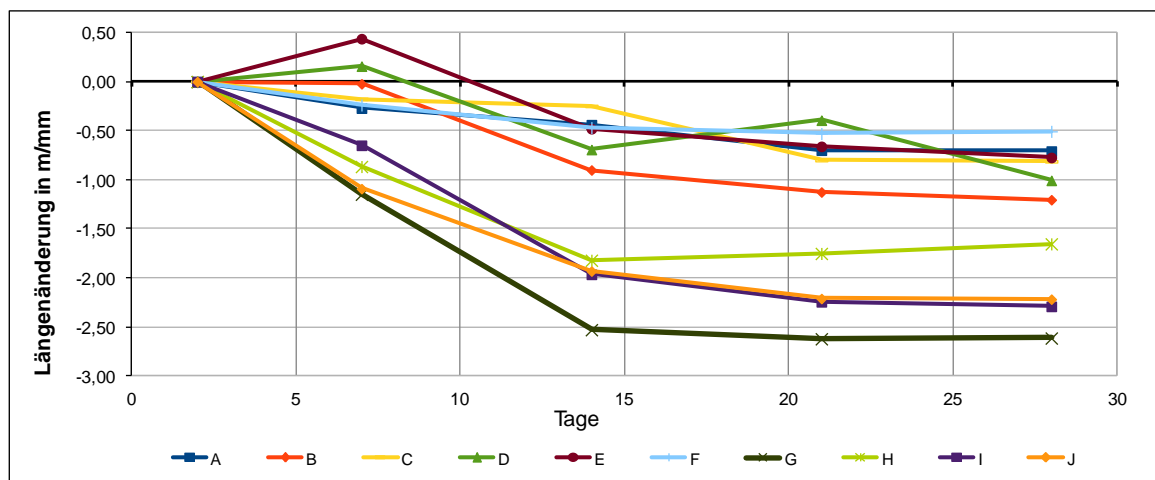


Abb. 5.4.13: Längenänderung der Proben A bis J über einen Zeitraum von 28 Tagen

Für sämtliche Proben ist nach 28 Tagen ein Schwinden zu beobachten, das bei Proben mit geringerer Reaktivität und Frühfestigkeit tendenziell höher ausfällt (Kap. 5.2). Bedingt durch die einwöchige Lagerung der Probekörper bei 90% rel. Luftfeuchtigkeit, ist in diesem Zeitraum teilweise ein vermindertes Schwinden, vereinzelt ein Quellen der Probekörper zu verzeichnen. Die anschließende Umlagerung der Probekörper im Klimaraum bei 65% rel. Luftfeuchtigkeit, ermöglicht die Verdunstung der Feuchtigkeit und begünstigt somit eine Volumenabnahme durch das Schwinden. Das entweichende Überschusswasser, welches weder chemisch noch physikalisch gebunden wurde, verursacht insbesondere in den ersten 7 Tagen eine teilweise starke Volumenabnahme. Zwischen dem 14. und 28. Tag sind lediglich geringfügige Längenänderungen zu verzeichnen.

Ausblühneigung

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zur Ausblühneigung konnten nur geringe augenscheinliche Änderungen festgestellt werden. Die Menge an Ausblühungen war zu gering, um eine röntgenographische Auswertung durchzuführen. Die geringe Ausblühneigung wird zum Einen auf den niedrigen Bindemittelanteil (12%) im Mörtel zurückgeführt und anderer-

seits darauf, dass die Proben zunächst 21 Tage im Normklima (60% Luftfeuchte) gelagert wurden, ehe die Versuche angingen.

Die hier beurteilten Ergebnisse basieren auf 10 Zyklen bei den Proben A bis D und 7 Zyklen bei den Proben E bis J. Vereinzelt wurden bereits in den ersten Zyklen Ausblühungen erkennbar. Für eine bessere Vergleichbarkeit dokumentieren die folgenden Abbildungen die Probekörper jeweils nach dem 5. Zyklus.

Im Vergleich der Proben A und B (Abb. 5.4.14) sowie E und F (Abb. 5.4.16), die sich jeweils durch ihren Anteil an Zement und Hüttensand unterscheiden, sind geringfügig höhere Tendenzen zu Ausblühungen an den Proben mit dem geringeren Hüttensandanteil zu verzeichnen. Es wird vermutet, dass es sich bei den Ausblühungen um Calciumcarbonat handelt (Benedix 2011). Der Hüttensand reagiert im Zuge der Hydratation mit dem Kalk zu wasserunlöslichen CSH-Phasen, so dass weniger des ausblühfähigen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durch Verdunstung an die Oberfläche gelangt und zu nichtlöslichem Calciumcarbonat reagieren kann. Diese Ausblühung lässt die Kristallisation des Salzes an der Oberfläche und nicht im Innern des Festmörtels entstehen. Im 8. Zyklus sind einige Abplatzungen bei Probe A erkennbar (Abb. 5.4.15), bei der die ausblühfähigen Salze unter der carbonatisierten Oberfläche auskristallisiert sind und so aufgrund der Volumenzunahme bei Kristallisation zu Schädigungen geführt haben.

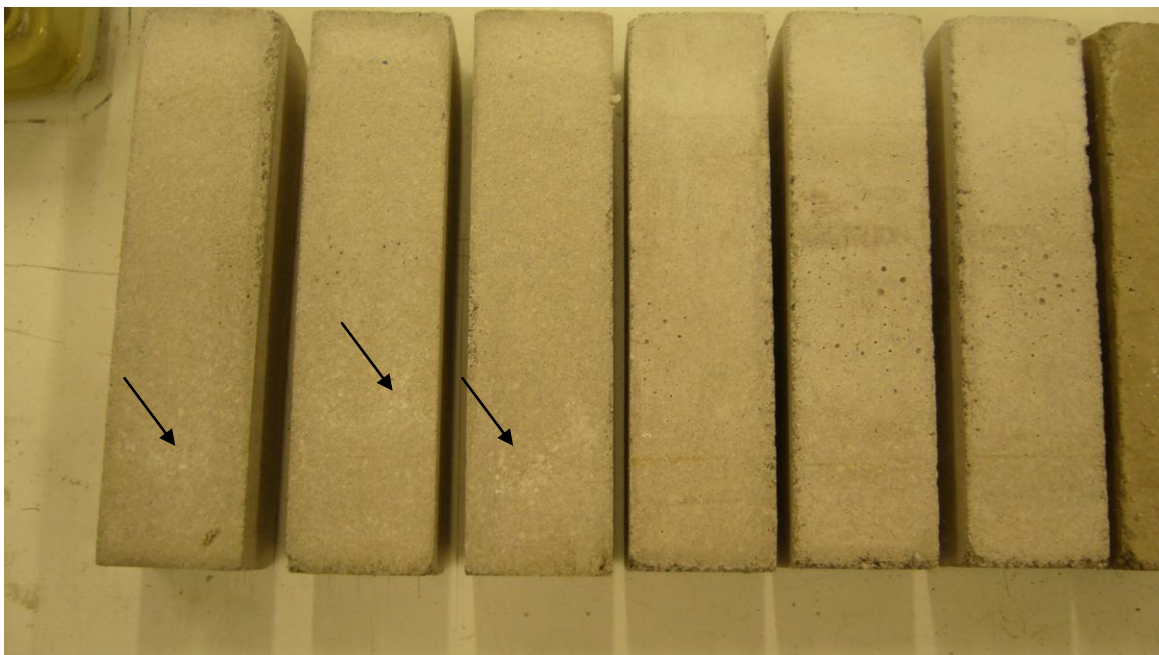


Abb. 5.4.14: Dokumentation der Proben A (linke 3 Prismen) und B (rechte 3 Prismen) nach 5 Zyklen, Ansätze von Ausblühungen auf den Proben A (siehe Pfeile)

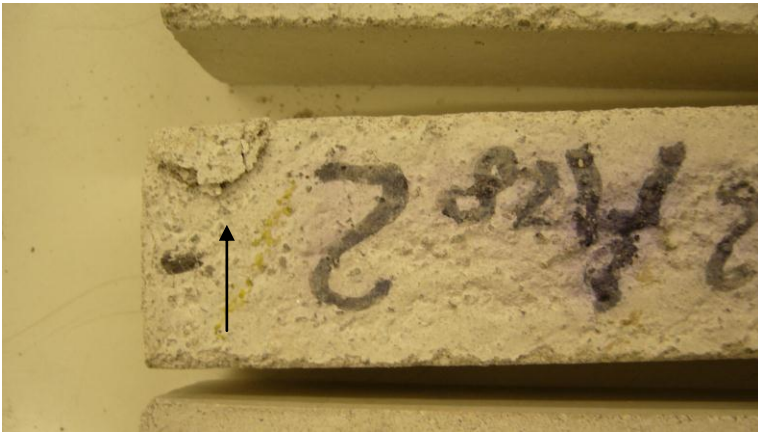


Abb. 5.4.15: Abplatzungen an Probe A nach 8 Zyklen (Pfeil)

Auch für die Proben E und F (Abb. 5.4.16) ist eine geringfügig höhere Ausblühneigung für die Proben ohne Hüttensand (Probe E) zu verzeichnen.

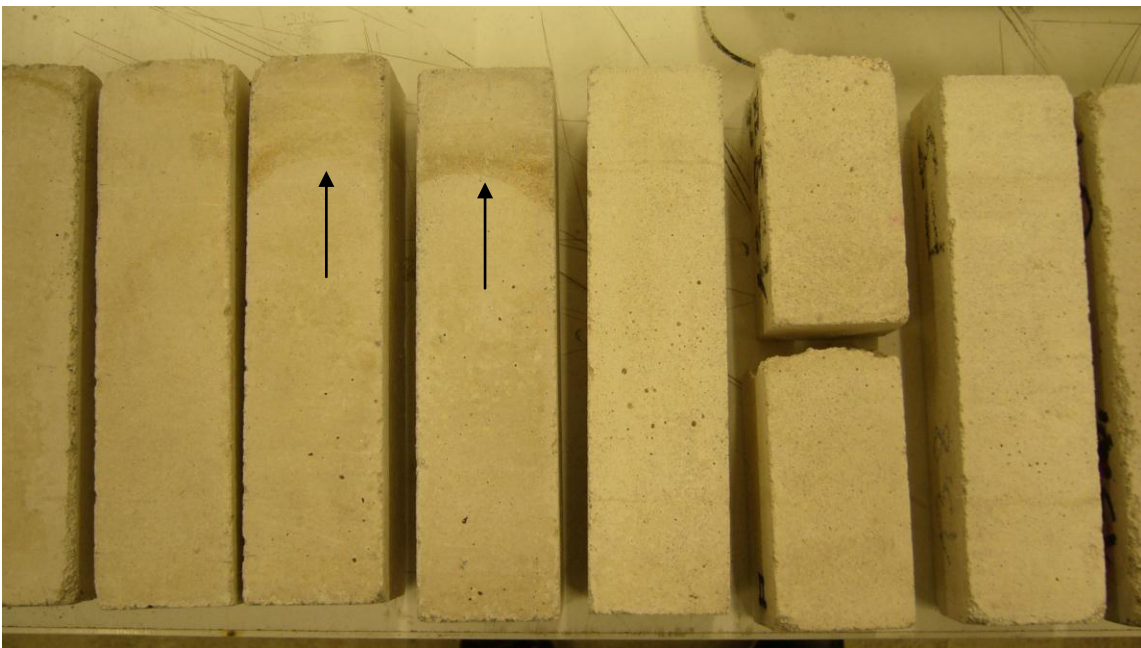


Abb. 5.4.16: Dokumentation der Proben E (linke 3 Prismen) und F (rechte 3 Prismen) nach 5 Zyklen, Beeinflussung durch Feucht- / Trockenwechsel (siehe Pfeile)

Die Proben C und D unterscheiden sich durch das verwendete Kalkhydrat. Die geringfügige Tendenz zur Ausblühung der Proben C (CL90), die für die Proben D (CL80) nicht erkennbar sind (Abb. 5.4.17), gehen auf den höheren Gehalt an Available Lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) zurück (Kap. 5.1.1).



Abb. 5.4.17: Dokumentation der Proben C (linke 3 Prismen) und D (rechte 3 Prismen) nach 5 Zyklen, Ansätze von Ausblühungen auf den Proben C (siehe Pfeile)



Abb. 5.4.18: Dokumentation der Proben G (linke 3 Prismen) und H (rechte 3 Prismen) nach 5 Zyklen, Ausblühungen und Abplatzungen auf den Proben H (siehe Pfeile)

Beim Vergleich der Proben G und H (Abb. 5.4.18, Abb. 5.4.19, Abb. 5.4.20), die sich durch Substitution von Kalkhydrat durch Trass_Eif unterscheiden, fällt auf, dass bei den Proben H an der oberen Stirnseite ein höheres Maß an Ausblühungen mit Abplatzungen erkennbar ist. Ob-

wohl durch den gestiegenen Gehalt an Trass bei gleichzeitig reduziertem Kalkhydratgehalt die Bindung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zugenommen hat, treten bei diesen Proben größere Veränderungen auf. Diese sind vermutlich auf die vergleichsweise hohen Anteile wasserlöslicher Alkalien im Trass zurückzuführen.



Abb. 5.4.19: Abplatzungen an Probe G nach 5 Zyklen



Abb. 5.4.20: Abplatzungen an Probe H nach 5 Zyklen

Für die Proben I und J sind keine nennenswerten Unterschiede zu verzeichnen (Abb. 5.4.21). Die Fehlstellen in den Prismenflächen sind aufgrund der geringen Frühfestigkeit beim Ausschalen entstanden. Der Zusammenhang von erhöhten Absandungen mit niedrigen Druckfestigkeiten ließ sich für sämtliche Proben feststellen.



Abb. 5.4.21: Dokumentation der Proben I (linke 3 Prismen) und J (rechte 3 Prismen) nach 5 Zyklen

Sulfatresistenz

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zur Sulfatresistenz konnten teilweise nur geringe Änderungen festgestellt werden. Die Proben A bis D wurden über einen Zeitraum von 56 Tagen untersucht, die Proben E bis J über einen Zeitraum von 42 bzw. 35 Tagen. Aufgrund einer Reihe von Variablen in den Mischungszusammensetzungen sind auch hier die Ergebnisse der Mörteluntersuchungen einander lediglich vergleichend gegenübergestellt.

Die Druckfestigkeiten der Proben A bis D nach 28 Tagen und nach anschließender 56-tägiger Sulfatlagerung sind in Abbildung 5.4.22 dargestellt. Mit Ausnahme von Probe A ist für alle Proben eine sehr geringfügige Festigkeitszunahme nach Sulfatlagerung zu verzeichnen. Die Proben B bis D verfügen, im Gegensatz zu Probe A, über höhere Anteile latent-hydraulischer bzw. puzzolaner Stoffe, deren Reaktion langsamer verläuft und zu einer höheren Nacherhärtung führt als bei Zement.

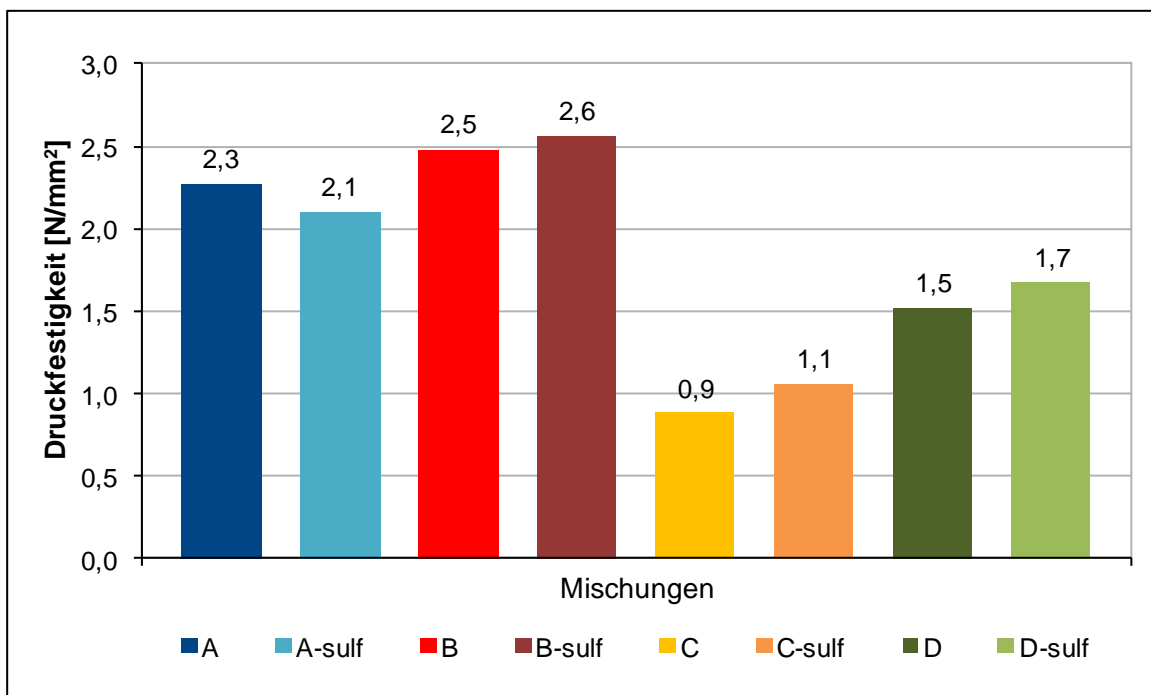


Abb. 5.4.22: Druckfestigkeiten nach 28 Tagen und nach anschließender Sulfatlagerung

Die Abbildungen 5.4.23 und 5.4.24 stellen die Längenänderung der Proben während der Sulfatlagerung dar.

Für die Proben A und B ist nach dem 56. Tag die geringste Zunahme in der Probenlänge zu verzeichnen. Die Proben E und F sowie I und J zeigen nach dem 35. bzw. 42. Tag sowohl eine größere Zunahme als auch eine steigende Tendenz (Abb. 5.4.23). Während für Probe A erst ab dem 35. Tag eine geringe Längenänderung erkennbar ist, sind für Probe B größere Schwankungen zu verzeichnen. Auch Probe F zeigt größere Schwankungen als Probe E.

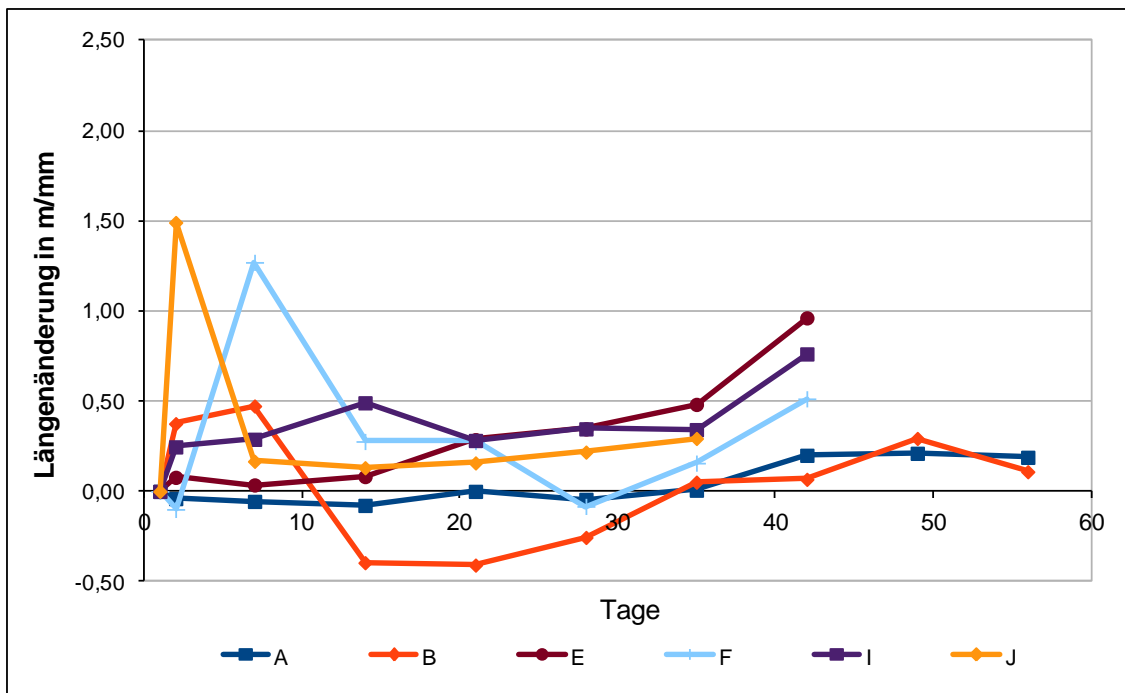


Abb. 5.4.23: Längenänderung der Proben A, B, E, F, I und J während der Lagerung in Sulfatlösung

Für die Proben C, D und G ist mit geringen Schwankungen eine leichte Zunahme der Probenlänge zu verzeichnen. Die Probe G weist jedoch nach kürzerer Zeit eine stärkere Zunahme bei steigender Tendenz auf. Probe H zeigt eine auffällige Längenzunahme (Abb. 5.4.24).

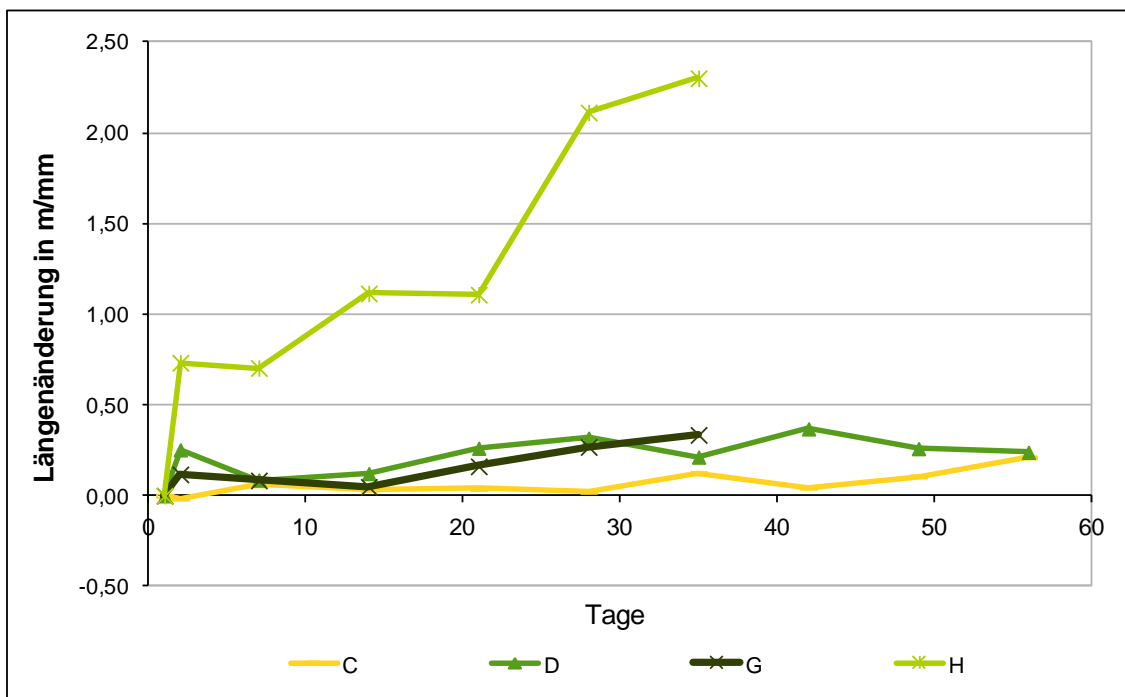


Abb. 5.4.24: Längenänderung der Proben C, D, G und H während der Lagerung in Sulfatlösung

Sandkörnungen

Da im Rahmen dieses Projektes neben dem CEN-Normsand (Quarz-Sand) ein weiterer Sand (Kalksteinbrechsand, 0 – 4 mm) für die Herstellung der Mörtelproben Verwendung fand, wurden Vergleichsuntersuchungen an diesen beiden Sanden und zusätzlich an einem weiteren Sand, es sich dabei um einen Quarzsand, der in der Industrie zur Herstellung von Putzmörteln Anwendung findet, durchgeführt. Die Ergebnisse der Bestimmung der Kornverteilung nach DIN EN 1015-1 ist in Abbildung 5.4.25 dargestellt.

Während die Sieblinien des Normsandes und des Kalksteinbrechsandes weitgehend ähnlich verlaufen, ist die Kornverteilung des Quarzsandes deutlich zu kleineren Korngrößen hin verschoben.

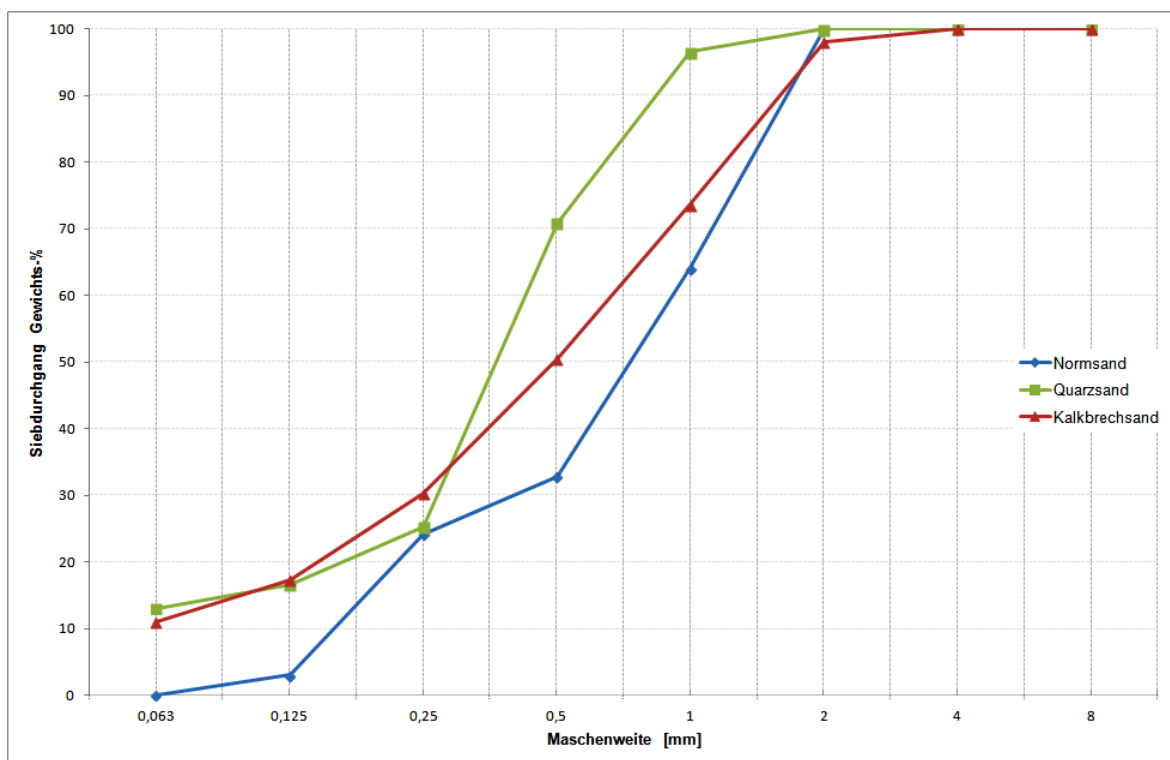


Abb. 5.4.25: Sieblinien der untersuchten Gesteinskörnungen

Abbildung 5.4.26 zeigt das W/B-Verhältnis (bezogen auf die 12% Bindemittel der Trockenmörtelmischung) in hergestellten Frischmörteln, das für ein einheitliches Ausbreitmaß von 170 mm eingestellt werden muss. Zum Vergleich der drei Sande Normsand, Quarzsand und Kalksteinbrechsand wurden die Frischmörtel jeweils mit jedem der Sande angesetzt. Es wurden drei verschiedene Mischungen untersucht. Der Wasseranspruch des Quarzsandes ist, aufgrund seiner feineren Körnung für alle drei unterschiedlichen FL-Mischungen am höchsten. Zwischen dem Normsand und dem Kalksteinbrechsand sind keine ausgeprägten Unterschiede der Wasser/Bindemittel-Werte zu verzeichnen.

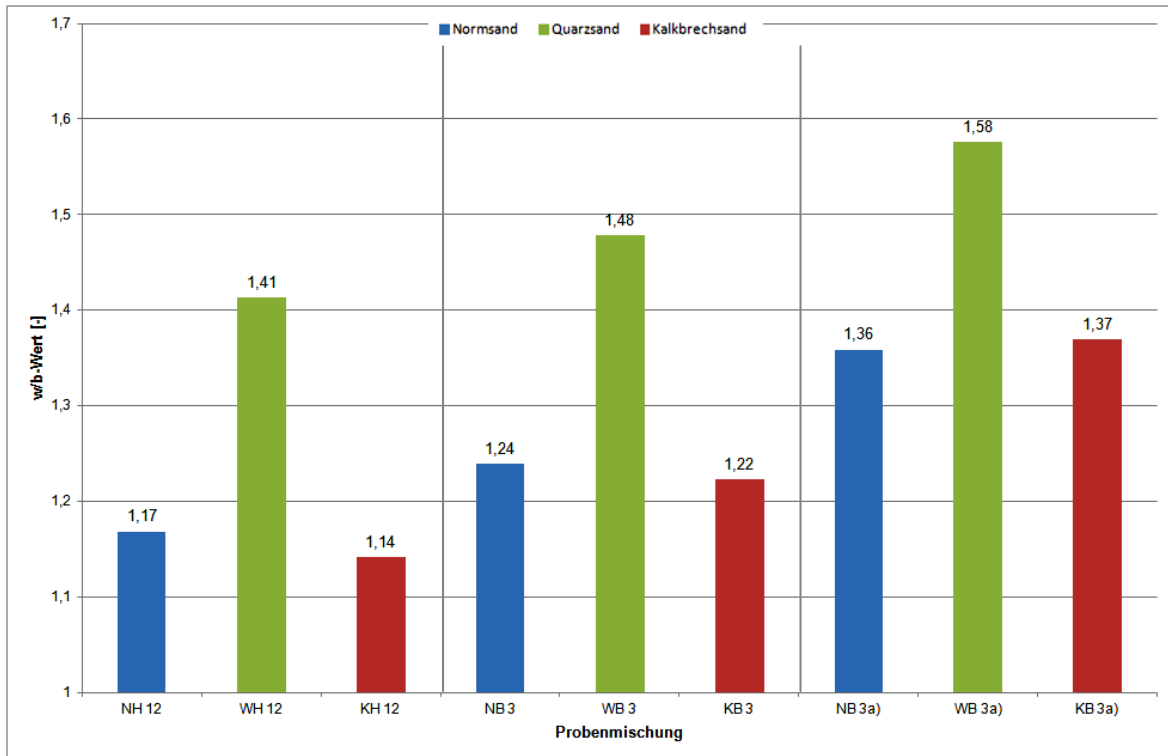


Abb. 5.4.26: Wasser/Bindmittel-Werte der FL-Mischungen

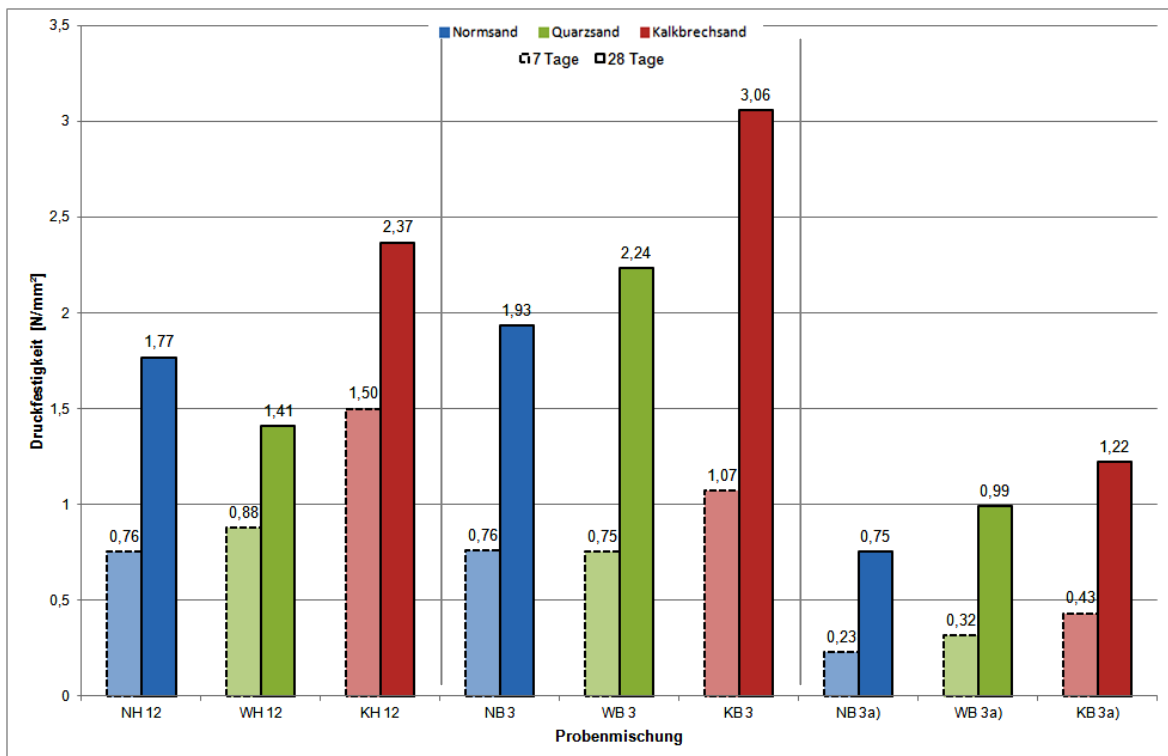


Abb. 5.4.27 Druckfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen

In Abbildung 5.4.27 sind die Druckfestigkeiten der Mörtelmischungen nach 7 Tagen und 28 Tagen dargestellt. Die Mischungen mit dem Kalksteinbrechsand erreichen bei allen drei Bindemittelmischungen die höchsten Festigkeiten. Anders als die gerundeten Quarzsande weisen die Gesteinskörner des Kalksteinbrechsandes eine splittrige Oberflächenstruktur auf, die zu einer besseren Verzahnung und erhöhten inneren Reibung bei Belastung führt. Durch diesen erhöhten Widerstand können größere Festigkeiten erreicht werden.

Für die Untersuchungen an den FL-Mischungen in Kapitel 5.3 kam der CEN-Normsand zum Einsatz. Zur Herstellung der Proben für die Mörteluntersuchungen in Kapitel 5.4 wurde der Kalkbrechsand verwendet.

6 Zusammenfassung und Fazit

In der aktuell überarbeiteten und im Dezember 2010 eingeführten neuen Baukalknorm (DIN EN 459-1 2010) wurde eine neue Bindemittelklasse aufgenommen, die *Formulierten Kalke (FL)*. Hierbei handelt es sich um Baukalke, denen im normativ vorgegebenen Rahmen definierte Mengen anderer Bestandteile zugemischt werden können, um gezielt bestimmte Eigenschaften einzustellen. Für die Kalkproduzenten erscheint in diesem Rahmen sowohl der normativ vorgegebene hohe Kalkgehalt der *FL* als auch die Verwendung von Kalksteinmehl besonders reizvoll. Als hydraulisch abbindende Komponenten stehen nach der Baukalknorm neben Portlandzement auch Hüttensand und Trass mit einer günstigeren CO₂-Bilanz zur Verfügung.

Bisher lagen keinerlei Erfahrungen bezüglich der neuen Bindemittelklasse der *FL* vor. *FL*-ähnliche Mischungen wurden bisher ausschließlich von wenigen Herstellern in Frankreich und Italien eingesetzt. Kenntnisse zu den Materialkennwerten dieser Mischungen waren ausschließlich betriebsintern und wurden nicht publiziert. Natürlich hydraulischer Kalk (NHL nach EN 459) und Trasskalk, ein hydraulischer Kalk (HL nach EN 459), sind *FL*-ähnliche Bindemittel und finden in Deutschland Anwendung bei der Sanierung, der Denkmalpflege und im ökologisch-biologischen Haus- und Wohnungsbau. Anders als bei „Hydraulischem Kalk nach EN 459“ wird dem Käufer von *Formuliertem Kalk* die Zusammensetzung sowohl qualitativ als auch quantitativ bekannt sein.

Im Zuge der Forderung von Politik und Gesellschaft nach Bindemitteln mit einer günstigen CO₂-Bilanz ergibt sich für die Kalk- und Mörtelproduzenten nun die Möglichkeit, diese in Form von *Formulierten Kalken* zu entwickeln.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, eine allgemeingültige Datenbasis zu Fragen der Wechselwirkungen einzelner *FL*-Bestandteile und ihrer Auswirkungen auf die Eigenschaften der mit *FL* hergestellten Mörtel zu schaffen. Von besonderem Interesse war es dabei, normativ gültige *FL* zu entwickeln, um den Produzenten deren Herstellung zu erleichtern. Da die 28-Tage Druckfestigkeiten der *FL* maßgeblich darüber entscheiden, ob die Bindemittel-Zusammensetzung normativ einem *FL* entspricht, wurde ein Modell entwickelt aus welchem

die Hersteller die 28-Tage Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der *FL*-Zusammensetzung erhalten. Diese neue kalkbasierte Bindemittelklasse soll es so den Produzenten ermöglichen, über definierte Festigkeitsregulierung in Kombination mit den positiven Kalkeigenschaften wie z. B. Verarbeitbarkeit, Risselbstheilung und Dauerhaftigkeit, den Absatz an Kalkhydrat im Mörtelbereich zu steigern.

Zum Erreichen des Forschungsziels war es erforderlich, in einem ersten Schritt Materialuntersuchungen an der neuen Bindemittelklasse der *FL* durchzuführen, um dann darauf aufbauend, in einem zweiten Schritt, *FL*-haltige Werk trockenmörtel hinsichtlich wichtiger mörteltechnischer Eigenschaften zu prüfen.

Folgender Lösungsweg wurde eingeschlagen:

Die nach der DIN EN 459-1 zugelassenen Haupt- und Nebenbestandteile zur Herstellung der *FL* wurden technisch und wirtschaftlich beurteilt. Auf dieser Grundlage wurde ihre zu erwartende Verwendung als *FL*-Bestandteil eingeschätzt. Die nach den oben beschriebenen Kriterien ausgewählten Rohstoffe wurden jeweils in mindestens zwei verschiedenen Variationen eingesetzt, um den Einfluss von Rohstoffvariationen quantifizieren zu können (Abb. 6.1).

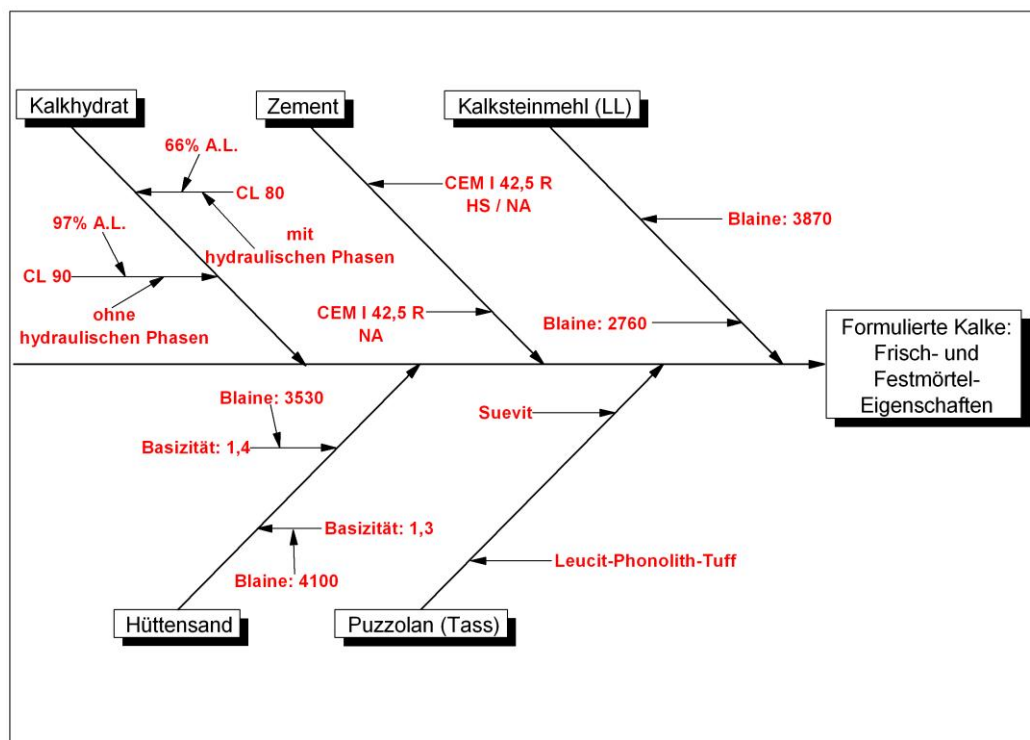


Abb. 6.1: Ishikawa-Diagramm zu den im Untersuchungsprogramm variierten Einflussfaktoren der geplanten Mischungsbestandteile

Die ausgewählten Rohstoffe wurden hinsichtlich wichtiger chemischer und physikalischer Eigenschaften charakterisiert, um den Einfluss von Rohstoffvariationen auf die daraus hergestellten Formulierten Kalke quantifizieren zu können. Die Werte für den SO_3 -Gehalt (wasser- und kristallwasser-frei), die Korngröße und das freie Wasser wurden für die einzelnen Rohstoffe bestimmt um sicher zu stellen, dass die für *Formulierte Kalke* nach EN 459-1 geltenden Grenzwerte bei den *FL*-Mischungen eingehalten werden. Mit Hilfe der aus den oben genannten Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurden in Vorversuchen erste *FL*-Mischungen hergestellt und auf ihre Konformität bezüglich DIN EN 459-1 geprüft. Hierbei ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Die aus den Ausgangsstoffen hergestellten *Formulierten Kalke* erfüllen alle die Anforderungen nach EN 459.
- Die Druckfestigkeit der mit den *FL* erzeugten Mörtel hängt stark vom Gehalt an hydraulischen Phasen im verwendeten CL80-Kalkhydrat ab.
- Die hydraulisch wirksame Phase C_2S im CL80-Kalkhydrat verursacht eine deutliche Zunahme der 28T-Druckfestigkeit des *FL* gegenüber der 7T-Druckfestigkeit.
- Die Abhängigkeit der 28T-Druckfestigkeit des *FL* vom W/B-Verhältnis ist nicht linear.
- Bei Kalkhydrat-Schüttdichten von 0,46 bis 0,51 kg/dm^3 liegt man bei einem Kalkhydrat-Anteil < 50 Masse% im *FL* bei einer Schüttdichte $> 0,60$ kg/dm^3 . Bei Verwendung von mehr als 77 Masse% Kalkhydrat beträgt die Schüttdichte der *FL*-Mischung $< 0,60$ kg/dm^3 . Dieser Sachverhalt ist wichtig für die Herstellung des *FL*, da sich nach EN 459-2 das für die Zusammensetzung des Norm-Mörtels erforderliche W/B-Verhältnis bei der Schüttdichte von 0,60 kg/dm^3 ändert.
- Ein deutlicher Basizitätsunterschied von zwei Hüttensanden äußert sich nicht zwangsläufig in einem Druckfestigkeitsunterschied der aus den Hüttensanden hergestellten *Formulierten Kalke*.
- Ein Massengehalt von 10% CEM 42,5 R scheint erforderlich, um eine ausreichend schnelle Erstarrung des *Formulierten Kalkes* nach EN 459 zu gewährleisten.
- Ein Unterschied in der Mahlfeinheit nach Blaine um 1100 [cm^2/g] zweier in *FL*-Mischungen eingesetzter LL-Kalksteinmehle, macht sich weder bei der 28-Tage Druckfestigkeit noch bei der Verarbeitbarkeit nach EN 459 bemerkbar.
- *Formulierte Kalke* die bayrischen Trass (Suevit) enthalten besitzen, verglichen mit *Formulierten Kalken* die rheinischen Trass (Leucit-Phonolith-Tuff) enthalten, sowohl niedrigere Druckfestigkeiten als auch einen signifikant höheren Anmachwasser-Bedarf. Nach (Liebig & Althaus 1999) ist das quellfähige Tonmineral Montmorillonit, welches im bayrischen Trass vorhanden ist, für die niedrigeren Druckfestigkeiten verantwortlich. Den hohen Wasserbedarf von *FL*-Mischungen die bayrischen Trass enthalten, er-

klären (Liebig & Althaus 1999) mit der hohen spezifische Oberfläche des Minerals Montmorillonit.

- Aufgrund desselben Gehalts an C₃S-Phase (70 Masse%), welche für eine hohe 28T-Druckfestigkeit verantwortlich ist, unterscheiden sich die beiden Zement-Ausgangspalten bezüglich der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten und unten beschriebenen statistischen Vorhersagemodelle zur Druckfestigkeit nicht.
- Für Gehalte bis 25% Hüttensandmehl oder Zement, weisen *FL*-Mischungen mit CL90 und Hüttensand höhere 7T- und 28T-Druckfestigkeiten auf als *FL*-Mischungen mit CL90 und Zement. Ab 40% Hüttensandmehl oder Zement drehen sich diese Verhältnisse um, da der Verdünnungseffekt, verursacht durch den CL90-Gehalt in der Mischung mit Zement, abnimmt. Gleichzeitig wird die Hydratationsreaktion des Hüttensandes durch den abnehmenden Anteil an Anregersubstanz (CL90) gebremst. Diesen Sachverhalt spiegeln auch die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten statistischen Modelle (s.u.) wieder.

Diese Ergebnisse stellten die Grundlage der statistischen Versuchsplanung dar. Die zugehörigen Versuchspläne enthielten festgelegte Kombinationen von Rohstoffen in bestimmten Mischungsverhältnissen. An den in den statistischen Versuchsplänen beschriebenen *FL*-Mischungen wurden die 28d-Druckfestigkeiten nach DIN EN 459-2 (bei einem W/B-Verhältnis von 0,55) bestimmt. Mit Hilfe dieser Ergebnisse wurden quantitative Korrelationsmodelle aufgestellt, aus denen die 28d-Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Rohstoffkombination, bei einem konstanten W/B-Wert von 0,55, abgelesen werden können. Es wurden verschiedene graphische Diagnostiken angewandt, mit denen die Validität dieser Modelle geprüft wurde. Die Modelle wurden an die erhobenen Druckfestigkeitsdaten angepasst. Die Qualität der Modellanpassung wurde diskutiert und durch die vorgestellten Diagnostiken untersucht. Die durchgeführte Überprüfung bestätigte die Validität der Modelle und zeigte, dass diese die beobachteten Druckfestigkeiten gut beschreiben. Druckfestigkeiten für noch unbekannte Mischungen können mit Hilfe der Modelle vorhergesagt werden. Die Modelle und die damit getroffenen Prognosen können als gute Grundlage für die weitere Erforschung und Analyse des Versuchsbereichs benutzt werden. Die Aussagekräftigkeit der Modellvorhersage nimmt allerdings ab, wenn die zu vorhersagenden Mischungen sehr weit außerhalb des bekannten Versuchsraums liegen. Im untersuchten Versuchsraum sind die aufgestellten Modelle gut geeignet für die Vorhersage der Druckfestigkeit.

Weiterhin wurde eine EDV-gestützte Berechnungshilfe entwickelt, mit deren Hilfe sich die 28T-Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der *FL*-Zusammensetzung berechnen lassen. Die Ergebnisse der statistischen Modellierung sind in Form von 2D-Projektionen im Anhang dargestellt. Mit Hilfe der Projektionen lässt sich die 28T-Druckfestigkeit bei gegebener *FL*-Zusammensetzung auch graphisch abschätzen.

In einem letzten Schritt wurden die aus diesem Forschungsvorhaben gewonnen Erkenntnisse dazu eingesetzt Trockenmörtel auf *FL*-Basis herzustellen und hinsichtlich wichtiger mörteltechnischer Parameter zu untersuchen. Die dafür ausgesuchten *FL*-Mischungen deckten dabei ein breites Spektrum der Mischungsmöglichkeiten ab.

Wichtige Ergebnisse der Untersuchungen an *FL*-basierten Trockenmörtelmischungen sind:

- Bei dem Vergleich von Wasseranspruch und Porosität wurde festgestellt, dass ein erhöhter Wasseranteil in der Mischung nur bedingt zu höherer Porosität führt. Dabei zeigten die Trasse, insbesondere der Suevit, einen gesteigerten Wasseranspruch, mit dem keine erhöhte Porosität einherging. Dieser hohe Wasserbedarf kann nach (Liebig & Althaus 1999) mit der hohen spezifische Oberfläche des Tonminerals Montmorillonit erklärt werden.
- Mit der teilweisen Substitution von Kalkhydrat durch den Leucit-Phonolith-Trass ließ sich eine Verfeinerung und Reduktion des Porengefüges feststellen. Auch für Proben mit relativ hohem Anteil an Kalkhydrat war trotz hohen Wasseranteils eine geringere Gesamtporosität zu verzeichnen, während der Anteil Kalksteinmehl den Wasseranspruch verringerte, jedoch zu vergleichsweise höherer Porosität führte.
- Die Ausblühneigung der Mörtel verringert sich durch Zugabe von Hüttensand, was auf die erhöhte Bindung des wasserlöslichen Kalkhydrats zurückzuführen ist. Trotz erhöhter Kalkbindung konnte diese Beeinflussung nicht für die Verwendung von Trass festgestellt werden. Im Bezug auf die verwendeten Kalkhydrate war die geringere Ausblühneigung für Proben mit CL80 statt CL90 zu verzeichnen, was auf den geringeren Gehalt an wasserlöslichem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zurückgeht.
- Der Vergleich von drei verschiedenen Sanden in den Trockenmörtelmischungen zeigt, dass sich trotz ähnlicher Korngrößenverteilung mit dem Kalksteinbrechsand deutlich höhere Druckfestigkeiten erzielen lassen als mit dem Normsand. Anders als die gerundeten Quarzsande weisen die Gesteinskörner des Kalksteinbrechsandes eine splittrige Oberflächenstruktur auf, die zu einer besseren Verzahnung und erhöhten inneren Reibung bei Belastung führt. Der Wasserbedarf der mit den beiden Sanden hergestellten Mörtelmischungen ist aufgrund der ähnlichen Kornverteilung jedoch gleich. Ein Vergleich mit einem Quarzsand, der in der Industrie zur Herstellung von Putzmörteln Anwendung findet, zeigte, dass dieser aufgrund seiner feineren Körnung einen deutlich höheren Wasserbedarf besitzt, sich bezüglich der Druckfestigkeiten jedoch ähnlich wie der verwendete Normsand verhält.

7 Literaturverzeichnis

AUTOR, V. & AUTOR, F. (JJJJ): Titel. – Zeitschrift, Nr.: SS-SS, Stadt.

AL-BEFAI, N.K. & CARTER, M.A. & WILSON, M.A.: THE INFLUENCE OF POZZOLANIC AD-
DITIONS ON THE WATER RETENTIVIT OF FRESHLY-MIXED HYDRAULIC LIME MOR-
TARS. –In: Russell, Mark. 32nd Cement & Concrete Science Conference: 32nd Cement & Con-
crete Science Conference; 17 Sep 2012-17 Oct 2012; Queen's University Belfast. Belfast:
Queen's University Belfast; 2012. p. 122-126

ARANDIGOYEN, M. & ALVAREZ, J. (2007): Pore structure and mechanical properties of cement-
lime mortars. – Cement and Concrete Research, 37.: 767-775.

ASHURST, J. & ASHURST, N. (1988): Practical Building Conservation, Volume 3: Mortars, Plasters
and Renders (Gower Technical Press, Aldershot).

BENEDIX, R. (2011): Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten.
– Vieweg + Teubner Verlag / Springer Fachmedien, 5. Auflage: 384-385, Wiesbaden.

BOGUE, R.H. (1929): Calculation of the compounds in Portland cement. – Ind. Eng. Chem., 1.

BÖTTGER, K. G. & THIEDIG, F. & KNÖFEL, D. (2002): Keltisch-römische Mörtel vom Magdalens-
berg in Kärnten. – Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, Jg. 8,
Nr. 1: 19-41.

BOYNTON R.S., V. & GUTSCHICK, K.A.. (1964):. Durability of mortar and masonry – Masonry
Mortar Technical Notes I, Washington D.C.

BOYNTON R.S., V. & GUTSCHICK, K.A.. (1984): Strength considerations in mortar and masonry. –
Masonry Mortar Technical notes, 2.

BVK: BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN KALKINDUSTRIE E.V. (2002): Kalk, chemische Analysen:
maßanalytische, gravimetrische und gasvolumetrische Verfahren. – BVK-
Prüfverfahrensammlung, Teil 2, Köln.

BVK: BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN KALKINDUSTRIE E.V. (2002): Kalk, chemische Analysen:
atomabsorptionsspektrometrische und atomemissionsspektrometrische Verfahren. – BVK-
Prüfverfahrensammlung, Teil 3, Köln.

CALLOBAUT, K. & ELSEN, J. & VAN BALEN, K. & VIAENE, W. (2001): Nineteenth century hydrau-
lic restoration mortars in the Saint Michaels Church (Leuven, Belgium). Natural hydraulic lime
or cement?. – Cement and Concrete Research, 31.: 397-403.

CIZER, O. & VAN BALEN, K. & VAN GEMERT, D. (2008): Blended lime-cement mortars for con-
servation purposes: Microstructure and strength development. – Sructural Analysis of Historic
Construction, D`Ayala & Fodde (eds), Taylor & Francis Group, London.: 965-972; ISBN 978-0-
415-46872-5.

- CIZER, O. & VAN BALEN, & EISEN, J. & VAN GEMERT, D. (2008): CARBONATION REACTION KINETICS OF LIME BINDERS MEASURED USING XRD. – Proceedings of the 2nd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering, 139-148.
- COPELAND, R.E. & SAXER, E. (1964): Tests of the Structural Bond of Masonry Mortars to Concrete Block. – Proceedings of the American Concrete Institute, ACI Detroit, Mich., 61.: 1411-1451.
- CORNELL, J. (2002): Experiments with mixtures: Design, models & the analysis of mixture data. – 3. Aufl. New York: Wiley.
- COX. (1971): A note on polynomial response functions for mixtures. – Biometrika, 58 (1): 155-159.
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG E.V. (1999): Merkblatt für Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile - DGZfP Merkblatt B4.
- DIN 1060 (1939): Baukalk.
- DIN 66132 (1975): Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Stickstoffadsorption – Einpunkt-Differenzverfahren nach Haul und Dümbgen.
- DIN 1164:2000-11: Zement mit besonderen Eigenschaften – Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis.
- DIN 38414-4:1984-10: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4).
- DIN EN 196-1:2005: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit.
- DIN EN 196-6:2010: Prüfverfahren für Zement – Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit.
- DIN EN 197-1:2004: Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.
- DIN EN 459-1:2010: Baukalk – Teil 1: Begriffe, Anforderungen und Konformitätskriterien
- DIN EN 459-2:2010: Baukalk – Teil 2: Prüfverfahren.
- DIN EN 1015-2:1998+A1:2006: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 2: Probenahme von Mörteln und Herstellung von Prüfmörteln.
- DIN EN 1015-3: 1999+A1:2004+A2:2006: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch).
- DIN EN 1015-6: 1998+A1:2006: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel.

- DIN EN 1015-11:1999+A1:2006: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel.
- DIN EN 1097-7:2008: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füller - Pyknometerverfahren.
- DIN EN 12457-4:2003: Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung).
- DIN EN 15167-1:2006-12: Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien.
- DTI DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE FOR THE EUROPEAN LIME ASSOCIATION. (2010): Bibliography lime in mortars. – Homepage: www.eula.eu.
- EHRENBERG, A. (2006): Hüttensand – Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft. – Beton-Informationen, 46: 35-63 (Heft 4), 67-95 (Heft 5).
- EHRENBERG, A. (2010): Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff – Aktuelle Situation in Deutschland und Europa. – Beton-Informationen, 3/4: 48-62.
- EHRENBERG, A. (2010): Current developments in the manufacturing and utilization of granulated blast furnace slag. – ZKG International, 3.: 52-66.
- ELERT, K. & CAZALLA O., & RODRIGUEZ C. & HANSEN, E. & SEBASTIAN, E. (2002): Kalkmörtel. – Restauero, ISSN: 0933-4017.
- FAHRMEIR, L. & KNEIB, T. & LANG, S. (2007): Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen. – 1. Aufl. Berlin: Springer.
- FANG, K. T. & LI, R. & SUDJIANTO, A. (2006): Design and modeling for computer experiments. – London: Chapman & Hall/CRC (Computer science and data analysis series).
- FISHBURN, C. (1961): Effect of Mortar Properties on Strength os Masonry. – NBS Monograph, 36.: National Bureau of Standards, Washington, D.C.
- GIBBONS, P. (1995): Historic Scotland Technical Advice Note no. 1. Preparation and Use of Lime Mortars (Historic Scotland, Edinburgh).
- GREEN, M. & CARTER, M. & HOFF, W. (1999): The effects of lime and admixtures on the water-retaining properties of cement mortars. – Cement and Concrete Research, 29.: 1743-1747.
- GOEDEKE, H. & GORETZKI, L. (2007): Zum Verfestigungsverhalten von NHL-Mörteln und zum Gefügebau der Bindemttelmatrix. – Institut für Steinkonservierung, S. 81.
- GUNZBURGER, M. & BURKARDT, J. (2004): Uniformity measures for point sample in hypercubes. – Technical Report, Florida State University.

- HÄRDTL, R. & KOC, I. (2012): Evaluation of the performance of multi-component cements. – ZKG International, 4.: 66-79.
- HOLMES, S. & WINGATE, M. (1997): Building with Lime: A Practical Introduction. – Intermediate Technology, London.
- JONSHON M.E. & MOORE L.M. & YLVISAKER D. (1990): Minmax and maximin distance designs. – J. of Statis. Planning and Inference, 26: 131-148.
- KAMP, M.V. (2011): The automated dosing of admixtures in the production of dry premix mortars (Part 1). – ZKG International, 5.: 57-64.
- KASIG, W. & WEISKORN, B.(1992): Zur Geschichte der deutschen Kalkindustrie und ihrer Organisationen – Beton-Verlag
- KASSAUTZKI, M. (1983): Phonolith als puzzolanischer Zusatzstoff in der Zementindustrie. – ZKG International, 12.: 688-692.
- KNÖFEL, D. & SCHUBERT, P. (1993): Zur Beurteilung von Mörteln für die Instandsetzung von Mauerwerk. – Handbuch Mörtel und Steinerfüllstoffe in der Denkmalpflege, 87-106, Berlin.
- LAMPRECHT, H.-O. (1996): Opus Caementitum –Bautechnik der Römer. – Beton-Verlag, Düsseldorf, 5. Auflage.
- LEMMENS, J.W.: Referenzhandbuch GrindoSonic MK5“Industrial“.
- LESCHONSKI, K. (1988): Überblick über die moderne Partikelmeßtechnik. - Fortschr. Miner., 66: 161-173, Stuttgart.
- LIEBIG, E. & ALTHAUS, E. (1997): Kaolinit und Montmorillonit als puzzolanische Komponenten in Kalkmörteln – unbehandelt und thermischer Aktivierung. - ZKG International, 5: 282-290.
- LIEBIG, E. & ALTHAUS, E. (1999): Traßmehle als puzzolanische Komponenten bei der Herstellung von Restaurierungsmörteln auf Kalkbasis. – Arbeitshefte des Sonderforschungsbereiches 315, Erhaltung historisch bedeutsamer Bauwerke; Quelle: www.baufachinformation.de
- LOCHER, F.W. (2000): Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung. – Verlag Bau und Technik, Düsseldorf.
- LUDWIG, H.-M.. (2012): Zukünftige Zemente und ihre Eigenschaften. – Beton, 5: 158-165.
- MAIER, J. (2007): Putz und Stuck – Materialien – Anwendungstechniken - Restaurierung. Fraunhofer IRB Verlag
- MARUSIN, S. (1990): Investigation of shale brick interface with cement-lime and polymer-modified mortars. – American Ceramic Society, 73 (8): 2301-2308.
- MCCULLOCH, C.E.. & SEARLE, S. R. (2001): Generalized, linear, and mixed models. – Zeitschrift, New York: John Wiley & Sons.

- MEIER, H.G.. (2004): Zementzugabe zum Kalkputz, eine sinnvolle Maßnahme – Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 2: 119-132.
- MOSQUERA, M.J. & SILVA, B & PRIETO, B & RUIZ-HERRERA, E. (2006): Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapor transport. – Cement and Concrete Research, 36 (9): 1635-1642.
- MYERS, R.H. & MONTGOMERY, D. C.. & Anderson-Cook, C.M. (1009): Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. – Hoboken: Wiley (Wiley series in probability and statistics), 3. Aufl.
- NEY, P. (1967): The hardening of non-hydraulic lime mortars as a crystallisation process. – ZKG International, 20 (10): 429-434.
- OPPERMANN, B. (1983): Zur Neufassung der Baukalk-Norm DIN 1060 – ZKG International, 36: 296-301
- PAVÍA, S. & TREACY, E. (2006): A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars. – Materials and Structures, 3.: 391-398.
- PICKETT, G. (1945): Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders. – Proceedings Am. Soc. Testing Mats., 45: 846-865, Stadt.
- PRITCHETT, I. (2003): Future is green, Lime green. – Concrete Engineering International, 7 (4): 49-50.
- PRITCHETT, I. (2003): Lime versus cement: traditional methods for todays buildings. – ICE Proceedings: Engineering, 156: 83-85.
- REINHARDT, H.-W.. & SCHELLHORN, H. (2007): Getempertes Phonolith-Gesteinsmehl als Beton-zusatzstoff mit hohem k-Wert. – ZKG International, 3.
- SCHMIDT, M. & PÖLLMANN, H & EGERSDÖRFER, A. (2012): Glass-containing metakaolin as an active filler in lime-based binder systems. – ZKG International, 3.: 54-62.
- SING, N.B.. & MIDDENDORF, B. (2008): Chemistry of blended Portland cements – part 1: Natural pozzolanas, fly ashes and granulated blastfurnace slags. – Cement International, 4, Vol.6: 3-15.
- SPEWEIK, J. (1996): Lime ´s role in mortar – Masonry Construction, 35278.: 364-368.
- SPINNER, S. & TEFFT, W.E. (1961): A method for determining mechanical resonance frequencies and for calculating elastic moduli from these frequencies. – Proceedings ASTM, 61.: 1229-1238.
- STARK, J. & WICHT, B. (2000): Zement und Kalk – Der Baustoff als Werkstoff. – Birkenhäuser Verlag.
- THE TRADITIONAL LIME COMPANY. (2000): A Guide to Lime and ist uses in Conservation and Restoration of Buildings. – The Traditional Lime Company, Carlow 2000.

- TSIMAS, S. & RAIKOS, K. (1995): Lime, an irreplaceable mortar constituent. – ZKG International, 6: 350-356.
- WALDUM, A. & ANDA. (1999): Durability of lime-based mortars in a severe climate. Results from field and artificial aging tests. – 12th International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests, 1999.: 297-309.
- VDZ. (2002): Zement Taschenbuch. – Verein Deutscher Zementwerke e.V., 31-38.
- VOSS, W.C. (1960): Exterior masonry construction. – N.L.A. Bulletin, 324.
- WINNEFELD, F. (2005): Kalkputze in der Denkmalpflege. – WTA Seminar: Putzmörtel in Bauwerksanierung und Denkmalpflege; 21. April 2005, Website: <http://www.wta-international.org/de/system/files/seminar-05-winnefeld-text.pdf>
- ZHAO, Q & FREYBURG, E & STARK, J & ZHOU, M. (2009): Characterization of the microstructure and mineral phases of German iron and steel slags – Zement-Kalk-Gips International, 4, Vol. 62: 87-94

8 Anhang

8.1 Symbole, Maßeinheiten und Abkürzungen

A.L.	Available Lime (Verfügbarer Kalk)
BZ	Biegezugfestigkeit
calc	calculated (berechnet)
d	days (engl.)
DF	Druckfestigkeit
CEM_HS	Portlandzement (CEM I 42,5 R-HS/NA)
CEM_NA	Portlandzement (CEM I 42,5 R-NA)
CL80	Kalkhydrat-Pulver Available Lime = 69,8 %, (CL 80-S)
CL80_vgl	Kalkhydrat-Pulver Available Lime = 75,5 %, (CL 80-S)
CL90	Kalkhydrat-Pulver, Available Lime = 97,0 %, (CL 90-S)
CL90_vgl	Kalkhydrat-Pulver Available Lime = 93,5 %, (CL 90-S)
FL	Formulated Lime (Formulierter Kalk)
HL	Hydraulischer Kalk
HS_f	Hüttensandmehl (mittlere Basizität)

HS_g	Hüttensandmehl (hohe Basizität)
HS_vgl	Hüttensandmehl (identisch mit HS_f, aber feiner aufgemahlen)
KSTM	Kalksteinmehl LL (Mahlfeinheit nach Blaine = 2760 [cm ² /g])
KSTM_vgl	Kalksteinmehl LL (Mahlfeinheit nach Blaine = 3870 [cm ² /g])
NHH	Natürlich hydraulischer Kalk
Trass_Bay	Natürliches Puzzolan (Trassmehl, Suevit aus Bayern)
Trass_Eif	Natürliches Puzzolan (Trassmehl, vulkanischer Tuff aus der Eifel)
28d DF	Druckfestigkeit nach 28 Tagen
[%]	Massenanteil in Prozent
W/B-Wert	Wasser/Bindemittel-Wert

8.2 Röntgendiffraktogramme

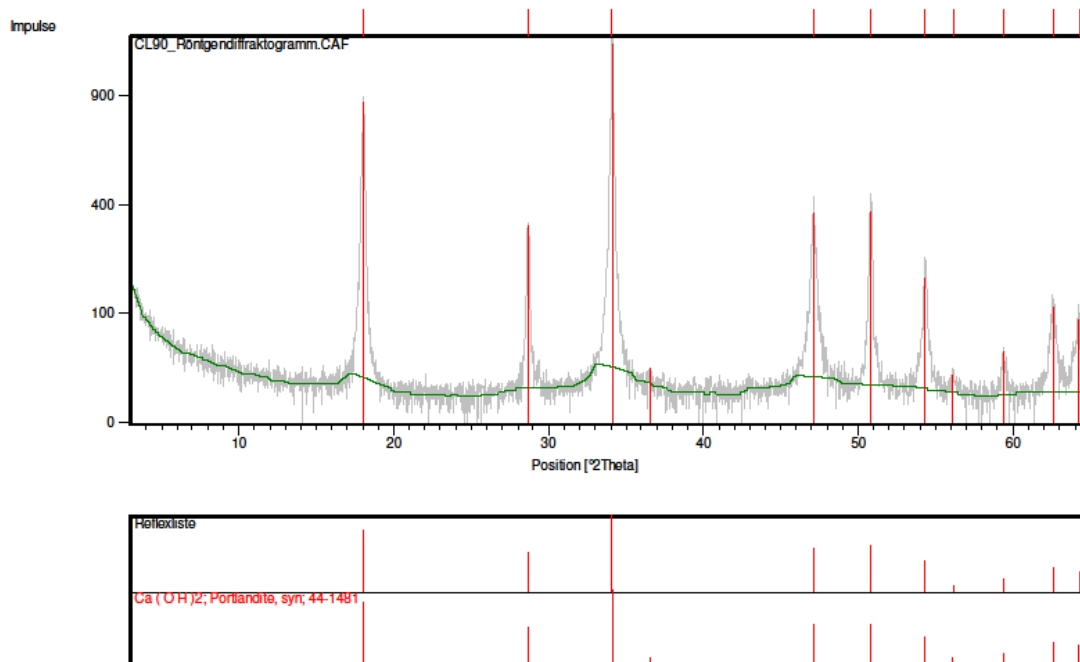


Abb. 8.2.1: Röntgendiffraktogramm des Kalkhydrats CL90

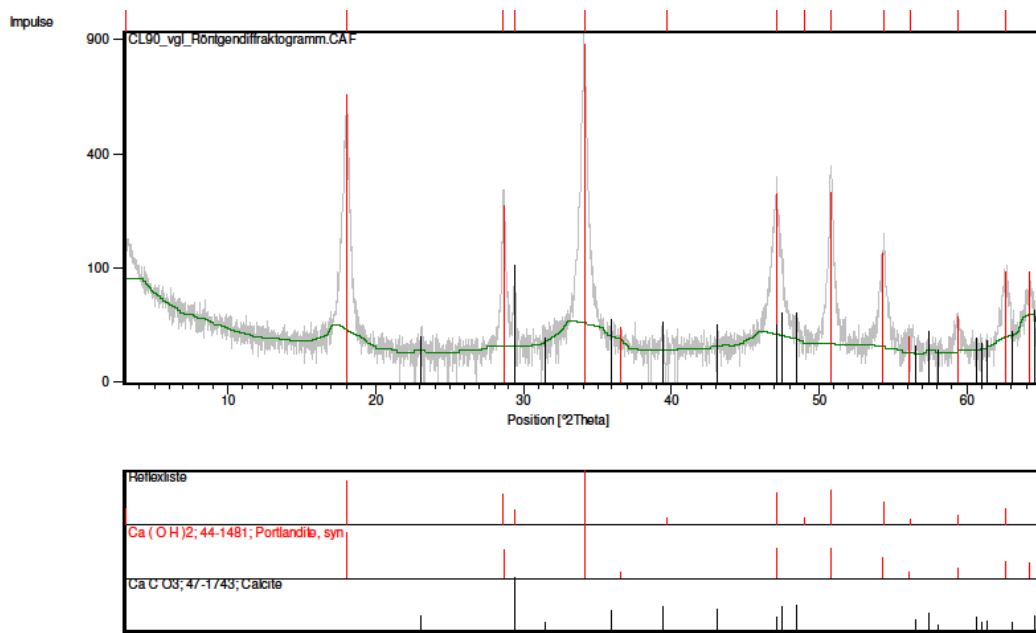


Abb. 8.2.2: Röntgendiffraktogramm des Kalkhydrats CL90_vgl

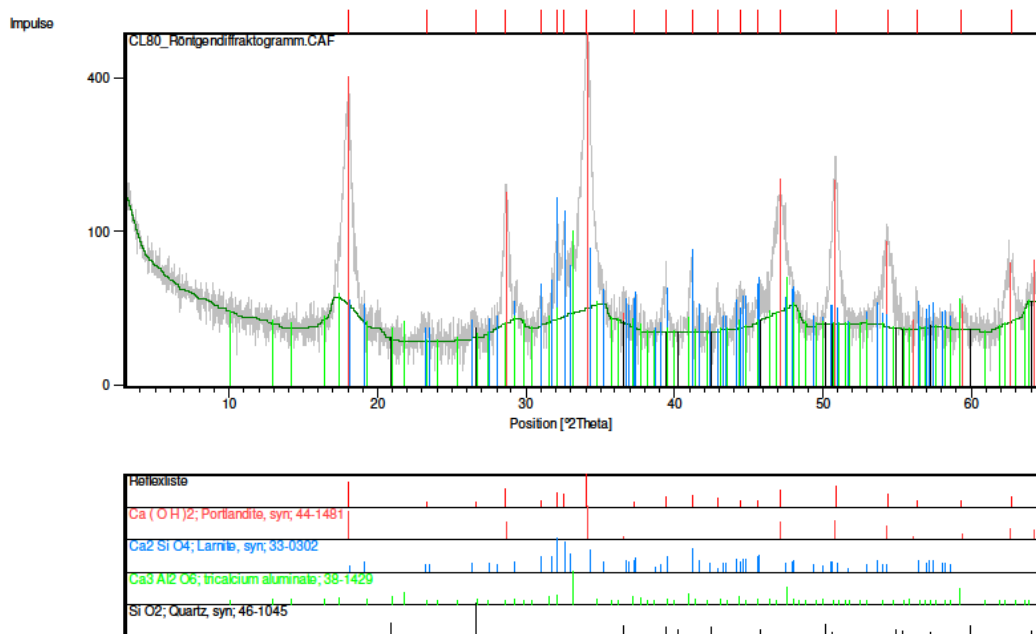


Abb. 8.2.3: Röntgendiffraktogramm des Kalkhydrats CL80

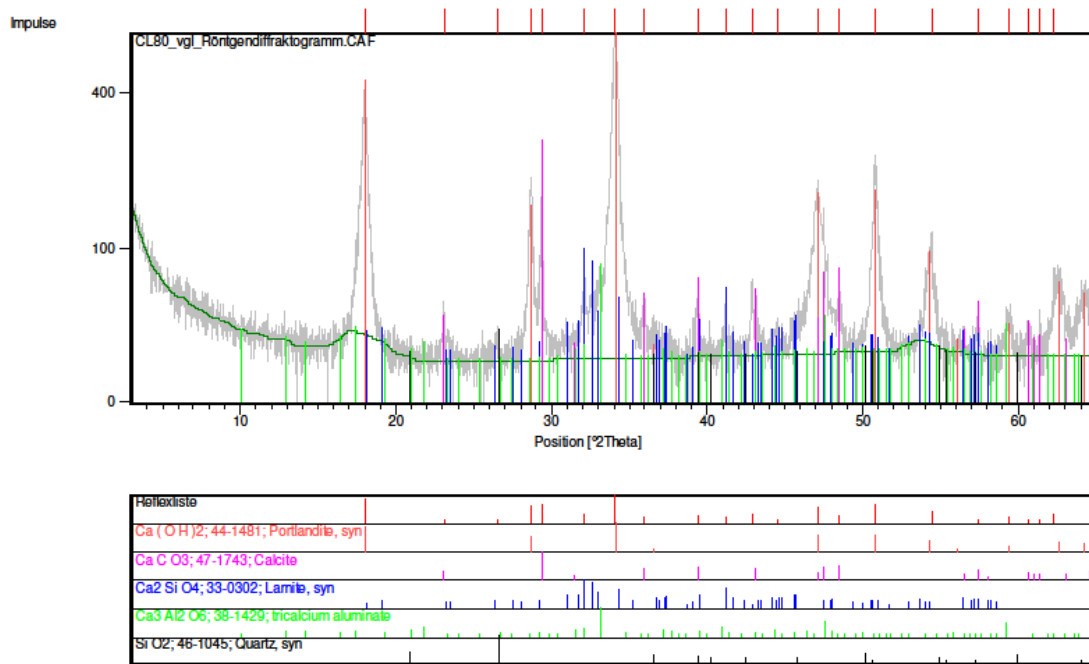


Abb. 8.2.4: Röntgendiffraktogramm des Kalkhydrats CL80_vgl

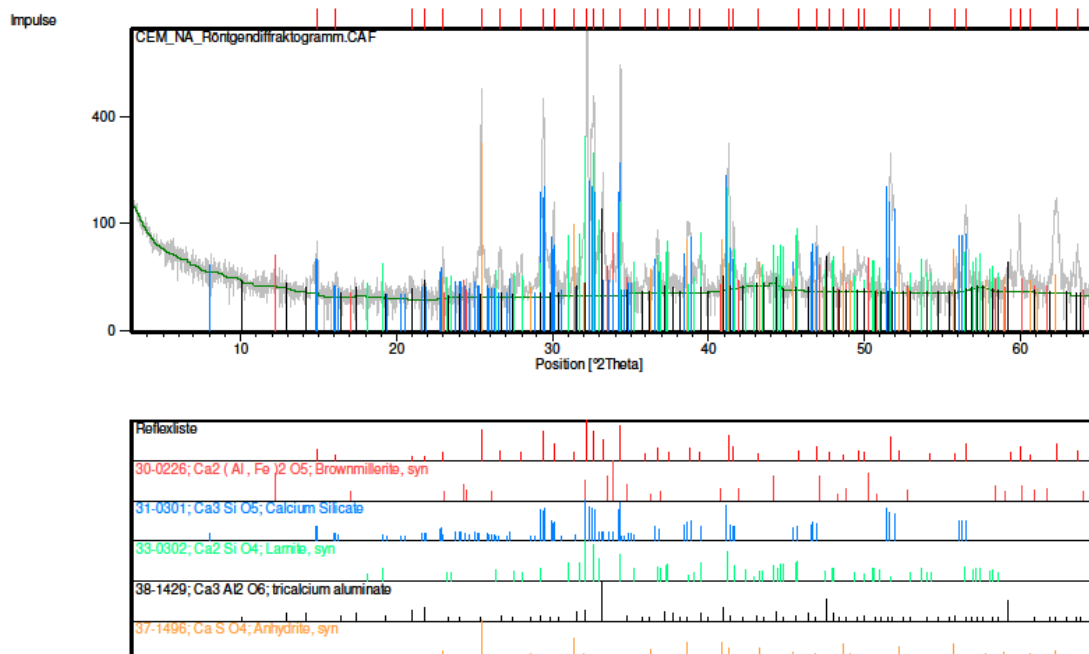


Abb. 8.2.5: Röntgendiffraktogramm des Portlandzements CEM_NA

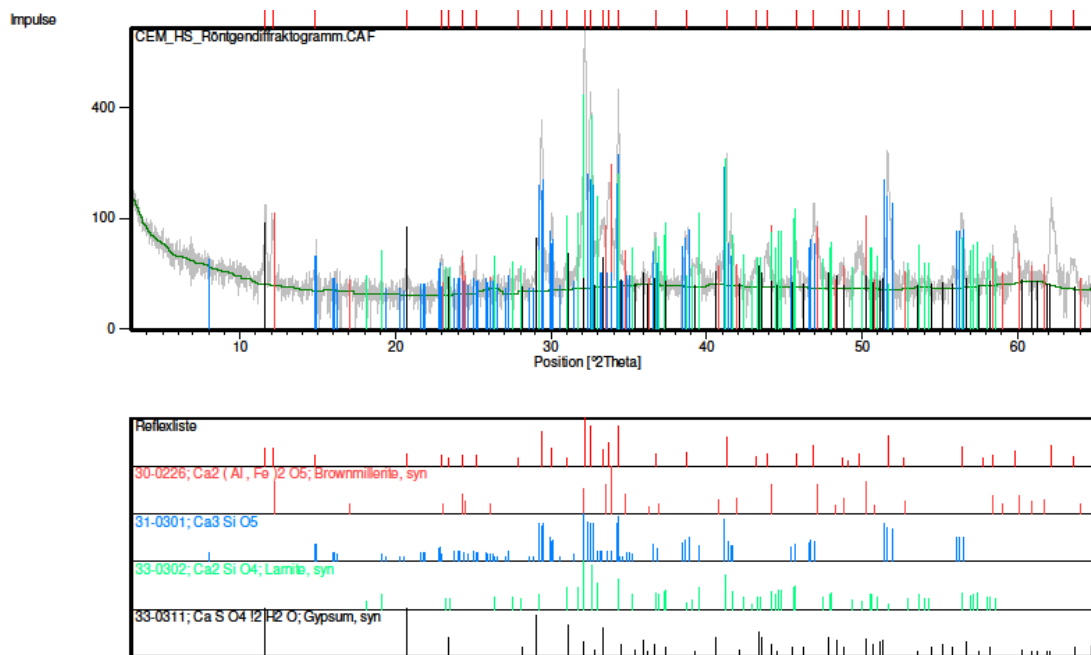


Abb. 8.2.6: Röntgendiffraktogramm des Portlandzements CEM_HS

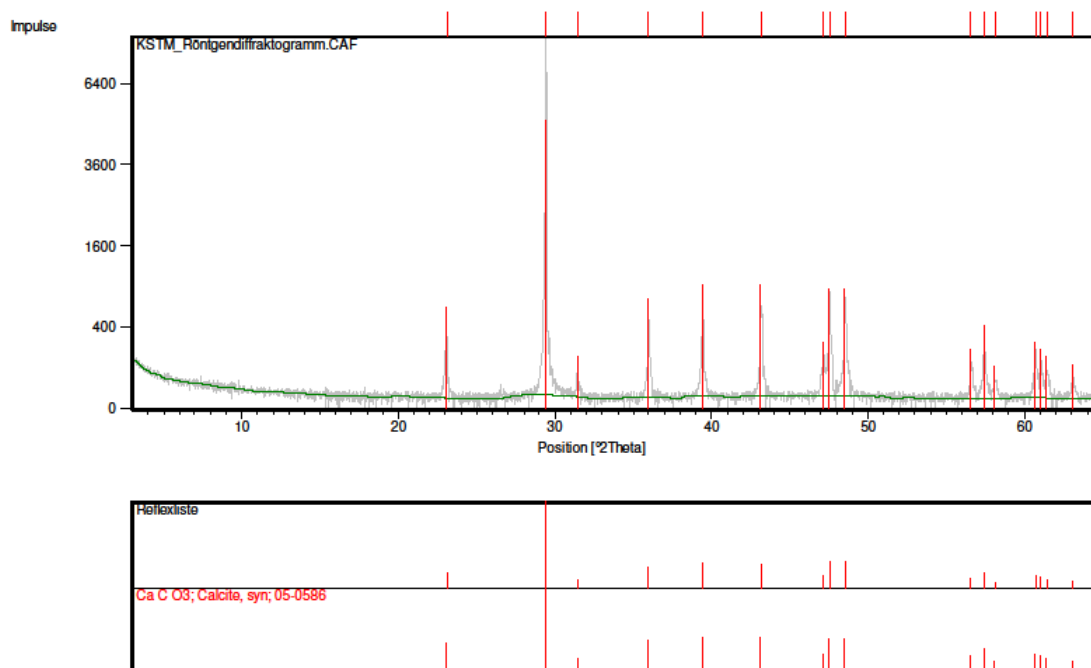


Abb. 8.2.7: Röntgendiffraktogramm des Kalksteinmehls KSTM

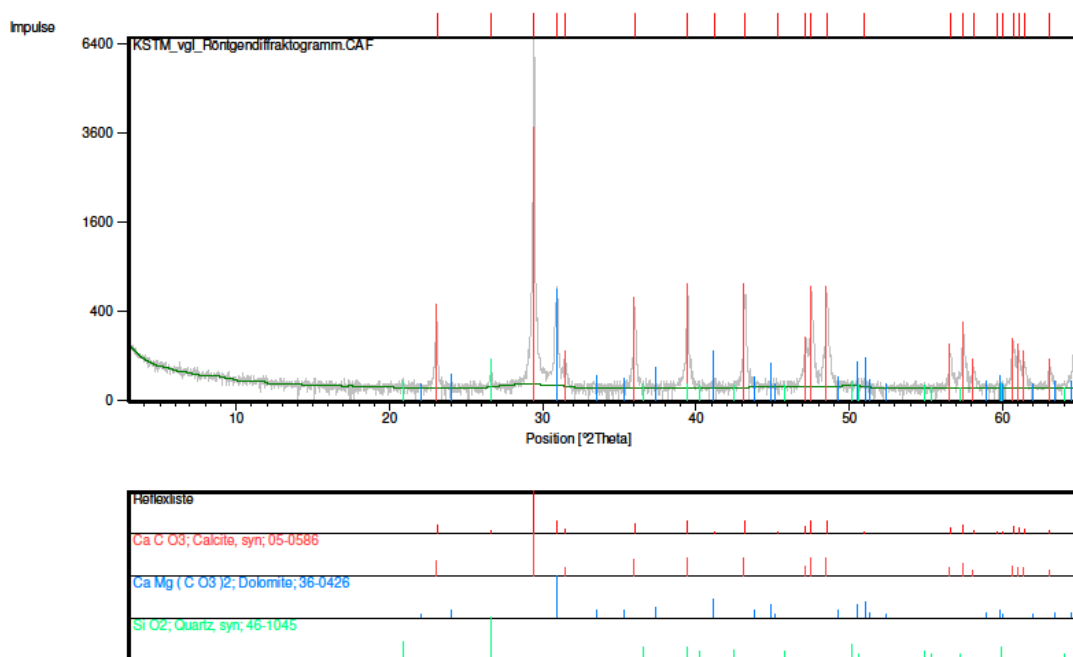


Abb. 8.2.8: Röntgendiffraktogramm des Kalksteinmehls KSTM_vgl

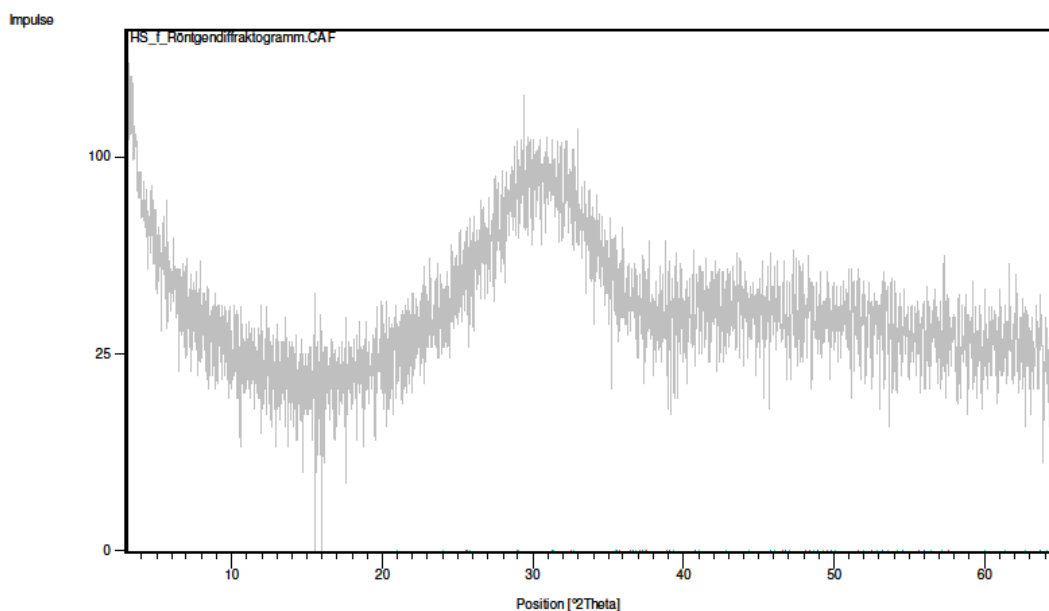


Abb. 8.2.9: Röntgendiffraktogramm des Hüttensandmehls HS_f

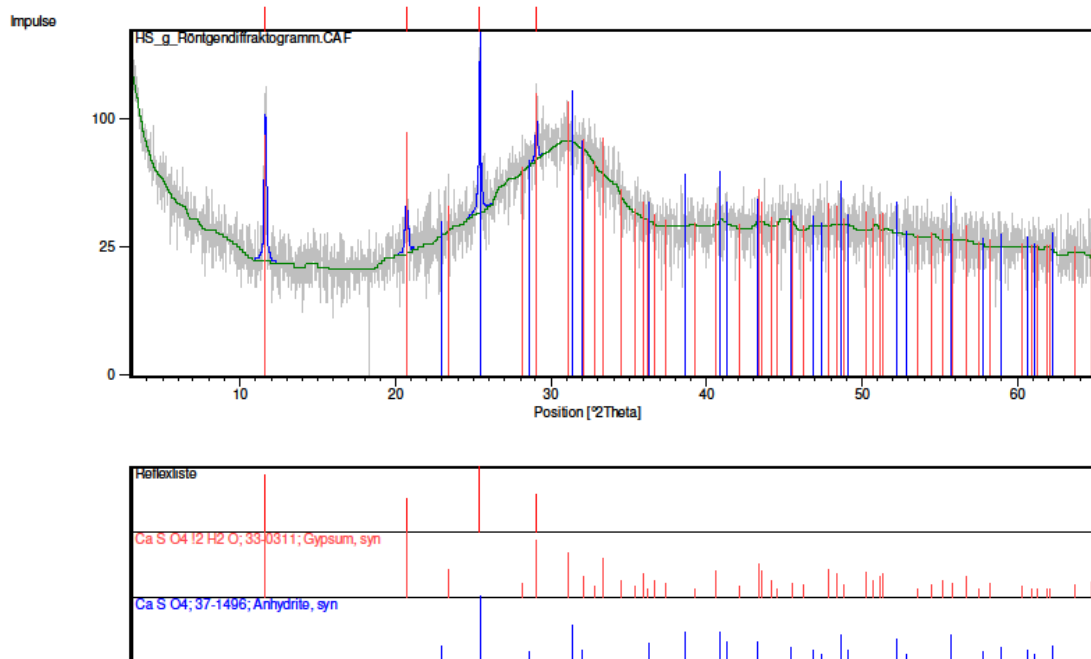


Abb. 8.2.10: Röntgendiffraktogramm des Hüttensandmehls HS_g

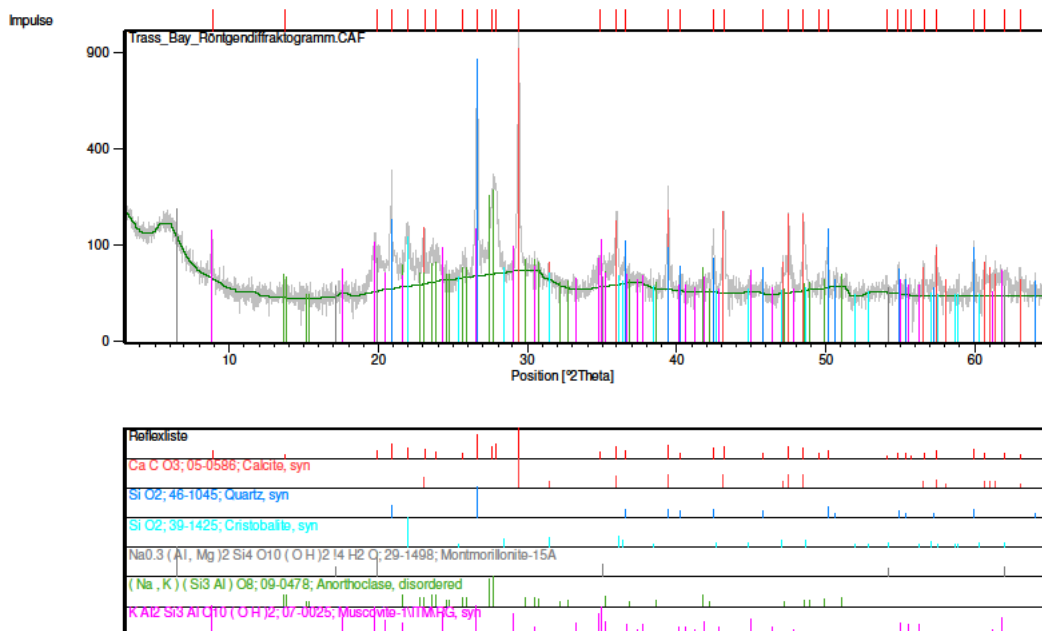


Abb. 8.2.11: Röntgendiffraktogramm des Trassmehls Trass_Bay

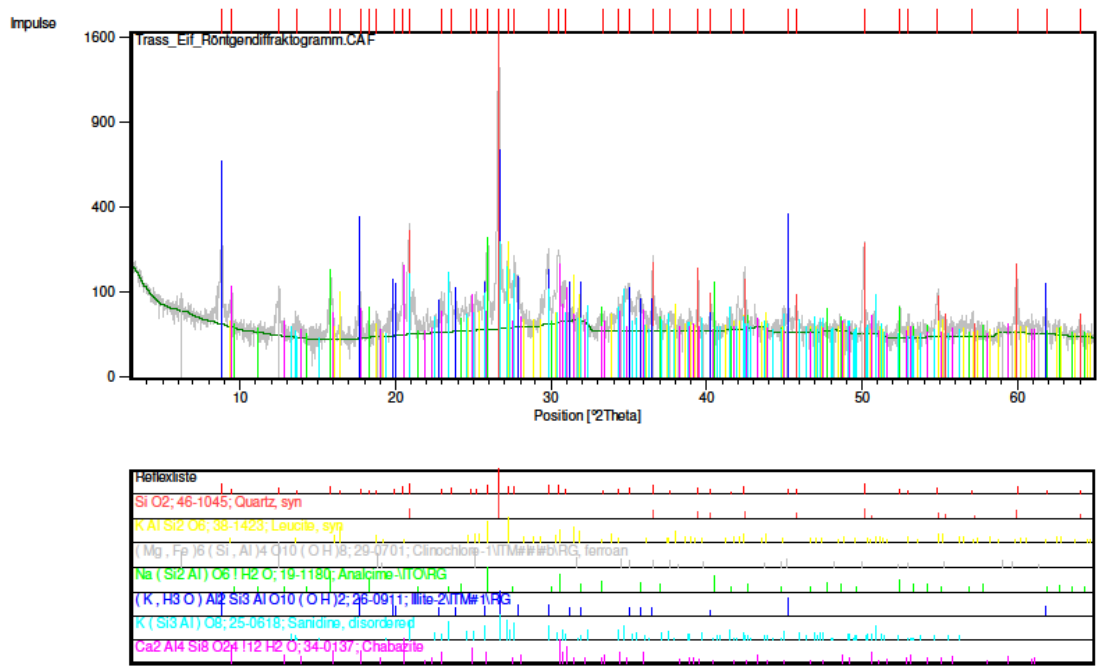
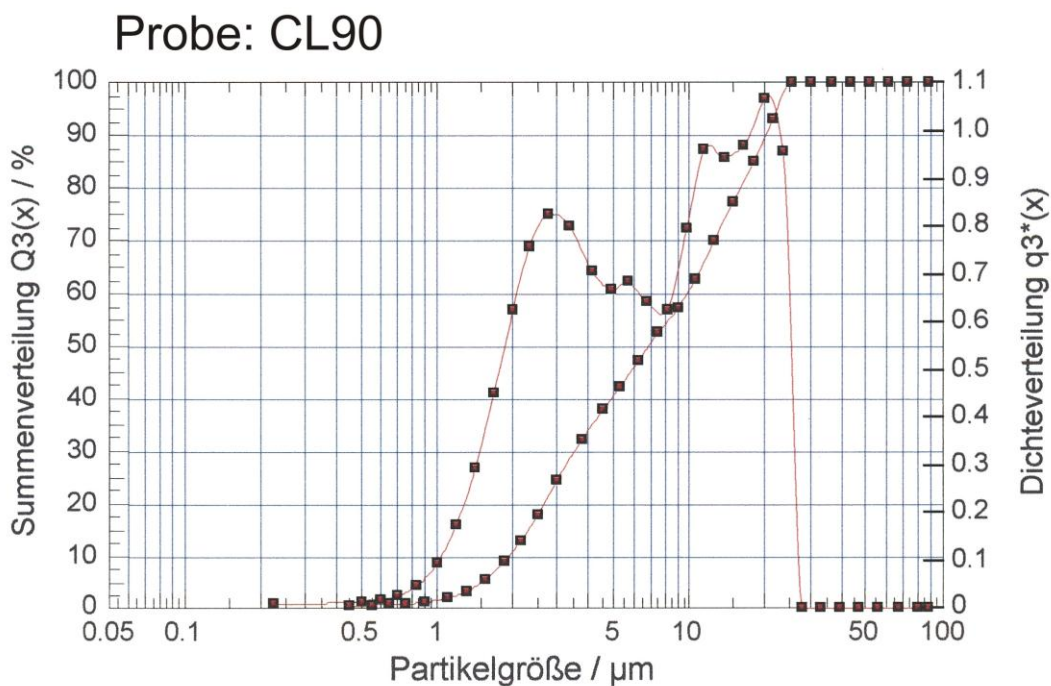


Abb. 8.2.12: Röntgendiffraktogramm des Trassmehls Trass_Eif

8.3 Korngrößenverteilung (Laserdiffraktogramme)

Flüssigkeit	Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer	120,00 s	Meßbereich	R2: 0.25/0.45...87.5µm
-Pause	90,00 s	Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl	100,00 %	Zykluszeit	1000ms
		Referenzmessung	00:20:29, 0,00 %
		Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)



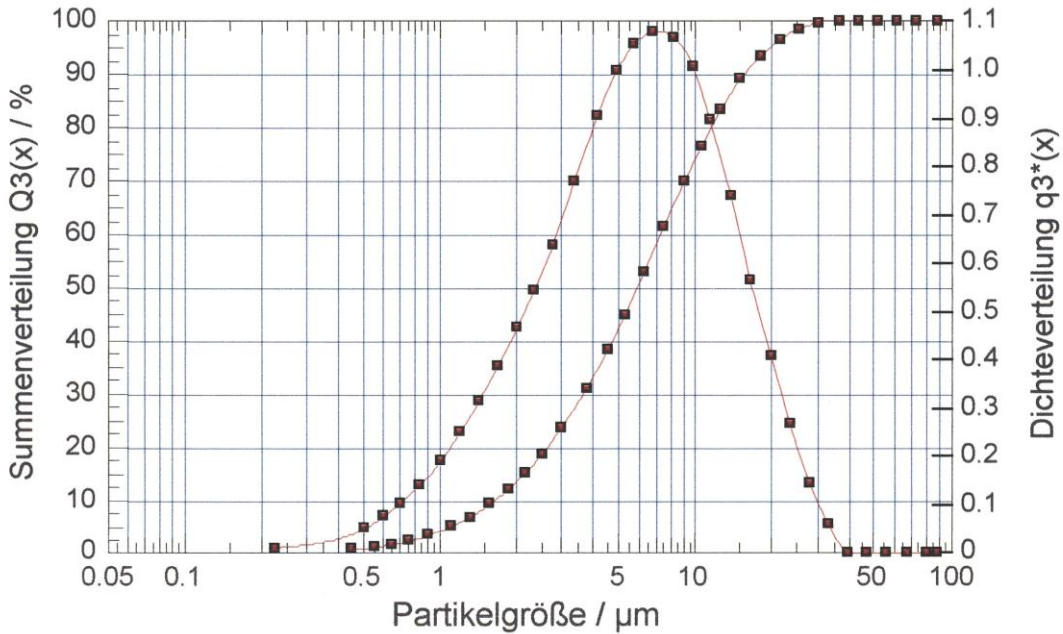
Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
0,45	0,26	1,85	8,68	7,50	52,13	30,50	100,00
0,55	0,37	2,15	12,73	9,00	57,06	36,50	100,00
0,65	0,47	2,50	17,67	10,50	62,37	43,50	100,00
0,75	0,61	3,00	24,18	12,50	69,63	51,50	100,00
0,90	0,96	3,75	31,91	15,00	77,07	61,50	100,00
1,10	1,76	4,50	37,47	18,00	84,73	73,50	100,00
1,30	3,02	5,25	41,92	21,50	92,95	87,50	100,00
1,55	5,23	6,25	47,07	25,50	100,00		

x10	=	1,95	x50	=	6,97	x90	=	20,24
Q(1)	=	1,36%	Q(2)	=	10,71%	Q(90)	=	100,00%
						copt	=	0,00 %

Abb. 8.3.1: Korngrößenverteilung der Probe CL90

Flüssigkeit Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer 120,00 s	Meßbereich	R2: 0.25/0.45...87.5µm
-Pause 90,00 s	Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl 100,00 %	Zykluszeit	1000ms
	Referenzmessung	00:04:32, 0,00 %
	Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)

Probe: CL80



Volumenverteilung

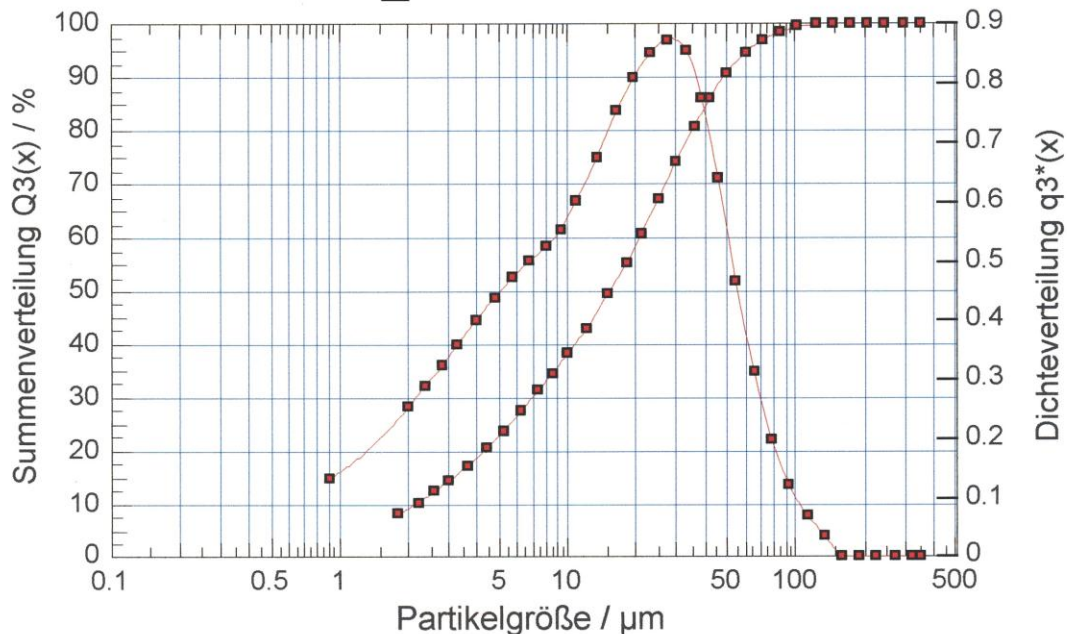
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
0,45	0,45	1,85	11,85	7,50	61,14	30,50	99,55
0,55	0,86	2,15	14,87	9,00	69,58	36,50	100,00
0,65	1,39	2,50	18,41	10,50	76,31	43,50	100,00
0,75	2,02	3,00	23,44	12,50	83,06	51,50	100,00
0,90	3,09	3,75	30,87	15,00	88,89	61,50	100,00
1,10	4,72	4,50	38,01	18,00	93,36	73,50	100,00
1,30	6,51	5,25	44,67	21,50	96,48	87,50	100,00
1,55	8,89	6,25	52,62	25,50	98,43		

x10 = 1,66 x50 = 5,92 x90 = 15,75
 Q(1) = 3,91% Q(2) = 13,36% Q(90) = 100,00%
 copt = 15,19 %

Abb. 8.3.2: Korngrößenverteilung der Probe CL80

Flüssigkeit Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer 120,00 s	Meßbereich	R4: 0.5/1.8...350µm
-Pause 90,00 s	Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl 100,00 %	Zykluszeit	1000ms
	Referenzmessung	00:05:11, 0,00 %
	Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)

Probe: CEM_NA



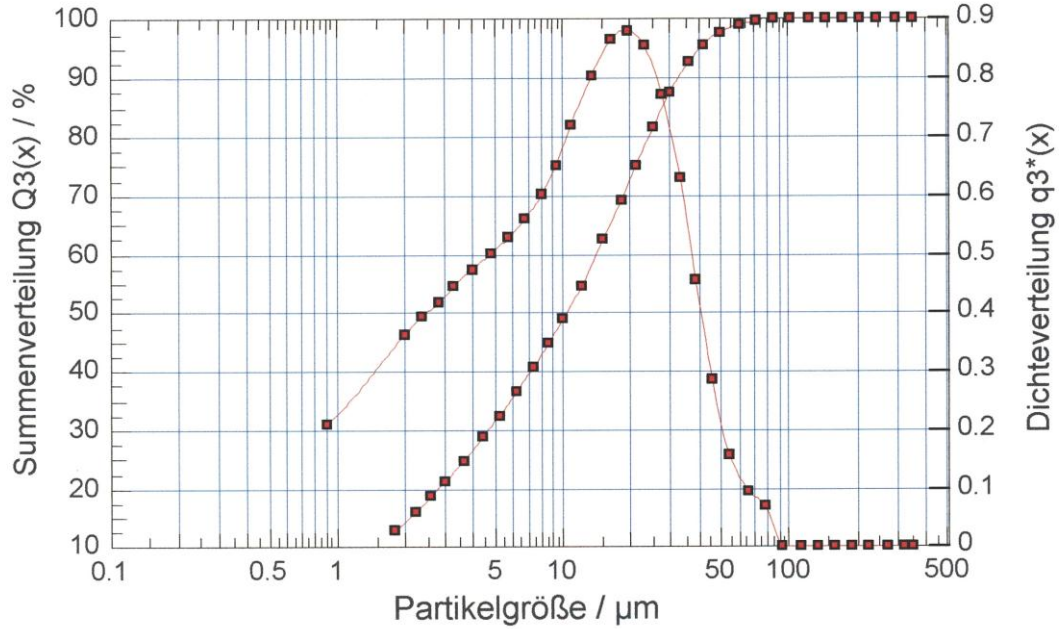
Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
1,80	7,79	7,40	30,95	30,00	73,93	122,00	99,75
2,20	9,97	8,60	34,36	36,00	80,69	146,00	100,00
2,60	12,06	10,00	37,98	42,00	85,87	174,00	100,00
3,00	14,05	12,00	42,73	50,00	90,69	206,00	100,00
3,60	16,88	15,00	49,26	60,00	94,38	246,00	100,00
4,40	20,36	18,00	55,20	72,00	96,83	294,00	100,00
5,20	23,53	21,00	60,61	86,00	98,34	350,00	100,00
6,20	27,12	25,00	67,03	102,00	99,23		

x10 =	2,21	x50 =	15,37	x90 =	48,85
Q(1) =	2,99%	Q(2) =	8,88%	Q(90) =	98,57%
				copt =	12,41 %

Abb. 8.3.3: Korngrößenverteilung der Probe CEM_NA

Flüssigkeit Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer 120,00 s	Meßbereich	R4: 0.5/1.8...350µm
-Pause 90,00 s	Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl 100,00 %	Zykluszeit	1000ms
	Referenzmessung	00:05:41, 0,00 %
	Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)

Probe: CEM_HS



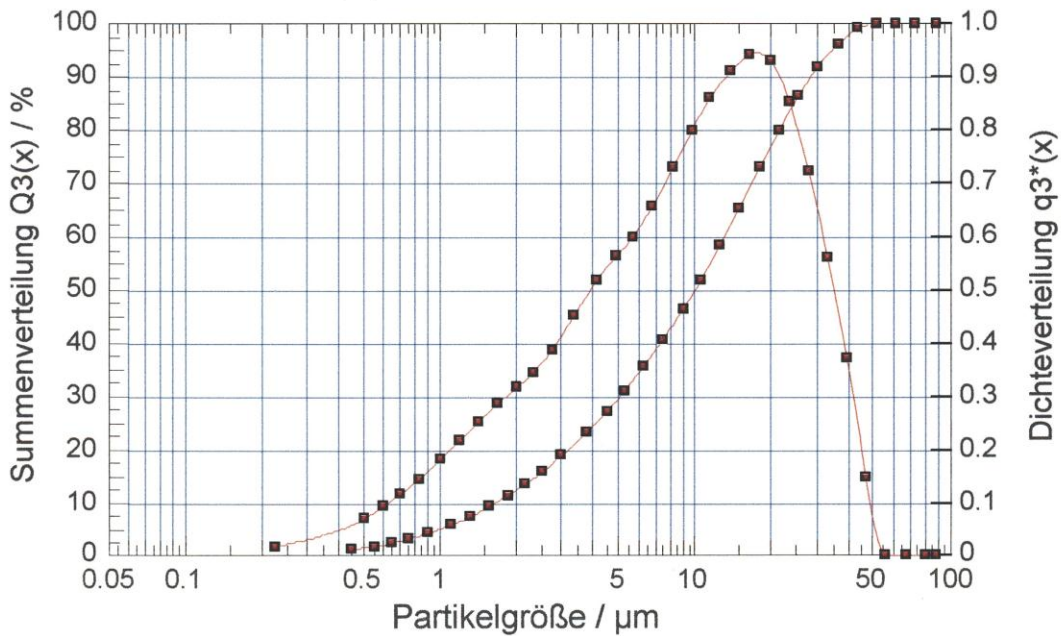
Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
1,80	12,45	7,40	40,52	30,00	87,41	122,00	100,00
2,20	15,59	8,60	44,43	36,00	92,37	146,00	100,00
2,60	18,42	10,00	48,68	42,00	95,40	174,00	100,00
3,00	21,00	12,00	54,38	50,00	97,54	206,00	100,00
3,60	24,50	15,00	62,15	60,00	98,75	246,00	100,00
4,40	28,61	18,00	68,98	72,00	99,49	294,00	100,00
5,20	32,23	21,00	74,86	86,00	100,00	350,00	100,00
6,20	36,24	25,00	81,31	102,00	100,00		

x10 = 1,54 x50 = 10,46 x90 = 33,14
 Q(1) = 4,79% Q(2) = 14,02% Q(90) = 100,00%
 copt = 11,32 %

Abb. 8.3.4: Korngrößenverteilung der Probe CEM_HS

Flüssigkeit Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer 120,00 s	Meßbereich	R2: 0.25/0.45...87.5µm
-Pause 90,00 s	Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl 100,00 %	Zykluszeit	1000ms
	Referenzmessung	00:04:39, 0,00 %
	Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)

Probe: HS_f



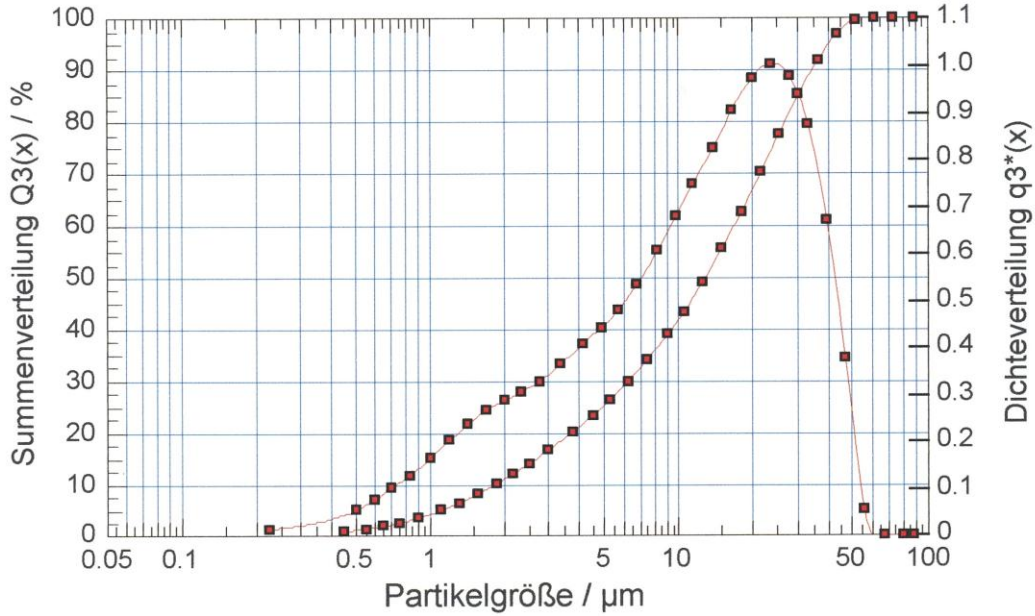
Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
0,45	0,93	1,85	11,19	7,50	40,44	30,50	91,77
0,55	1,51	2,15	13,24	9,00	46,20	36,50	96,12
0,65	2,16	2,50	15,49	10,50	51,55	43,50	98,94
0,75	2,87	3,00	18,54	12,50	58,05	51,50	100,00
0,90	3,99	3,75	22,89	15,00	65,24	61,50	100,00
1,10	5,54	4,50	26,98	18,00	72,69	73,50	100,00
1,30	7,10	5,25	30,73	21,50	79,85	87,50	100,00
1,55	9,01	6,25	35,26	25,50	86,17		

x10 =	1,69	x50 =	10,06	x90 =	28,92
Q(1) =	4,76%	Q(2) =	12,22%	Q(90) =	100,00%
				copt =	16,27 %

Abb. 8.3.5: Korngrößenverteilung der Probe HS_f

Flüssigkeit Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer 120,00 s	Meßbereich	R2: 0.25/0.45...87.5µm
-Pause 90,00 s	Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl 100,00 %	Zykluszeit	1000ms
	Referenzmessung	00:05:01, 0,00 %
	Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)

Probe: HS_g



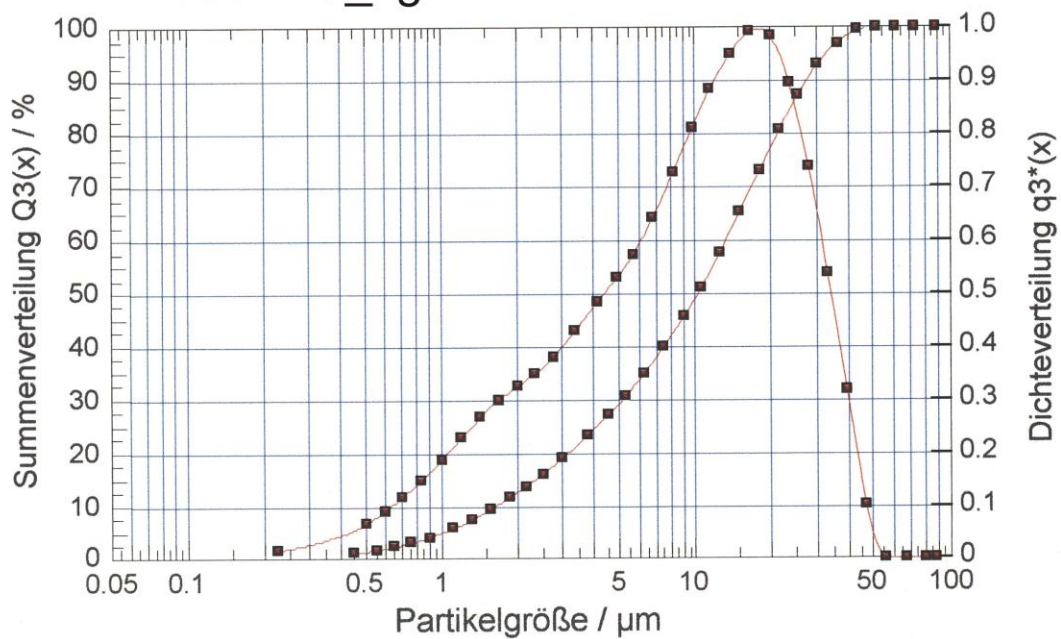
Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
0,45	0,61	1,85	9,92	7,50	33,86	30,50	84,95
0,55	1,07	2,15	11,79	9,00	38,64	36,50	91,75
0,65	1,61	2,50	13,78	10,50	43,16	43,50	96,85
0,75	2,22	3,00	16,36	12,50	48,80	51,50	99,61
0,90	3,22	3,75	19,87	15,00	55,30	61,50	100,00
1,10	4,64	4,50	23,09	18,00	62,44	73,50	100,00
1,30	6,10	5,25	26,03	21,50	69,93	87,50	100,00
1,55	7,89	6,25	29,65	25,50	77,36		

x10 = 1,86	x50 = 12,96	x90 = 34,96
Q(1) = 3,93%	Q(2) = 10,86%	Q(90) = 100,00%
		copt = 16,05 %

Abb. 8.3.6: Korngrößenverteilung der Probe HS_g

Flüssigkeit Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
	Meßbereich	R2: 0.25/0.45...87.5µm
Ultraschall-Dauer 120,00 s	Meßdauer	10,01s
-Pause 90,00 s	Zykluszeit	1000ms
Rührerdrehzahl 100,00 %	Referenzmessung	00:04:17, 0,00 %
	Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)

Probe: HS_vgl



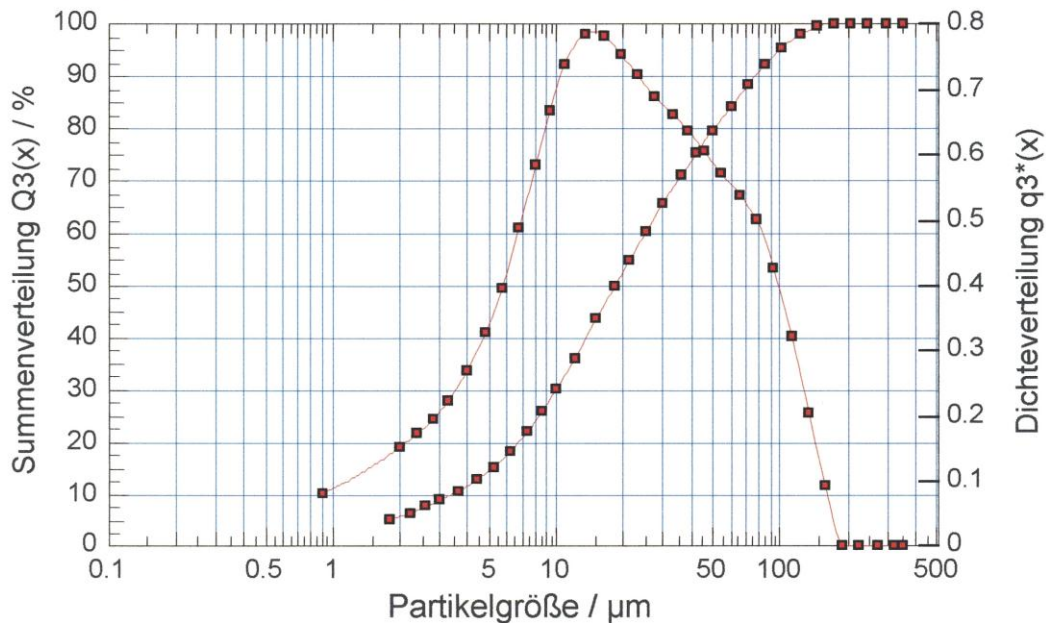
Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
0,45	0,81	1,85	11,38	7,50	39,56	30,50	92,68
0,55	1,36	2,15	13,49	9,00	45,31	36,50	96,86
0,65	2,00	2,50	15,75	10,50	50,72	43,50	99,27
0,75	2,71	3,00	18,73	12,50	57,40	51,50	100,00
0,90	3,86	3,75	22,86	15,00	64,90	61,50	100,00
1,10	5,46	4,50	26,67	18,00	72,75	73,50	100,00
1,30	7,10	5,25	30,19	21,50	80,32	87,50	100,00
1,55	9,10	6,25	34,51	25,50	86,95		

x10 = 1,67	x50 = 10,30	x90 = 28,16
Q(1) = 4,66%	Q(2) = 12,43%	Q(90) = 100,00%
		copt = 16,01 %

Abb. 8.3.7: Korngrößenverteilung der Probe HS_vgl

Flüssigkeit Wasser		Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer 120,00 s		Meßbereich	R4: 0.5/1.8...350µm
-Pause 90,00 s		Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl 100,00 %		Zykluszeit	1000ms
		Referenzmessung	00:05:08, 0,00 %
		Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)

Probe: KSTM



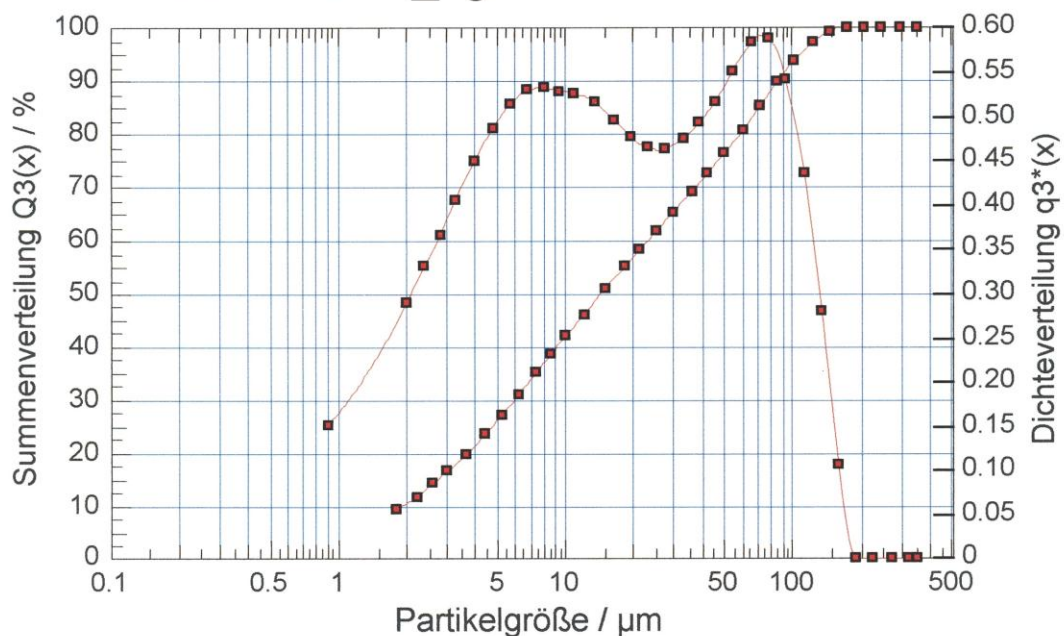
Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
1,80	4,82	7,40	21,75	30,00	65,45	122,00	97,73
2,20	6,13	8,60	25,54	36,00	70,68	146,00	99,31
2,60	7,38	10,00	29,90	42,00	74,93	174,00	100,00
3,00	8,57	12,00	35,75	50,00	79,50	206,00	100,00
3,60	10,33	15,00	43,34	60,00	84,00	246,00	100,00
4,40	12,65	18,00	49,52	72,00	88,25	294,00	100,00
5,20	15,01	21,00	54,56	86,00	92,10	350,00	100,00
6,20	18,02	25,00	60,01	102,00	95,25		

x10 =	3,49	x50 =	18,28	x90 =	78,36
Q(1) =	1,85%	Q(2) =	5,48%	Q(90) =	92,89%
				copt =	15,60 %

Abb. 8.3.8: Korngrößenverteilung der Probe KSTM

Flüssigkeit Wasser		Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer 120,00 s		Meßbereich	R4: 0.5/1.8...350µm
-Pause 90,00 s		Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl 100,00 %		Zykluszeit	1000ms
		Referenzmessung	00:05:06, 0,00 %
		Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)

Probe: KSTM_vgl



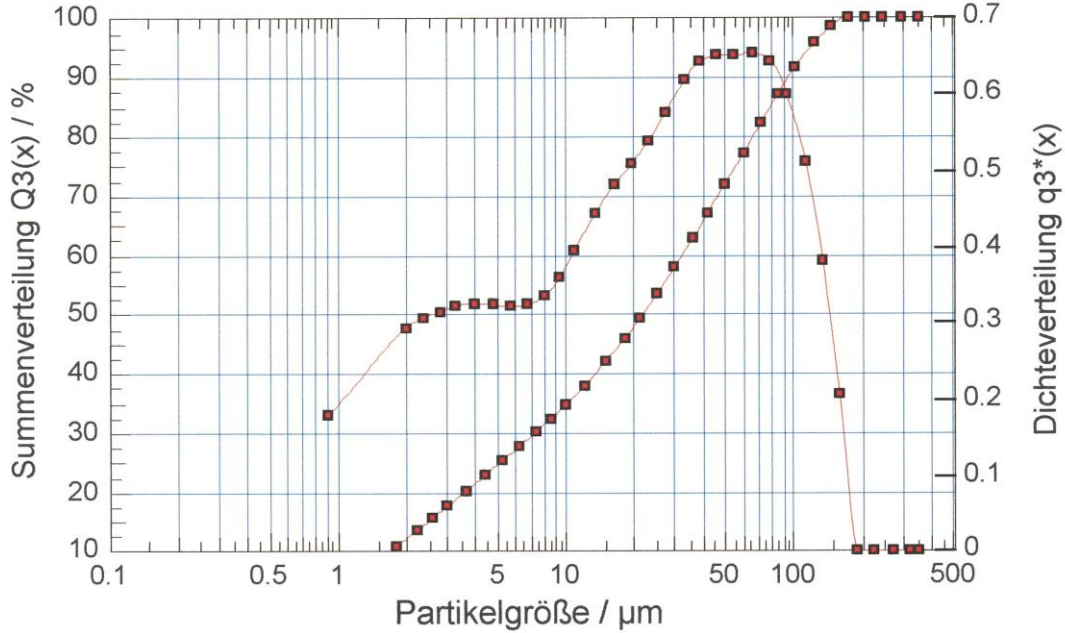
Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
1,80	9,04	7,40	34,84	30,00	65,18	122,00	97,02
2,20	11,56	8,60	38,31	36,00	68,94	146,00	99,19
2,60	13,95	10,00	41,77	42,00	72,23	174,00	100,00
3,00	16,22	12,00	45,92	50,00	76,14	206,00	100,00
3,60	19,42	15,00	50,91	60,00	80,50	246,00	100,00
4,40	23,33	18,00	54,83	72,00	85,11	294,00	100,00
5,20	26,86	21,00	58,02	86,00	89,64	350,00	100,00
6,20	30,78	25,00	61,53	102,00	93,65		

x10 =	1,95	x50 =	14,45	x90 =	87,44
Q(1) =	3,48%	Q(2) =	10,30%	Q(90) =	90,64%
				copt =	11,50 %

Abb. 8.3.9: Korngrößenverteilung der Probe KSTM_vgl

Flüssigkeit Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
Ultraschall-Dauer 120,00 s	Meßbereich	R4: 0.5/1.8...350µm
-Pause 90,00 s	Meßdauer	10,01s
Rührerdrehzahl 100,00 %	Zykluszeit	1000ms
	Referenzmessung	00:04:43, 0,00 %
	Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)

Probe: Trass_Bay



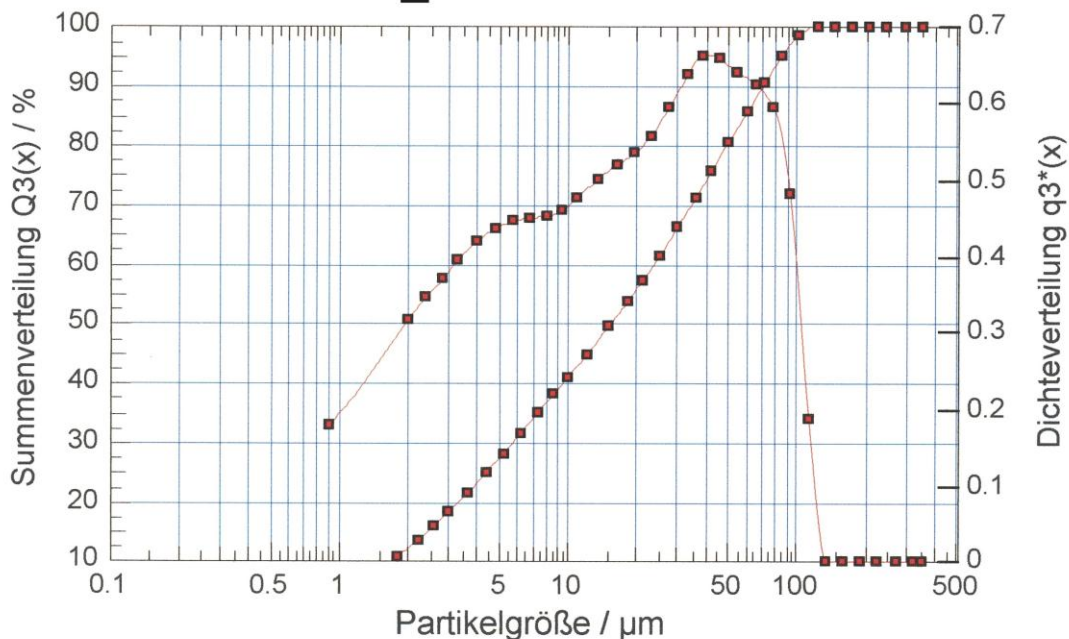
Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
1,80	10,69	7,40	30,00	30,00	57,73	122,00	95,50
2,20	13,24	8,60	32,18	36,00	62,61	146,00	98,46
2,60	15,45	10,00	34,52	42,00	66,90	174,00	100,00
3,00	17,40	12,00	37,64	50,00	71,82	206,00	100,00
3,60	19,93	15,00	41,92	60,00	76,97	246,00	100,00
4,40	22,75	18,00	45,71	72,00	82,13	294,00	100,00
5,20	25,09	21,00	49,11	86,00	87,09	350,00	100,00
6,20	27,53	25,00	53,17	102,00	91,53		

x10 =	1,72	x50 =	21,88	x90 =	96,48
Q(1) =	4,11%	Q(2) =	11,96%	Q(90) =	88,20%
				copt =	12,85 %

Abb. 8.3.10: Korngrößenverteilung der Probe Trass_Bay

Flüssigkeit Isopropylalkohol	Meßbedingung	10s (SUCELL)
	Meßbereich	R4: 0.5/1.8...350µm
Ultraschall-Dauer 120,00 s	Meßdauer	10,01s
-Pause 90,00 s	Zykluszeit	1000ms
Rührerdrehzahl 100,00 %	Referenzmessung	00:07:52, 0,00 %
	Auswertung	LD (V 3.3 Rel.1)

Probe: Trass_Eif



Volumenverteilung							
x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%	x0/µm	Q3/%
1,80	10,66	7,40	34,89	30,00	65,98	122,00	100,00
2,20	13,40	8,60	37,82	36,00	71,02	146,00	100,00
2,60	15,89	10,00	40,82	42,00	75,45	174,00	100,00
3,00	18,18	12,00	44,58	50,00	80,42	206,00	100,00
3,60	21,28	15,00	49,41	60,00	85,49	246,00	100,00
4,40	24,91	18,00	53,51	72,00	90,42	294,00	100,00
5,20	28,06	21,00	57,08	86,00	95,01	350,00	100,00
6,20	31,45	25,00	61,29	102,00	98,56		

x10 =	1,72	x50 =	15,43	x90 =	70,97
Q(1) =	4,10%	Q(2) =	12,03%	Q(90) =	95,90%
				copt =	12,78 %

Abb. 8.3.11: Korngrößenverteilung der Probe Trass_Eif

8.4 Tabellen: Prüfungen an Formulierten Kalken

Masse-%	Bezeichnung: FL	available lime [Masse-%]	Druckfestigkeit / Carbonatisierung				Schüttdichte [kg/dm ³]	WB-Wert	Frischmörtelprüfungen (Verarbeitbarkeit)				Baukalkleim von Normsteife		Raumbeständigkeit [mm]	
			7d [MPa]	28d [MPa] / [mm]	56d [MPa] / [mm]	90d [MPa] / [mm]			Wasser [g]	Ausbreitmaß [mm]	Eindringmaß [mm]	Luftgehalt [%]	Wassergehalt [Masse-%]	Erstarungszeiten Beginn/Ende [Min.]		
CL90/CEM_NA																
55/45	1.)	53,4 _{calc}	13,8	17,1			>0,6 _{calc}	0,50								
60/40	2.)	58,2 _{calc}	7,3	9,1			0,68	0,60								
	A5		10,7	13,5				0,50								
70/30	2.)	68,3	3,9	4,9			0,63	0,60								
	A5		3,7	4,8				0,50	330	185	40	2,3	49,0	140/390	+0,2	
75/25	A2;3,5	72,8 _{calc}		4,4			0,62	0,55								
80/20	3.)	77,1	1,7	2,3			0,59	0,60	325	165	24	2,8	53,6	220/480	+0,2	
CL90_vg/CEM_NA																
60/40	A5;3,5	56,1 _{calc}	8,0	9,7/0			0,57	0,60								
70/30	A3,5;5	64,4	4,1	5,2/0			0,53	0,60								
80/20	3.)	74,8 _{calc}	2,1	2,7/0			0,49	0,60								
CL90/HS_f																
60/40	2.)	58,2 _{calc}	6,0	10,9			0,66	0,60								
	A5		9,6	14,7				0,50								
70/30	A5	67,7	7,3	12,7			0,62	0,50	330	183	34	2,5	51,0	330/8-15h	+0,1	
70/30	3.)	67,7	4,8	10,8	12,5		0,62	0,60	330	183	34	2,5	51,0	330/8-15h	+0,1	
80/20	A3,5	75,3	2,9	4,9			0,56	0,60	340	164	34		53,6	500/29h	0	
CL90/HS_vgl																
70/30	A5	66,9		10,1	12,2		0,59	0,60	338	182	38					
CL90/CEM_NA/KSTM																
80/15/5	2.)	77,6 _{calc}		2,4			<0,60 _{calc}	0,55								
80/10/10	3.)	77,7	0,8	1,1			0,60	0,60								
80/5/15	3.)	76,8		0,50	1,0		0,50	0,60								
40/20/40	B2	39,3		2,4			0,79	0,55	255	162	22	3,5	39,0	170/340		
40/10/50	3.)	39,2		0,8			0,83	0,55								
CL90/CEM_HS/KSTM																
80/15/5	2.)	77,6 _{calc}		1,9			<0,60 _{calc}	0,55	375	168						
CL90/HS_f/KSTM																
20/40/40	C5	19,4 _{calc}	4,9	7,6	8,6/0,5		0,90	0,50								
	C3,5			7,4			0,90	0,55	230	162						
15/10/75	C2	13,9		2,4			0,98	0,55	225	164						
	3.)			1,6												
CL90/HS_g/KSTM																
20/40/40	C5	19,4 _{calc}	5,2	10,5	12,7/0		0,95	0,50								+0,2
	C3,5			8,8		11,2		0,55								
15/10/75	C2	14,1		2,6			1,00	0,55								
CL90/CEM_HS/HS_g/KSTM																
60/5/30/5	1.)	58,2 _{calc}		12,8			0,64	0,55								
50/25/20/5	1.)	48,5 _{calc}		14,6			0,71	0,55								
25/45/5/25	1.)	24,3 _{calc}		15,8			>0,60 _{calc}	0,55								
30/25/5/40	B/C2/3,5	29,1 _{calc}		5,9			>0,60 _{calc}	0,55								
20/5/20/55	C2/3,5	19,4 _{calc}		5,6			>0,60 _{calc}	0,55								
40/40/5/15	1.)	38,8 _{calc}		12,6			>0,60 _{calc}	0,55								
15/10/70/5	1.)	14,6 _{calc}		20,9			>0,60 _{calc}	0,55								
60/5/10/25	A2	58,2 _{calc}		2,8			>0,60 _{calc}	0,55								
40/20/25/15	1.)	38,8 _{calc}		14,1			>0,60 _{calc}	0,55								
CL90/CEM_NA/HS_g/KSTM																
60/5/30/5	1.)	58,2 _{calc}		13,2		15,9/0	>0,60 _{calc}	0,55								
50/25/20/5	1.)	48,5 _{calc}		15,7			>0,60 _{calc}	0,55								
25/45/5/25	1.)	24,3 _{calc}		17,6			>0,60 _{calc}	0,55								
30/25/5/40	B/C2/3,5	29,1 _{calc}		6,4			>0,60 _{calc}	0,55								
20/5/20/55	C2/3,5	19,4 _{calc}		5,7			>0,60 _{calc}	0,55								
15/10/70/5	1.)	14,6 _{calc}		21,8			>0,60 _{calc}	0,55								
20/5/45/30	1.)	19,4 _{calc}		10,7			>0,60 _{calc}	0,55								
50/20/15/15	A3,5	48,5 _{calc}		9,5			>0,60 _{calc}	0,55								
50/25/20/5	1.)	48,5 _{calc}		14,8			>0,60 _{calc}	0,55								
30/10/40/20	1.)	29,1 _{calc}		13,3			>0,60 _{calc}	0,55								
CL80/CEM_NA																
90/10	A3,5;5	59,4 _{calc}	2,9	6,2			0,47	0,60								
80/20	A5	52,8	5,2	10,4			0,52	0,60	355	182	30	2,7	66	280/8-15h	+0,2	
70/30	A/B5	46,0	8,6	14,4			0,55	0,60	345	185	28				+0,2	

1.) DF zu hoch, 2.) WB nicht nach Norm EN 459, 3.) DF zu niedrig, 4.) A.L.-Gehalt zu niedrig

Tab. 8.4.1: Übersicht über die an den FL-Mischungen durchgeführten Prüfungen

Masse-%	Bezeichnung: FL	available lime [Masse-%]	Druckfestigkeit / Carbonatisierung				Schüttdichte [kg/dm ³]	W/B-Wert	Frischmörtelprüfungen (Verarbeitbarkeit)				Baukalkleim von Normsteife		Raumbeständigkeit [mm]	
			7d [MPa]	28d [MPa] / [mm]	56d [MPa] / [mm]	90d [MPa] / [mm]			Wasser [g]	Ausbreitmaß [mm]	Eindringmaß [mm]	Luftgehalt [%]	Wassergehalt [Masse-%]	Erstarungszeiten Beginn/Ende [Min.]		
CL80/CEM_HS/KSTM																
25/35/40	1.)	16,5 _{calc}		12,0			>0,60 _{calc}	0,55								
50/10/40	B/C2	32,3	-	3,0	3,9/0		0,65	0,55								+0,2
CL80/CEM_NA/KSTM																
25/35/40	1.)	16,5 _{calc}		12,4			0,83	0,55								
50/10/40	B/C2	33,2		3,5	4,8		0,65	0,55	261	163	18	3,4	47,6	250/8-15h		+0,2
50/20/30	B/C5	32,8	5,5	9,8			0,68	0,50	285	183	32					
50/30/20	1.)	33,5	10,4	17,2			0,65	0,50								
CL80/CEM_NA/KSTM_vgl																
50/10/40	B/C2	33,3		3,5			0,62	0,55	270	167	17					+0,1
CL80/CEM_NA/Trass_Bay/KSTM																
55/25/15/5	B3,5;5	36,3 _{calc}		8,5			0,59	0,60								
	2.)			10,8		0,55										
20/10/15/55	4.)	13,2 _{calc}		2,4			0,85	0,55								
30/50/5/15	1.)	19,8 _{calc}		19,0			>0,60 _{calc}	0,55								
30/35/15/20	1.)	19,8 _{calc}		15,9			>0,60 _{calc}	0,55								
20/35/20/25	1.), 4.)	13,2 _{calc}		11,7			>0,60 _{calc}	0,55								
30/20/35/15	C3,5	19,8 _{calc}		7,4			>0,60 _{calc}	0,55								
45,3/10/14,4/30,2	B/C2	29,9 _{calc}		3,7			>0,60 _{calc}	0,55								
CL80/CEM_NA/Tras_Bay																
75,5/10/14,5	A3,5	49,8 _{calc}		5,3			<0,60 _{calc}	0,60								
	2.)			6,3		0,55										
45,3/10/44,7	B/C2;3,5	29,9 _{calc}		5,7			>0,60 _{calc}	0,55								
22,7/10/67,3	C2;3,5	15,0 _{calc}		5,8			>0,60 _{calc}	0,55								
CL80/Trass_Bay/KSTM																
20/60/20	4.)	13,2 _{calc}		3,3		6,1/1,5	>0,60 _{calc}	0,55								+0,2
30/30/40	3.)	19,8 _{calc}		1,9			>0,60 _{calc}	0,55								
CL80/Trass_Eif/KSTM																
20/60/20	4.)	12,8		4,1		7,1/2	0,78	0,55								
30/30/40	C2	18,7		2,7			>0,60 _{calc}	0,55								
CL80/CEM_NA/Trass_Eif/KSTM																
70/5/5/20	2.)	46,2 _{calc}		3,4			<0,60 _{calc}	0,55								
70/15/5/10	2.)	46,2 _{calc}		8,5			<0,60 _{calc}	0,55								
55/25/15/5	B5	36,3 _{calc}		11,0			0,58	0,60								
	2.)			14,0		0,55										
20/10/15/55	4.)	13,2 _{calc}		3,2			>0,60 _{calc}	0,55								
30/50/5/15	1.)	19,8 _{calc}		24,2			>0,60 _{calc}	0,55								
20/35/20/25	1.), 4.)	13,2 _{calc}		15,5			>0,60 _{calc}	0,55								
30/20/35/15	1.)	19,8 _{calc}		10,5			>0,60 _{calc}	0,55								
45,3/10/14,5/30,2	B/C2;3,5	29,9 _{calc}		4,6			>0,60 _{calc}	0,55								
CL80/CEM_NA/Trass_Eif																
75,5/10/14,5	A3,5; 5	49,8 _{calc}		6,0			0,51	0,60								
	2.)			7,5		0,55										
45,3/10/44,7	B/C3,5;5	29,9 _{calc}		8,1			0,62	0,55								
22,7/10/67,3	C 3,5	15,0 _{calc}		8,2			>0,60 _{calc}	0,55								
CL80/CEM_HS/Trass_Eif																
86/7/7	A2	56,8 _{calc}	1,6	2,8			<0,60 _{calc}	0,65								
75,5/10/14,5	A3,5;5	49,8 _{calc}		5,9			<0,60	0,60								
	2.)			7,5		0,55										
71,7/7/21,3	2.)	47,3 _{calc}	1,5	3,4			>0,60 _{calc}	0,65								
45,3/10/44,7	B/C3,5	29,9 _{calc}		6,4			0,60	0,60								
	2.)			7,5		0,55										
22,7/10/67,3	C3,5	15,0 _{calc}		7,5			>0,60 _{calc}	0,55								
CL80/CEM_HS/Trass_Eif/KSTM																
50/5/5/40	B2	33,0 _{calc}		2,0			>0,60 _{calc}	0,55								
55/25/15/5	B5	36,3 _{calc}		10,0			<0,60 _{calc}	0,60								
	2.)			12,8		0,55										
20/10/15/55	4.)	13,2 _{calc}		3,2			>0,60 _{calc}	0,55								
40/20/30/10	1.)	26,4 _{calc}		11,0			>0,60 _{calc}	0,55								
30/50/5/15	1.)	19,8 _{calc}		23,1			>0,60 _{calc}	0,55								
20/35/20/25	1.), 4.)	13,2 _{calc}		14,9			>0,60 _{calc}	0,55								
30/20/35/15	C3,5	19,8 _{calc}		9,7			>0,60 _{calc}	0,55								
45,3/10/14,4/30,2	B/C2;3,5	29,9 _{calc}		4,5			>0,60 _{calc}	0,55								

1.) DF zu hoch, 2.) W/B nicht nach Norm EN 459, 3.) DF zu niedrig, 4.) A.L.-Gehalt zu niedrig

Tab. 8.4.2: Übersicht über die an den FL-Mischungen durchgeführten Prüfungen

Masse-%	Bezeichnung: FL	available lime [Masse-%]	Druckfestigkeit				Schüttdichte [kg/dm ³]	W/B-Wert	Frischmörtelprüfungen (Verarbeitbarkeit)			Baukalkleim von Normsteife		Anmerkungen
			7d [MPa]	28d [MPa]	56d [MPa]	90d [MPa]			Wasser [g]	Ausbreitmaß [mm]	Eindringmaß [mm]	Luftgehalt [%]	Wassergehalt [Masse-%]	
CL80/CEM_HS/Trass_Bay														
86/7/7	A2	56,8 _{calc}	1,4	2,3			<0,60 _{calc}	0,65						
75,5/10/14,5	A3,5	49,8 _{calc}		5,2			<0,60 _{calc}	0,60						
	2.)			6,3				0,55						
71,7/7/21,3	2.)	47,3 _{calc}	1,2	2,1			>0,60 _{calc}	0,65						
45,3/10/44,7	B/C2;3,5	29,9 _{calc}		5,8			>0,60 _{calc}	0,55						
22,7/10/67,3	C2;3,5	15,0 _{calc}		5,7			>0,60 _{calc}	0,55						
CL80/CEM_HS/Trass_Bay/KSTM														
80/5/5/10	2.)	52,8 _{calc}		2,6			<0,60 _{calc}	0,55						
55/25/15/5	2.)	36,3 _{calc}		11,0			<0,60 _{calc}	0,55						
20/10/15/5/5	4.)	13,2 _{calc}		2,2			>0,60 _{calc}	0,55						
30/50/5/15	1.)	19,8 _{calc}		21,9			>0,60 _{calc}	0,55						
20/40/10/30	1.), 4.)	13,2 _{calc}		16,0			>0,60 _{calc}	0,55						
20/35/20/25	1.), 4.)	13,2 _{calc}		12,2			>0,60 _{calc}	0,55						
30/20/35/15	C3,5	19,8 _{calc}		7,6			>0,60 _{calc}	0,55						
45,3/10/14,4/30,2	B/C2	29,9 _{calc}		3,7			>0,60 _{calc}	0,55						
CL90/CEM_NA/HS_f/KSTM														
60/5/30/5	1.)	58,2 _{calc}		12,7			>0,60 _{calc}	0,55						
50/25/20/5	1.)	48,5 _{calc}		16,4			>0,60 _{calc}	0,55						
25/45/5/25	1.)	24,3 _{calc}		23,1			>0,60 _{calc}	0,55						
30/25/5/40	B/C3,5	29,1 _{calc}		8,6			>0,60 _{calc}	0,55						
20/5/20/5/5	C2/3,5	19,4 _{calc}		4,9			>0,60 _{calc}	0,55						
15/10/70/5	1.)	14,6 _{calc}		15,3			>0,60 _{calc}	0,55						
70/5/20/5	A3,5	67,9 _{calc}		8,1			>0,60 _{calc}	0,55						
60/5/5/30	3.)	58,2 _{calc}		1,7			>0,60 _{calc}	0,55						
CL90/CEM_HS/HS_f/KSTM														
60/5/30/5	1.)	58,2 _{calc}		12,5			>0,60 _{calc}	0,55	325	160				
50/25/20/5	1.)	48,5 _{calc}		17,5			>0,60 _{calc}	0,55	330	162				
50/20/15/15		48,5 _{calc}					>0,60 _{calc}		275	161				
25/45/5/25	1.)	24,3 _{calc}		21,4			>0,60 _{calc}	0,55	240	160				
30/25/5/40	B/C3,5	29,1 _{calc}		8,0			>0,60 _{calc}	0,55	240	164				
20/5/20/5/5	C2/3,5	19,4 _{calc}		4,0			>0,60 _{calc}	0,55	230	162				
15/10/70/5	1.)	14,6 _{calc}		17,6			>0,60 _{calc}	0,55						
50/15/25/10	1.)	48,5 _{calc}		13,4			>0,60 _{calc}	0,55						
40/5/45/10	1.)	26,4 _{calc}		11,8			>0,60 _{calc}	0,55						
40/20/15/25		26,4 _{calc}					>0,60 _{calc}		275	168				
40/20/30/10		26,4 _{calc}					>0,60 _{calc}		275	165				
30/10/40/20	1.)	29,1 _{calc}		11,2			>0,60 _{calc}	0,55						
20/35/5/40	1.)	19,4 _{calc}		12,4			>0,60 _{calc}	0,55						
CL90/CEM_HS/KSTM														
20/50/30	1.)	19,4 _{calc}		17,5			0,88	0,55						
15,5/20/64,5		15,0 _{calc}					>0,60 _{calc}		225	163				
15,5/30/54,5		15,0 _{calc}					>0,60 _{calc}		240	164				
41,2/20/38,8		40,0 _{calc}					>0,60 _{calc}		265	164				
41,2/30/28,8		40,0 _{calc}					>0,60 _{calc}		265	164				
51,5/30/18,5		50,0 _{calc}					>0,60 _{calc}		295	165				
61,9/20/18,1		60,0 _{calc}					>0,60 _{calc}		310	165				
80/10/10	2.)	77,6 _{calc}		1,1			0,57	0,55						
CL90/CEM_HS/HS_f														
65/20/15		63,1 _{calc}					>0,60 _{calc}		325	168				
50/20/30		48,5 _{calc}					>0,60 _{calc}		300	167				
40/20/40		38,8 _{calc}					>0,60 _{calc}		275	169				
CL90/CEM_HS														
80/20		77,6 _{calc}					<0,60 _{calc}		325	169				
CL80/CEM_NA/HS_g														
70/5/25	2.)			12,1			0,53	0,55						
	A/B5	46,3		10,7				0,60						
CL80/CEM_HS/HS_g														
70/5/25	2.)			12,1			<0,60 _{calc}	0,55						
	A/B5	45,3		10,4				0,60						

1.) DF zu hoch, 2.) W/B nicht nach Norm EN 459, 3.) DF zu niedrig, 4.) A.L.-Gehalt zu niedrig

Tab. 8.4.3: Übersicht über die an den FL-Mischungen durchgeführten Prüfungen

Masse-%	Bezeichnung: FL	available lime [Masse-%]	Druckfestigkeit				Schüttdichte [kg/dm ³]	W/B-Wert	Frischmörtelprüfungen (Verarbeitbarkeit)				Baukalkleim von Normsteife		Raumbeständigkeit [mm]
			7d [MPa]	28d [MPa]	56d [MPa]	90d [MPa]			Wasser [g]	Ausbreitmaß [mm]	Eindringmaß [mm]	Luftgehalt [%]	Wassergehalt [Masse-%]	Eisetzungszeiten Beginn/Ende [Min.]	
CL80/Trass_Eif															
71,6/28,4	2.)	47,3 _{calc}	1,3	3,4			>0,60 _{calc}	0,65							
CL80/Trass_Eif															
71,6/28,4	2.)	47,3 _{calc}	0,6	1,6			>0,60 _{calc}	0,65							
CL80_vg/CEM_HS															
80/20	A3,5	59,2		4,5			<0,60 _{calc}	0,60							
CL80/CEM_HS															
80/20	A3,5;5	53,5	4,4	8,7			0,51	0,60	355	184	30				+0,2
CL80/CEM_HS/HS_f															
70/5/25	2.)	46,2 _{calc}		11,3			<0,60 _{calc}	0,55							
CL80/CEM_NA/HS_f															
70/5/25	2.)	46,2 _{calc}		12,3			<0,60 _{calc}	0,55							
CL80/CEM_NA/HS_g/KSTM															
40/20/15/25	1.)	26,4 _{calc}		13,7			>0,60 _{calc}	0,55							
35/40/5/20	1.)	23,1 _{calc}		20,1			>0,60 _{calc}	0,55							
45/20/30/5	1.)	29,7 _{calc}		20,5			>0,60 _{calc}	0,55							
50/10/5/35	B/C2;3,5	33,0 _{calc}		5,5			0,65	0,55							
75/5/5/15	2.)	49,5 _{calc}		5,7			<0,60 _{calc}	0,55							
	A3,5			4,8				0,60							
20/5/5/70	4.)	13,2 _{calc}		2,3			>0,60 _{calc}	0,55							
20/5/60/15	1.), 4.)	13,2 _{calc}		16,4			>0,60 _{calc}	0,55							
20/25/10/45	1.), 4.)	13,2 _{calc}		12,2			>0,60 _{calc}	0,55							
CL80/CEM_HS/HS_g/KSTM															
40/20/15/25	1.)	26,4 _{calc}		12,6			>0,60 _{calc}	0,55							
35/40/5/20	1.)	23,1 _{calc}		18,7			>0,60 _{calc}	0,55							
45/20/30/5	1.)	29,7 _{calc}		17,6			>0,60 _{calc}	0,55							
50/10/5/35	B/C2;3,5	33,0 _{calc}		4,8			0,64	0,55							
75/5/5/15	2.)	49,5 _{calc}		5,5			<0,60 _{calc}	0,55							
	A3,5			4,2				0,60							
20/5/5/70	4.)	13,2 _{calc}		2,2			>0,60 _{calc}	0,55							
20/5/60/15	1.), 4.)	13,2 _{calc}		17,4			>0,60 _{calc}	0,55							
30/25/25/20	1.)	19,8 _{calc}		17,9			>0,60 _{calc}	0,55							
60/5/5/30	2.)	39,6 _{calc}		3,9			>0,60 _{calc}	0,55							
20/25/10/45	1.), 4.)	13,2 _{calc}		11,1			>0,60 _{calc}	0,55							
CL80/CEM_NA/HS_f/KSTM															
40/20/15/25	1.)	26,4 _{calc}		14,8			>0,60 _{calc}	0,55							
35/40/5/20	1.)	23,1 _{calc}		25,0			>0,60 _{calc}	0,55							
45/20/30/5	1.)	29,7 _{calc}		20,9			>0,60 _{calc}	0,55							
45/20/30/5	1.)	29,7 _{calc}		20,6			>0,60 _{calc}	0,55							
50/10/5/35	B/C2;3,5	33,0 _{calc}		5,5			>0,60 _{calc}	0,55							
75/5/5/15	2.)	49,5 _{calc}		6,7			<0,60 _{calc}	0,55							
20/5/5/70	4.)	13,2 _{calc}		1,7			>0,60 _{calc}	0,55							
20/5/60/15	1.)	13,2 _{calc}		10,4			>0,60 _{calc}	0,55							
70/15/10/5	1.)	46,2 _{calc}		12,5			>0,60 _{calc}	0,55							
30/25/25/20	1.)	19,8 _{calc}		19,8			>0,60 _{calc}	0,55							
20/25/10/45	1.)	13,2 _{calc}		14,3			>0,60 _{calc}	0,55							
CL80/CEM_HS/HS_f/KSTM															
40/20/15/25	1.)	26,4 _{calc}		15,2			>0,60 _{calc}	0,55							
35/20/20/25	1.)	23,1 _{calc}		15,3			>0,60 _{calc}	0,55							
35/40/5/20	1.)	23,1 _{calc}		23,3			>0,60 _{calc}	0,55							
45/20/30/5	1.)	29,7 _{calc}		19,3			>0,60 _{calc}	0,55							
				21,2											
50/10/5/35	B/C2;3,5	33,0 _{calc}		5,3			>0,60 _{calc}	0,55							
75/5/5/15	2.)	49,5 _{calc}		4,8			<0,60 _{calc}	0,55							
20/5/5/70	4.)	13,2 _{calc}		2,4			>0,60 _{calc}	0,55							
20/5/60/15	1.)	13,2 _{calc}		12,3			>0,60 _{calc}	0,55							
20/25/10/45	4.)	13,2 _{calc}		13,0			>0,60 _{calc}	0,55							

1.) DF zu hoch, 2.) W/B nicht nach Norm EN 459, 3.) DF zu niedrig, 4.) A.L. -Gehalt zu niedrig

Tab. 8.4.4: Übersicht über die an den FL-Mischungen durchgeführten Prüfungen

Masse-%	Bezeichnung: FL	available lime [Masse-%]	Druckfestigkeit / Carbonatisierung				Schüttdichte [kg/dm ³]	W/B-Wert	Frischmörtelprüfungen (Verarbeitbarkeit)				Baukalkleim von Normsteife		Raumbeständigkeit [mm]
			7d [MPa]	28d [MPa] / [mm]	56d [MPa] / [mm]	90d [MPa] / [mm]			Wasser [g]	Ausbreitmaß [mm]	Eindringsmaß [mm]	Luftgehalt [%]	Wassergehalt [Masse-%]	Erfatungszeiten Beginn/Ende [Min.]	
CL90/CEM_NA/KSTM															
20/50/30	2.)	19,4 _{calc}		21,1			0,89	0,60	240	164					
CL90/CEM_NA/Trass_Bay/KSTM															
50/30/10/10	2.)	48,5 _{calc}		7,2			0,70	0,60	320	163					
15/5/35/45	2.)	14,6 _{calc}		0,6			0,88	0,60	300	168					
20/40/35/5	2.)	19,4 _{calc}		13,9			0,84	0,60	320	162					
35/30/30/5	1.)	34,0 _{calc}		10,7			>0,60 _{calc}	0,55							
15/40/40/5		14,6 _{calc}		18,5			>0,60 _{calc}	0,55							
CL90/CEM_HS/Trass_Bay/KSTM															
30,9/20/33,6/15,5	B/C2;3,5	30,0 _{calc}	2,0	4,0	4,1		0,75	0,60	305	165					
30,9/20/18,1/30,9	B/C2	30,0 _{calc}	1,8	3,3	3,3		0,77	0,60	280	165					
45/45/5/5	1.)	43,7 _{calc}		17,9			>0,60 _{calc}	0,55							
20/40/35/5	1.)	19,4 _{calc}		17,1			>0,60 _{calc}	0,55							
65/15/15/5	A2	63,1 _{calc}		2,7			>0,60 _{calc}	0,55							
CL90/CEM_HS/Trass_Bay															
15,5/20/64,5	C2	15,0 _{calc}	2,3	2,6	5,2		0,81	0,60	330	165					
30,9/20/49,1	C2	30,0 _{calc}	2,0	2,1	5,0		0,74	0,60	350	165					
46,4/20/33,6	A/B2;3,5	45,0 _{calc}	1,8	3,8	3,6		0,67	0,60	365	165					
61,9/20/18,1	A/B2;3,5	60,0 _{calc}	1,7	3,6	3,2		0,63	0,60	370	165					
61,9/13,9/24,2	2.)	60,0 _{calc}	0,9	1,5			>0,60 _{calc}	0,65							
72,7/13,9/13,9	2.)	70,0 _{calc}	0,8	1,5			>0,60 _{calc}	0,65							
CL90/CEM_NA/Trass_Bay															
15/15/70	2.)	14,6 _{calc}		2,7			0,82	0,60	335	166					
45/10/45	2.)	43,7 _{calc}		1,9			0,67	0,60	350	165					
CL90/Trass_Bay/KSTM															
70/10/20	3.)	67,9 _{calc}		0,8			0,60	0,60	475	160					
55/5/40	3.)	67,9 _{calc}		0,8			0,68	0,55							
35/5/60	3.)	34,0 _{calc}		1,2			0,76	0,55							
30/5/65	2.)	29,1 _{calc}		0,6			0,81	0,60	300	165					
CL90/Trass_Eif/KSTM															
70/10/20	3.)	67,9 _{calc}		0,9			0,62	0,55	465	162					
30/5/65	2.)	29,1 _{calc}		0,2			0,82	0,55	270	164					
35/5/60	2.)	34,0 _{calc}		0,2			>0,60 _{calc}	0,55							
55/5/40	2.)	67,9 _{calc}		0,2			>0,60 _{calc}	0,55							
CL90/CEM_NA/Trass_Eif/KSTM															
50/30/10/10	A3,5	48,5 _{calc}		9,6			0,70	0,55	290	161					
15/5/35/45	3.)	14,6 _{calc}		1,4			0,86	0,55	250	166					
20/40/35/5	1.)	19,4 _{calc}		12,1			0,83	0,55	255	167					
45/45/5/5	1.)	43,7 _{calc}		14,9			>0,60 _{calc}	0,55							
25/35/20/20	2.)	24,3 _{calc}		8,9			>0,60 _{calc}	0,55							
CL90/CEM_NA/Trass_Eif															
15/15/70	C3,5	14,6 _{calc}		7,4			0,80	0,55	250	161					
45/10/45	A/B2;3,5	43,7 _{calc}		5,3			0,66	0,55	300	167					
CL90/CEM_HS/Trass_Eif															
15,5/20/64,5	2.)	15,0 _{calc}	4,9	8,3	10,9		0,80	0,55	268	165					
30,9/20/49,1	2.)	30,0 _{calc}	4,3	7,8	11,2		0,76	0,55	288	165					
46,4/20/33,6	2.)	45,0 _{calc}	3,5	6,5	8,6		0,68	0,55	308	165					
61,9/20/18,1	2.)	60,0 _{calc}	2,7	4,0	5,7		0,61	0,55	338	165					
61,9/13,9/24,2	2.)	60,0 _{calc}	1,1	2,1			>0,60 _{calc}	0,65							
72,7/13,9/13,9	2.)	70,0 _{calc}	0,8	1,7			>0,60 _{calc}	0,65							
CL90/CEM_HS/Trass_Eif/KSTM															
30,9/20/33,6/15,5	2.)	30,0 _{calc}	3,4	10,7	8,2		0,76	0,55	283	165					
30,9/20/18,1/30,9	2.)	30,0 _{calc}	2,7	5,5	6,0		0,78	0,55	263	165					
30,9/30/33,6/5,5	2.)	30,0 _{calc}	6,3	13,4	17,0		0,72	0,55	278	165					
30,9/30/18,1/20,9	2.)	30,0 _{calc}	5,2	10,5	23,8		0,77	0,55	258	165					
75/5/10/10	2.)	72,8 _{calc}		1,2			<0,60 _{calc}	0,55							

1.) DF zu hoch, 2.) W/B nicht nach Norm EN 459, 3.) DF zu niedrig, 4.) A.L.-Gehalt zu niedrig

Tab. 8.4.5: Übersicht über die an den FL-Mischungen durchgeführten Prüfungen

8.5 Tabellen: Druckversuche für die statistischen Modelle

Versuch	CL90	CEMNA	CEMHS	HS_f	HS_g	KSTM	DruckFestigkeit
1	0,6	0,05	0	0	0,3	0,05	13,2
2	0,5	0,25	0	0	0,2	0,05	15,7
3	0,25	0,45	0	0	0,05	0,25	17,6
4	0,3	0,25	0	0	0,05	0,4	6,4
5	0,2	0	0	0	0,4	0,4	8,8
6	0,15	0	0	0	0,1	0,75	2,6
7	0,2	0,05	0	0	0,2	0,55	5,7
8	0,8	0,15	0	0	0	0,05	2,4
9	0,6	0,05	0	0,3	0	0,05	12,7
10	0,5	0,25	0	0,2	0	0,05	16,4
11	0,25	0,45	0	0,05	0	0,25	23,1
12	0,3	0,25	0	0,05	0	0,4	8,6
13	0,2	0	0	0,4	0	0,4	7,4
14	0,15	0	0	0,1	0	0,75	1,6
15	0,2	0,05	0	0,2	0	0,55	4,9
16	0,6	0	0,05	0	0,3	0,05	12,8
17	0,5	0	0,25	0	0,2	0,05	14,6
18	0,25	0	0,45	0	0,05	0,25	15,8
19	0,3	0	0,25	0	0,05	0,4	5,9
20	0,2	0	0,05	0	0,2	0,55	5,6
21	0,8	0	0,15	0	0	0,05	1,9
22	0,6	0	0,05	0,3	0	0,05	12,5
23	0,5	0	0,25	0,2	0	0,05	17,6
24	0,25	0	0,45	0,05	0	0,25	21,4
25	0,3	0	0,25	0,05	0	0,4	8
26	0,2	0	0,05	0,2	0	0,55	4
27	0,2	0,05	0	0	0,45	0,3	10,7
28	0,4	0	0,4	0	0,05	0,15	12,6
29	0,4	0	0,05	0,45	0	0,1	11,79
30	0,6	0,05	0	0,05	0	0,3	1,72
31	0,15	0,1	0	0,7	0	0,05	15,26
32	0,15	0	0,1	0,7	0	0,05	17,62
33	0,5	0	0,15	0,25	0	0,1	13,14
34	0,7	0,05	0	0,2	0	0,05	8,11
35	0,2	0	0,35	0,05	0	0,4	12,42
36	0,3	0	0,1	0,4	0	0,2	11,21
37	0,15	0,1	0	0	0,7	0,05	21,8
38	0,15	0	0,1	0	0,7	0,05	20,9
39	0,5	0,25	0	0	0,2	0,05	14,8
40	0,5	0,2	0	0	0,15	0,15	9,5
41	0,6	0	0,05	0	0,1	0,25	2,8
42	0,4	0	0,2	0	0,25	0,15	14,1
43	0,3	0,1	0	0	0,4	0,2	13,3
44	0,4	0,1	0	0	0	0,5	0,8
45	0,4	0,2	0	0	0	0,4	2,4

Tab. 8.5.1: Druckversuche für das statistische Modell mit den Komponenten CL90 / Zement / Hüttensand / KSTM

Versuch	CL80	CEMNA	CEMHS	HS_f	HS_g	KSTM	DruckFestigkeit
1	0,4	0,2	0	0	0,15	0,25	13,7
2	0,35	0,4	0	0	0,05	0,2	20,1
3	0,45	0,2	0	0	0,3	0,05	20,5
4	0,7	0,05	0	0	0,25	0	12,1
5	0,5	0,1	0	0	0,05	0,35	5,5
6	0,75	0,05	0	0	0,05	0,15	5,7
7	0,2	0,05	0	0	0,05	0,7	2,3
8	0,2	0,25	0	0	0,1	0,45	12,2
9	0,4	0,2	0	0,15	0	0,25	14,8
10	0,35	0,4	0	0,05	0	0,2	25
11	0,45	0,2	0	0,3	0	0,05	20,9
12	0,7	0,05	0	0,25	0	0	12,3
13	0,5	0,1	0	0,05	0	0,35	5,5
14	0,75	0,05	0	0,05	0	0,15	6,7
15	0,2	0,05	0	0,05	0	0,7	1,7
16	0,2	0,25	0	0,1	0	0,45	14,3
17	0,4	0	0,2	0	0,15	0,25	12,6
18	0,35	0	0,4	0	0,05	0,2	18,7
19	0,45	0	0,2	0	0,3	0,05	17,6
20	0,7	0	0,05	0	0,25	0	12,1
21	0,5	0	0,1	0	0,05	0,35	4,8
22	0,75	0	0,05	0	0,05	0,15	5,5
23	0,2	0	0,05	0	0,05	0,7	2,2
24	0,2	0	0,25	0	0,1	0,45	11,1
25	0,4	0	0,2	0,15	0	0,25	15,2
26	0,35	0	0,4	0,05	0	0,2	23,3
27	0,45	0	0,2	0,3	0	0,05	19,3
28	0,7	0	0,05	0,25	0	0	11,3
29	0,5	0	0,1	0,05	0	0,35	5,3
30	0,75	0	0,05	0,05	0	0,15	4,8
31	0,2	0	0,05	0,05	0	0,7	2,4
32	0,2	0	0,25	0,1	0	0,45	13
33	0,2	0,05	0	0,6	0	0,15	10,4
34	0,2	0	0,05	0,6	0	0,15	12,3
35	0,45	0,2	0	0,3	0	0,05	20,6
36	0,45	0	0,2	0,3	0	0,05	21,2
37	0,3	0,25	0	0,25	0	0,2	19,8
38	0,7	0,15	0	0,1	0	0,05	12,5
39	0,35	0	0,2	0,2	0	0,25	15,3
40	0,2	0,05	0	0	0,6	0,15	16,4
41	0,2	0	0,05	0	0,6	0,15	17,4
42	0,3	0	0,25	0	0,25	0,2	17,9
43	0,6	0	0,05	0	0,05	0,3	3,9

Tab. 8.5.2: Druckversuche für das statistische Modell mit den Komponenten CL80 / Zement / Hüttensand / KSTM

Versuche	CL90	CEMNA	CEMHS	Trass_Bay	Trass_Eif	KSTM	DruckFestigkeit
1	0,5	0,3	0	0,1	0	0,1	7,15
2	0,15	0,15	0	0,7	0	0	2,66
3	0,7	0	0	0,1	0	0,2	0,76
4	0,3	0	0	0,05	0	0,65	0,57
5	0,15	0,05	0	0,35	0	0,45	0,63
6	0,2	0,4	0	0,35	0	0,05	13,93
7	0,2	0,5	0	0	0	0,3	21,08
8	0,45	0,1	0	0,45	0	0	1,9
9	0,5	0,3	0	0	0,1	0,1	9,63
10	0,15	0,15	0	0	0,7	0	7,38
11	0,7	0	0	0	0,1	0,2	0,91
12	0,3	0	0	0	0,05	0,65	0,23
13	0,15	0,05	0	0	0,35	0,45	1,38
14	0,2	0,4	0	0	0,35	0,05	21,04
15	0,45	0,1	0	0	0,45	0	5,34
16	0,5	0	0,3	0,1	0	0,1	9,49
17	0,15	0	0,15	0,7	0	0	3,76
18	0,7	0	0	0,1	0	0,2	0,46
19	0,15	0	0,05	0,35	0	0,45	1,08
20	0,2	0	0,4	0,35	0	0,05	15,67
21	0,2	0	0,5	0	0	0,3	21,34
22	0,45	0	0,1	0,45	0	0	1,81
23	0,5	0	0,3	0	0,1	0,1	8,85
24	0,15	0	0,15	0	0,7	0	10,06
25	0,7	0	0	0	0,1	0,2	0,37
26	0,3	0	0	0	0,05	0,65	0,5
27	0,15	0	0,05	0	0,35	0,45	2,75
28	0,2	0	0,4	0	0,35	0,05	19,59
29	0,45	0	0,1	0	0,45	0	6,14
30	0,2	0,4	0	0,35	0	0,05	12,08
31	0,35	0,3	0	0	0,3	0,05	10,66
32	0,45	0,45	0	0,05	0	0,05	14,85
33	0,25	0,35	0	0,2	0	0,2	8,91
34	0,15	0,4	0	0	0,4	0,05	18,46
35	0,45	0	0,45	0	0,05	0,05	17,87
36	0,2	0	0,4	0	0,35	0,05	17,09
37	0,75	0	0,05	0,1	0	0,1	1,09
38	0,65	0	0,15	0	0,15	0,05	2,74

Tab. 8.5.3: Druckversuche für das statistische Modell mit den Komponenten CL90 / Zement / Trass / KSTM

Versuch	CL80	CEMNA	CEMHS	Trass_Eif	Trass_Bay	KSTM	DruckFestigkeit
1	0,25	0,35	0	0	0	0,4	12,4
2	0,2	0	0	0	0,6	0,2	3,3
3	0,55	0,25	0	0	0,15	0,05	10,8
4	0,2	0,1	0	0	0,15	0,55	2,4
5	0,3	0,5	0	0	0,05	0,15	19
6	0,2	0,35	0	0	0,2	0,25	11,7
7	0,3	0,2	0	0	0,35	0,15	7,4
8	0,3	0	0	0	0,3	0,4	1,9
9	0,755	0,1	0	0	0,145	0	6,3
10	0,453	0,1	0	0	0,447	0	5,7
11	0,227	0,1	0	0	0,673	0	5,8
12	0,453	0,1	0	0	0,145	0,302	3,7
13	0,2	0	0	0,6	0	0,2	4,1
14	0,55	0,25	0	0,15	0	0,05	14,1
15	0,2	0,1	0	0,15	0	0,55	3,2
16	0,3	0,5	0	0,05	0	0,15	24,2
17	0,2	0,35	0	0,2	0	0,25	15,5
18	0,3	0,2	0	0,35	0	0,15	10,5
19	0,3	0	0	0,3	0	0,4	2,7
20	0,755	0,1	0	0,145	0	0	7,5
21	0,453	0,1	0	0,447	0	0	8,1
22	0,227	0,1	0	0,673	0	0	8,2
23	0,453	0,1	0	0,145	0	0,302	4,6
24	0,25	0	0,35	0	0	0,4	12
25	0,55	0	0,25	0	0,15	0,05	11
26	0,2	0	0,1	0	0,15	0,55	2,2
27	0,3	0	0,5	0	0,05	0,15	21,9
28	0,2	0	0,35	0	0,2	0,25	12,2
29	0,3	0	0,2	0	0,35	0,15	7,6
30	0,755	0	0,1	0	0,145	0	6,3
31	0,453	0	0,1	0	0,447	0	5,8
32	0,227	0	0,1	0	0,673	0	5,7
33	0,453	0	0,1	0	0,145	0,3	3,7
34	0,55	0	0,25	0,15	0	0,05	12,8
35	0,2	0	0,1	0,15	0	0,55	3,2
36	0,3	0	0,5	0,05	0	0,15	23,1
37	0,2	0	0,35	0,2	0	0,25	14,9
38	0,3	0	0,2	0,35	0	0,15	9,7
39	0,755	0	0,1	0,145	0	0	7,5
40	0,453	0	0,1	0,447	0	0	7,5
41	0,227	0	0,1	0,673	0	0	7,5
42	0,453	0	0,1	0,145	0	0,302	4,5
43	0,7	0,05	0	0,05	0	0,2	3,38
44	0,7	0,15	0	0,05	0	0,1	8,46
45	0,3	0,35	0	0	0,15	0,2	15,94
46	0,5	0	0,05	0,05	0	0,4	1,99
47	0,2	0	0,4	0	0,1	0,3	16,03
48	0,4	0	0,2	0,3	0	0,1	10,99
49	0,8	0	0,05	0	0,05	0,1	2,6

Tab. 8.5.4: Druckversuche für das statistische Modell mit den Komponenten CL80 / Zement / Trass / KSTM

8.6 2D Projektionen der statistischen Modelle

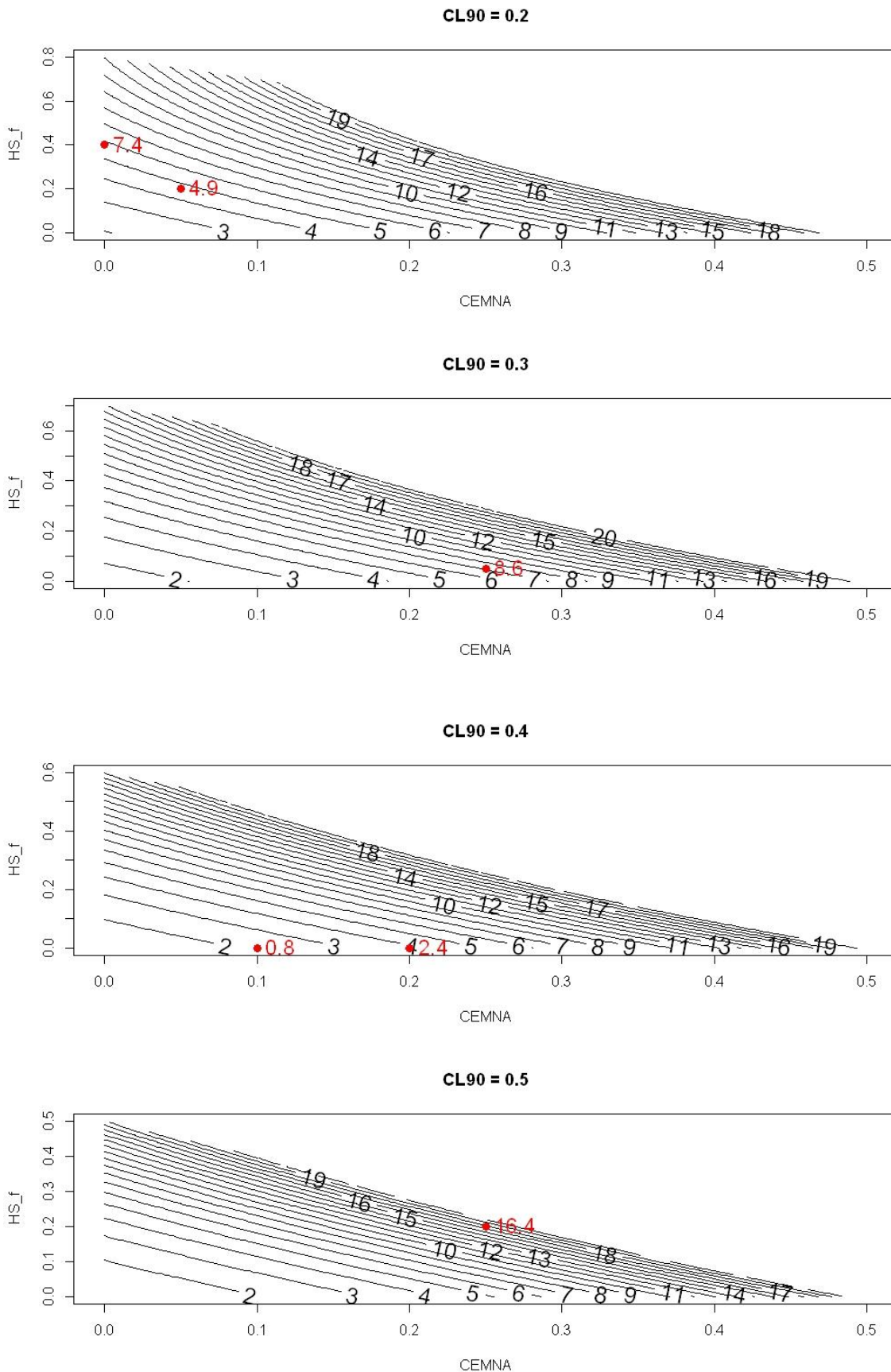


Abb. 8.6.1: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL90 / CEM_NA / HS_f / KSTM

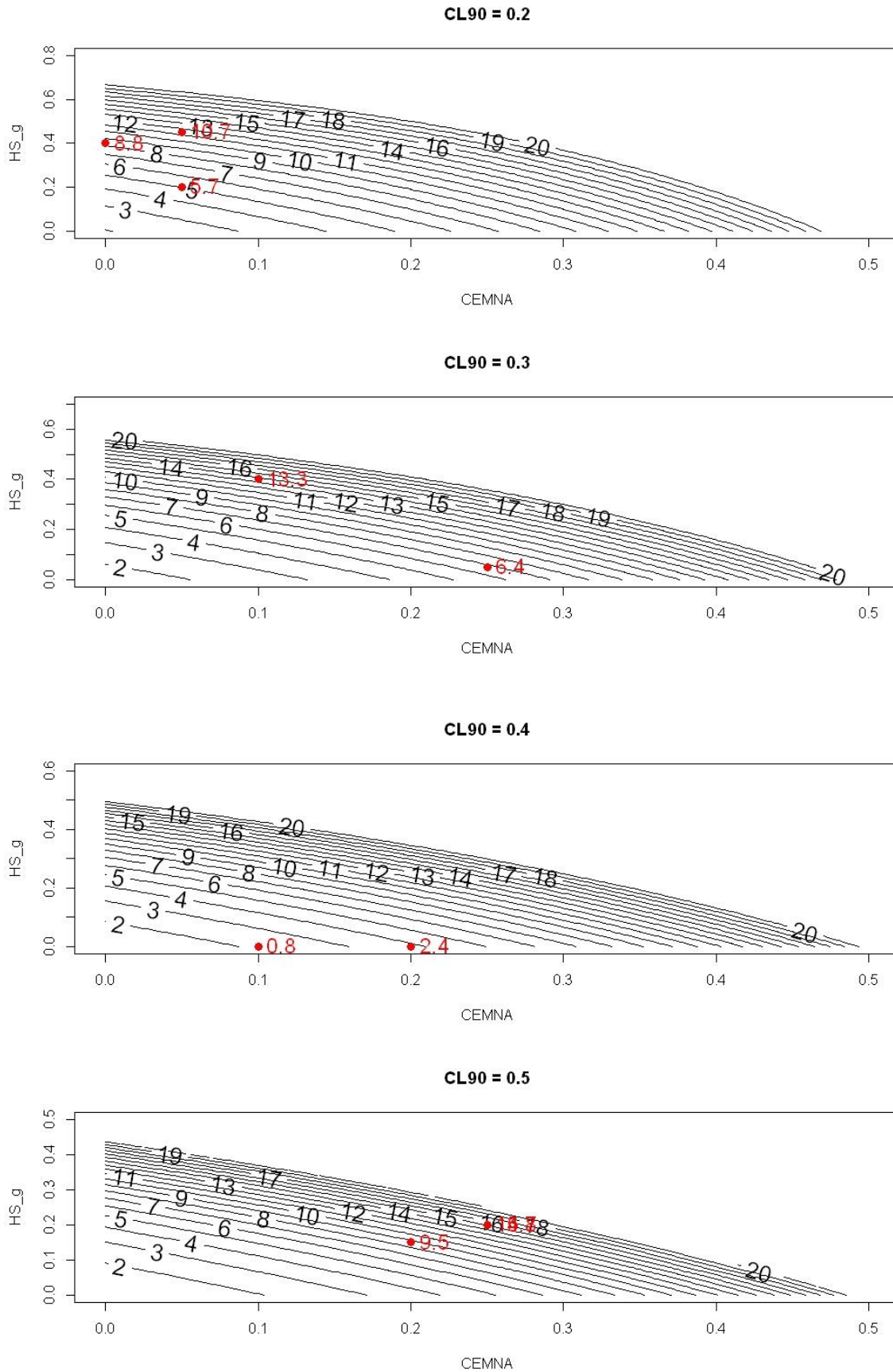


Abb. 8.6.2: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL90 / CEM_NA / HS_g / KSTM

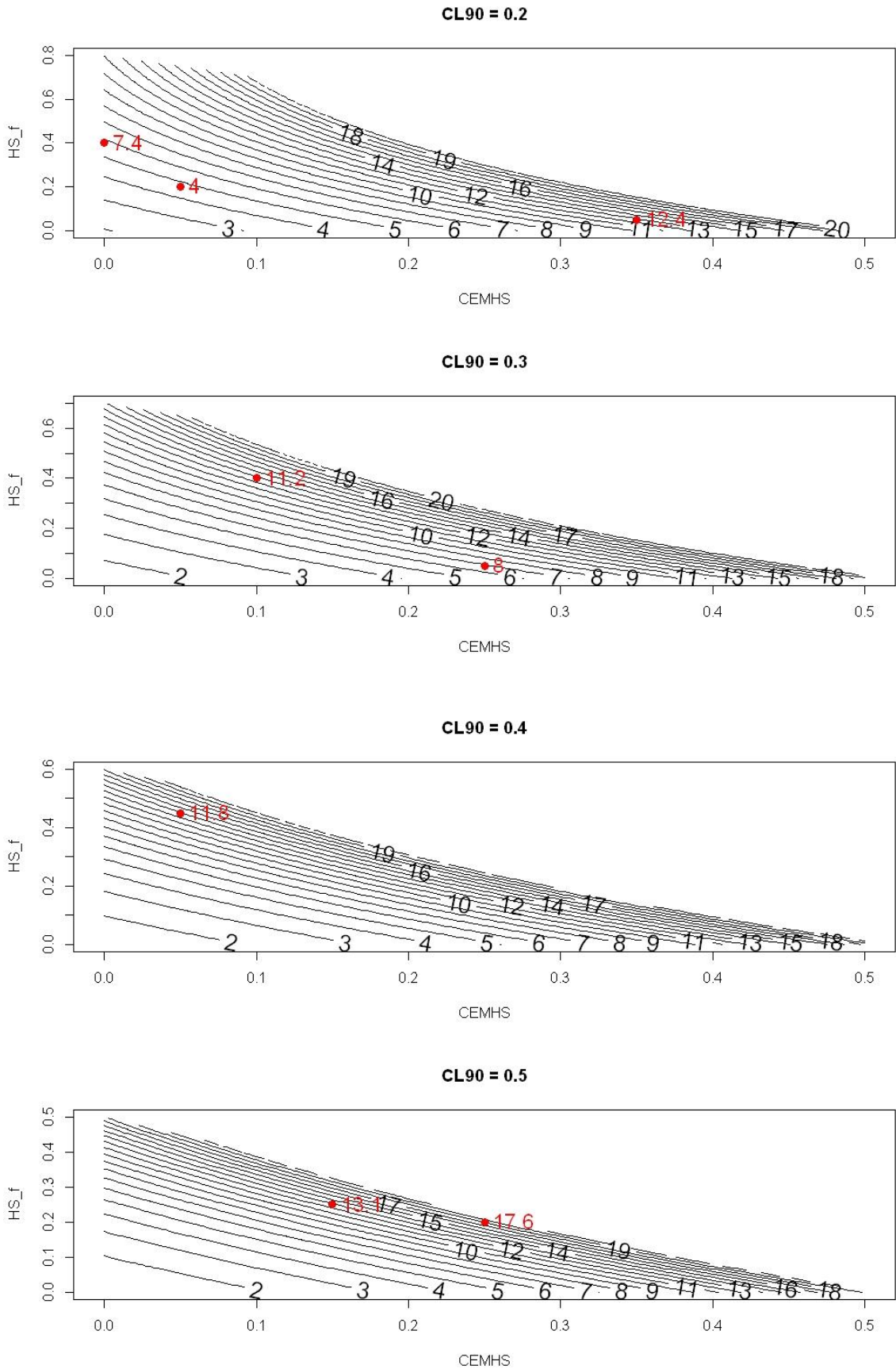


Abb. 8.6.3: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten $CL90 / CEM_{HS} / HS_f / KSTM$

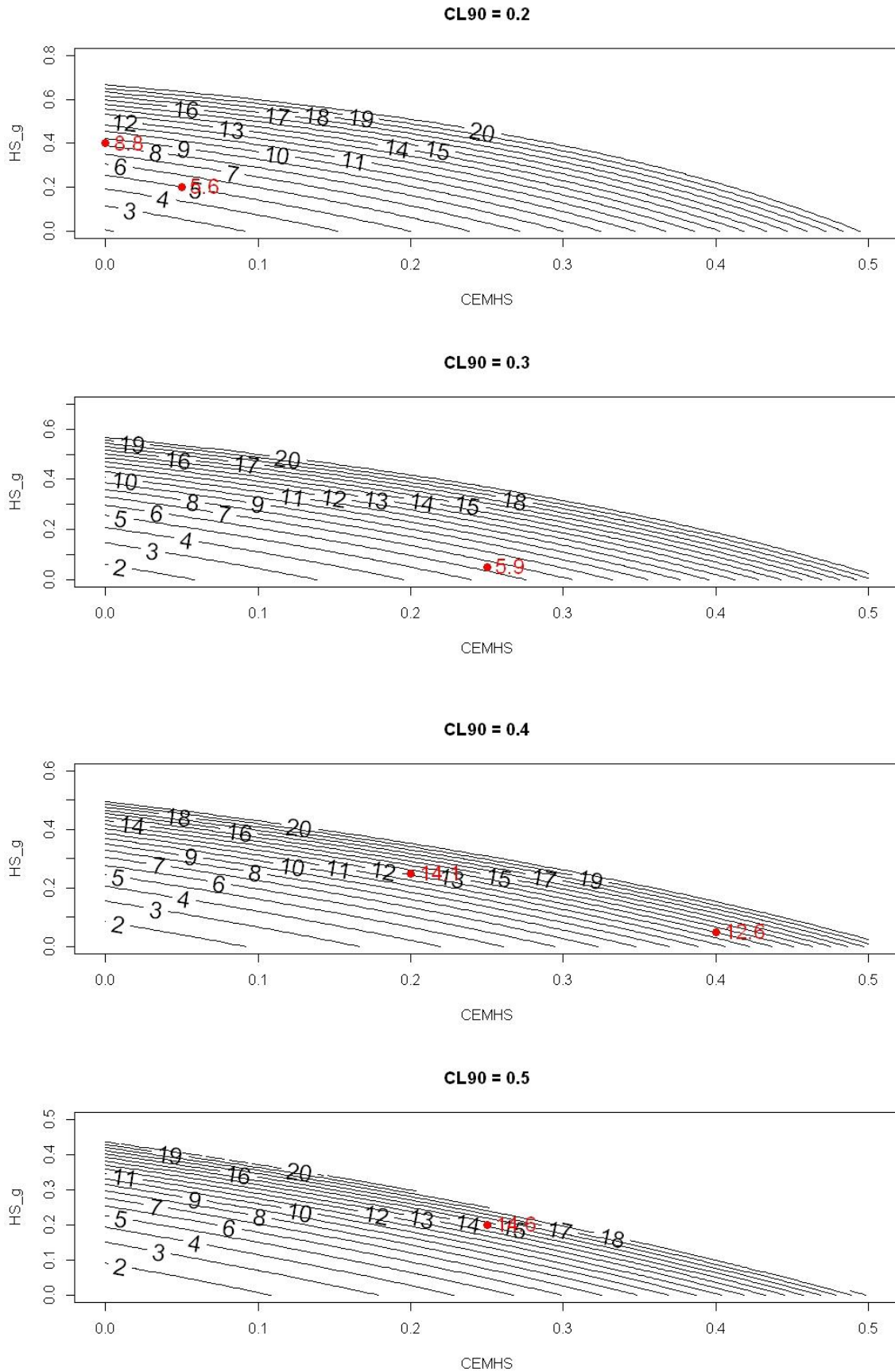


Abb. 8.6.4: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL90 / CEM_HS / HS_g / KSTM

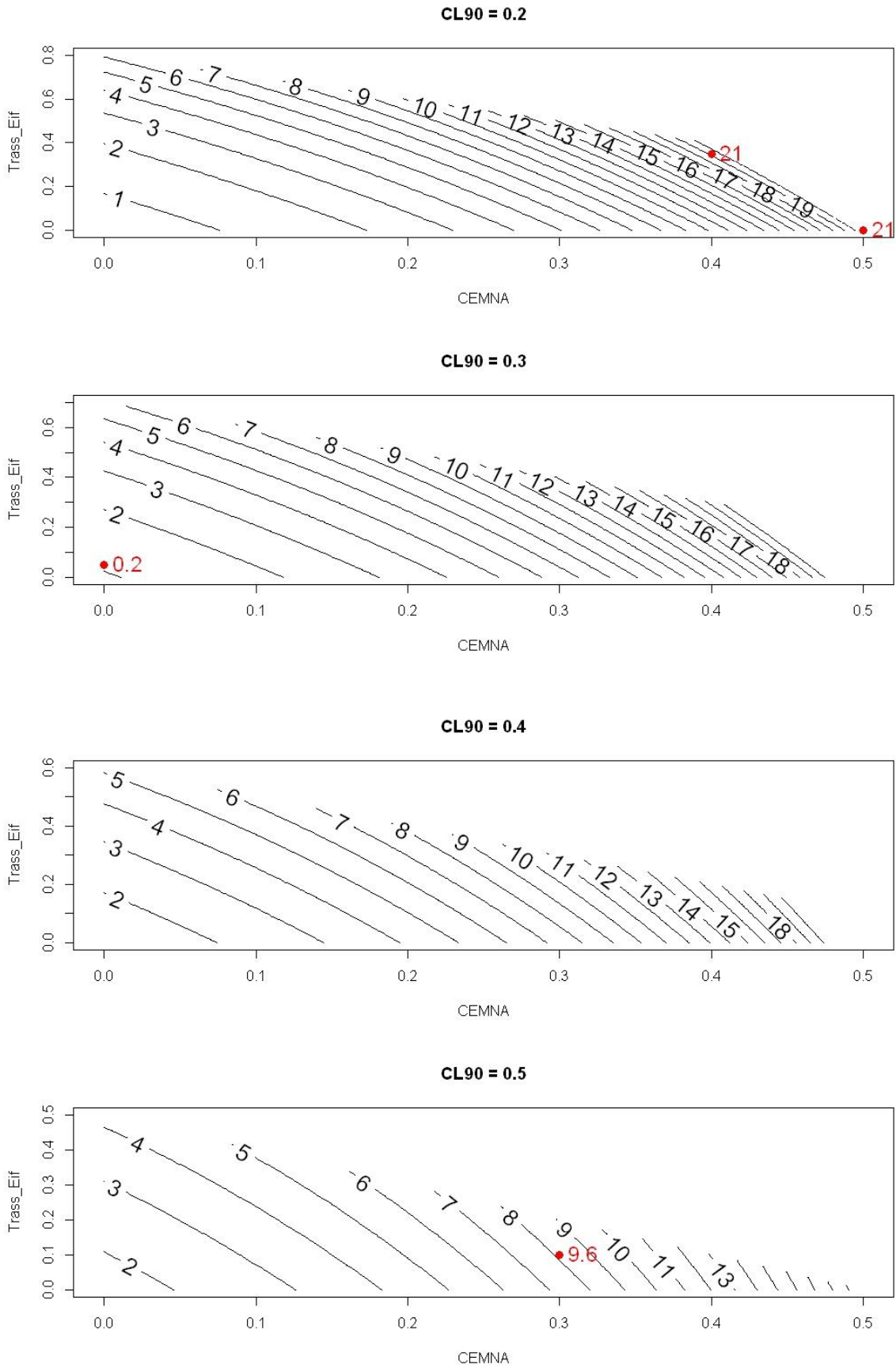


Abb. 8.6.5: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL90 / CEM_NA / Trass_Eif / KSTM

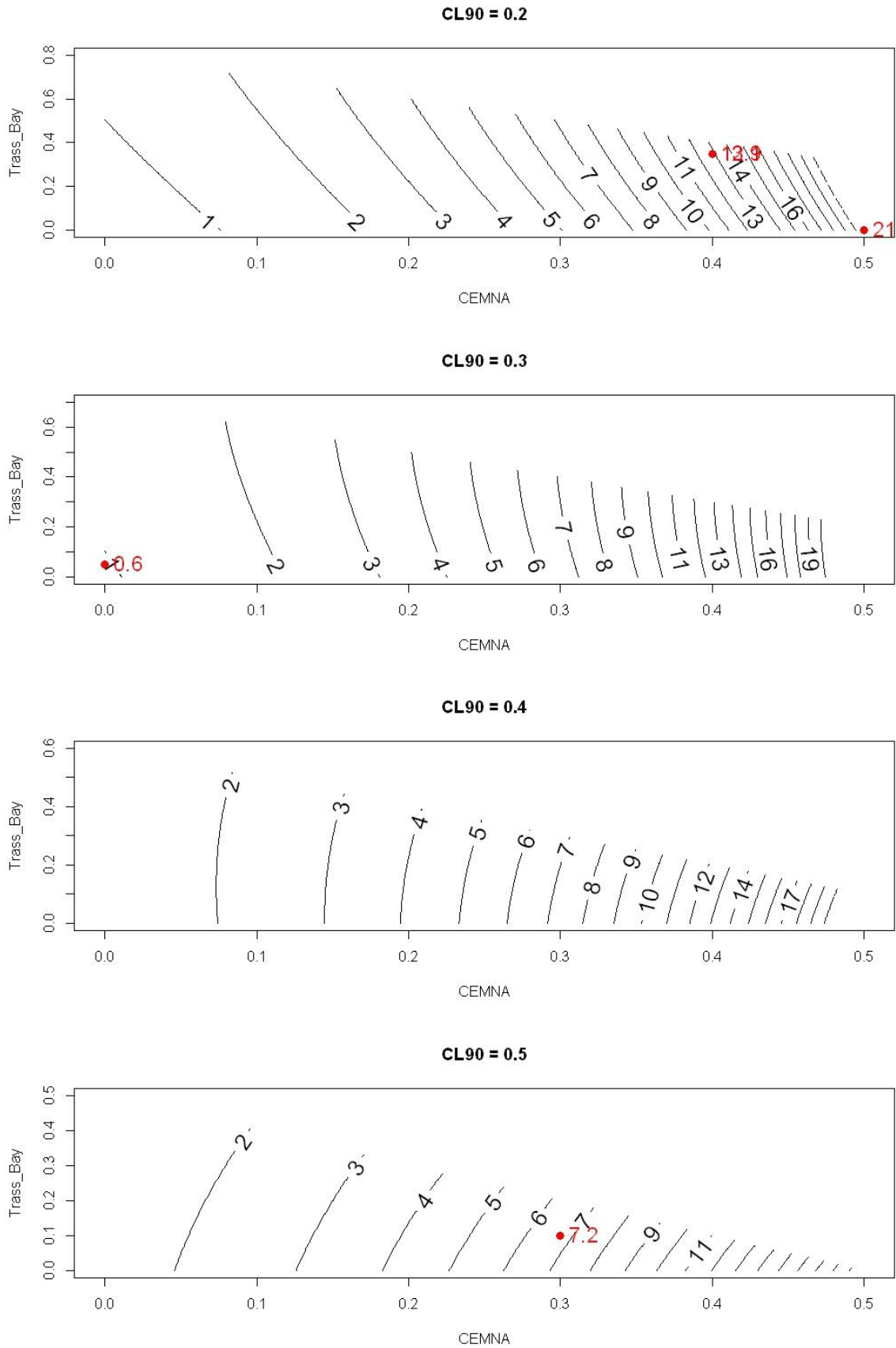


Abb. 8.6.6: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL90 / CEM_NA / Trass_Bay / KSTM

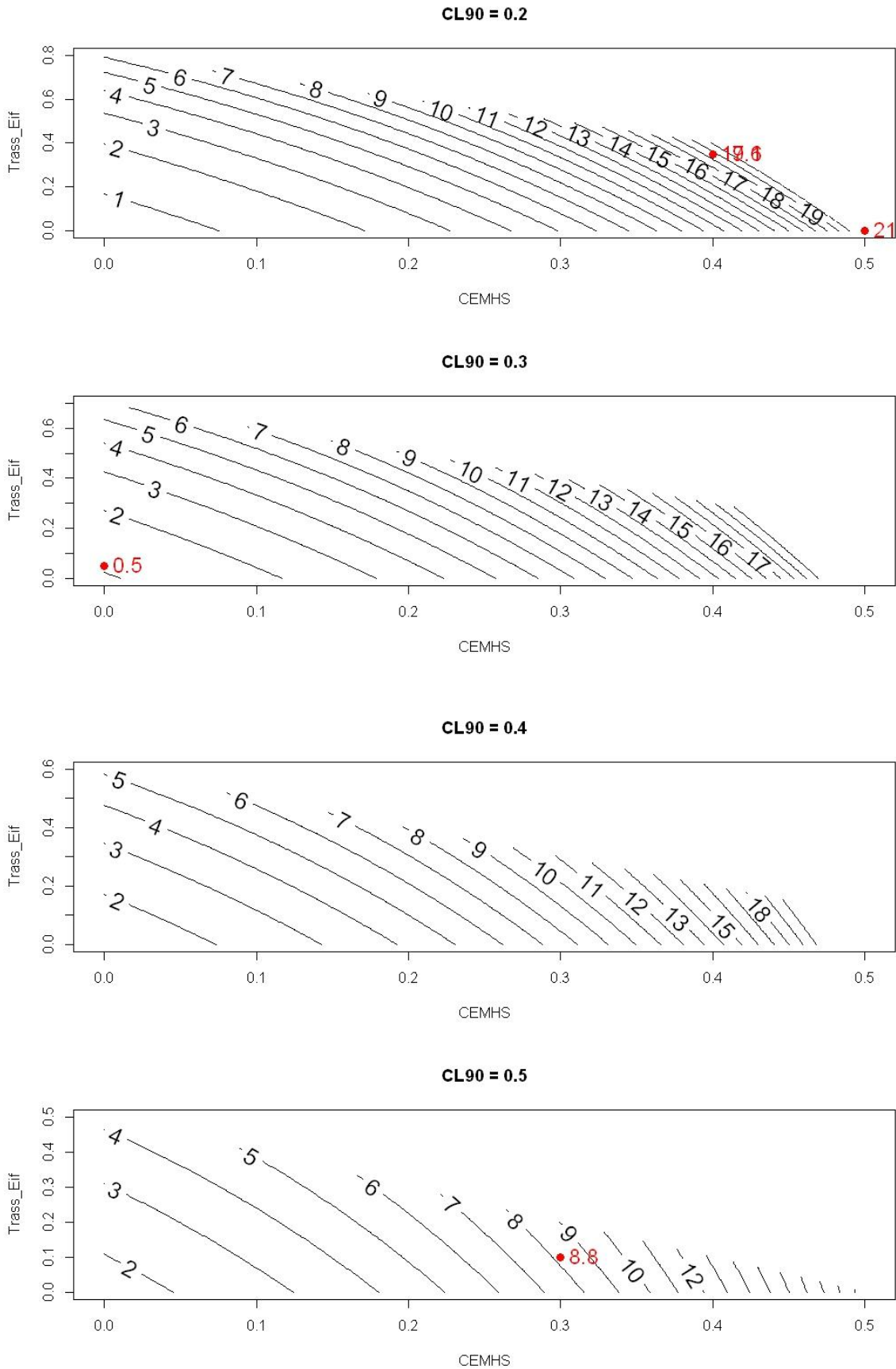


Abb. 8.6.7: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL90 / CEM_HS / Trass_Eif / KSTM

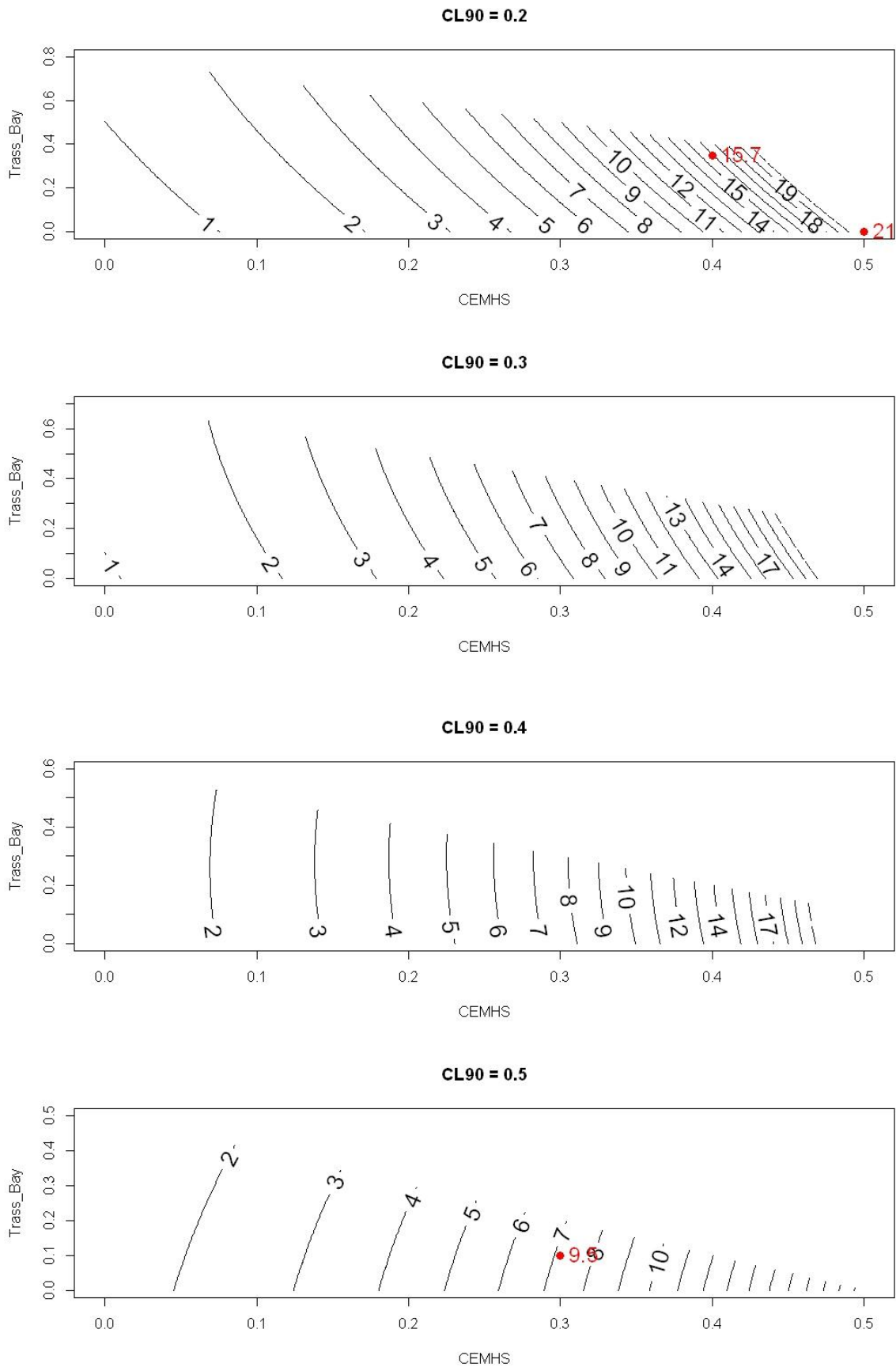


Abb. 8.6.8: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL90 / CEM_HS / Trass_Bay/ KSTM

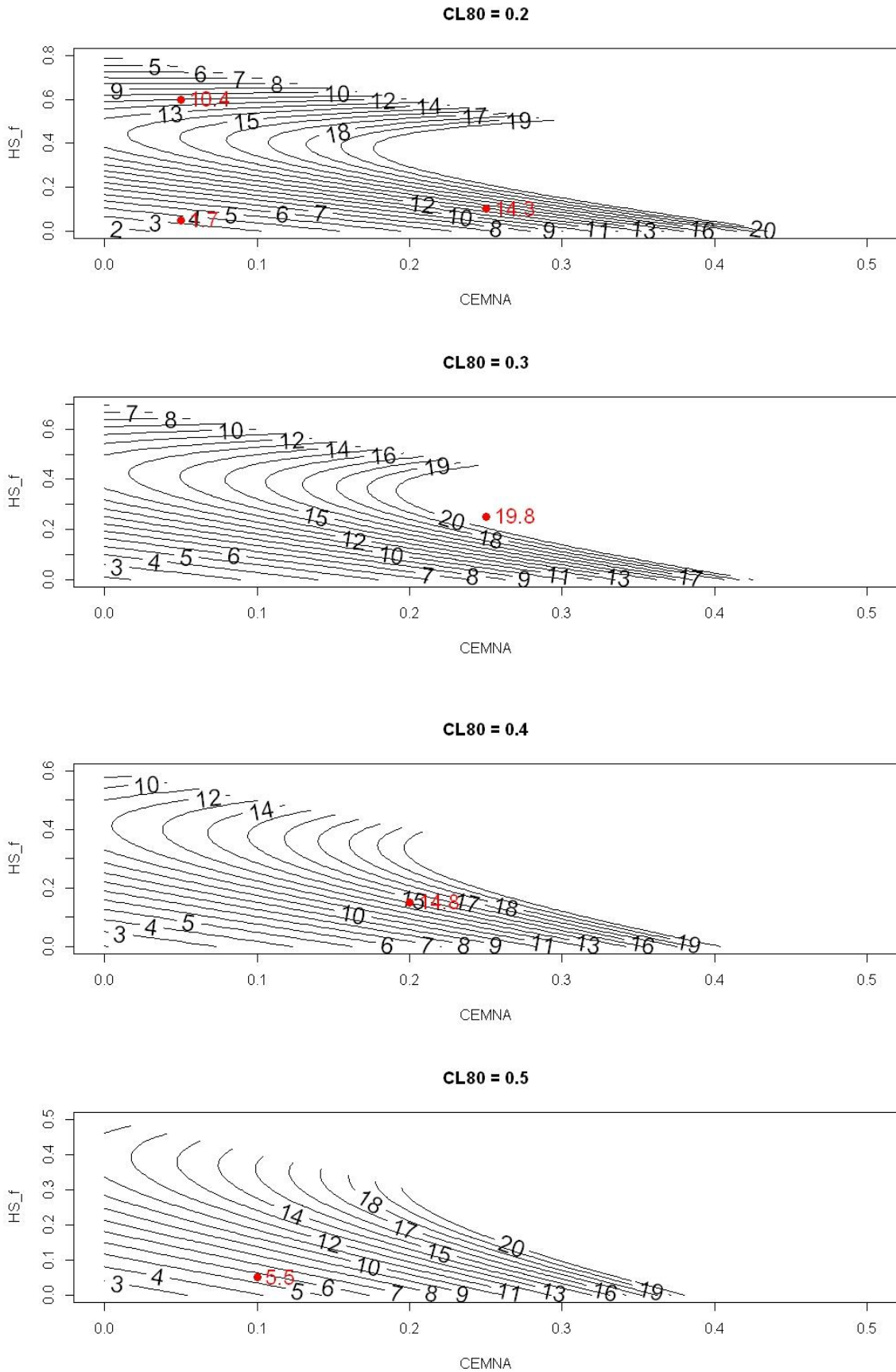


Abb. 8.6.9: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL80 / CEM_NA / HS_f / KSTM

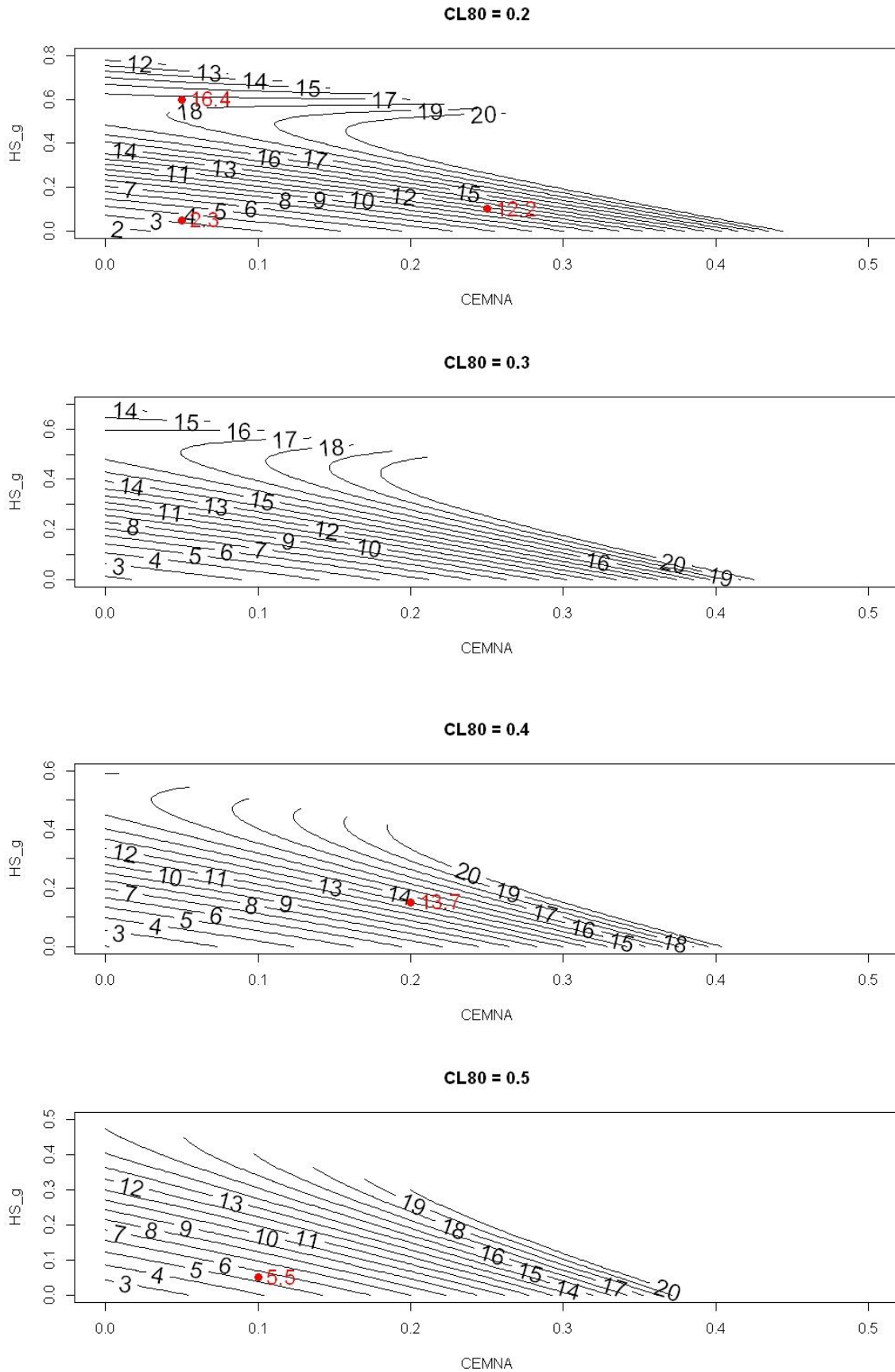


Abb. 8.6.10: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL80 / CEM_NA / HS_g / KSTM

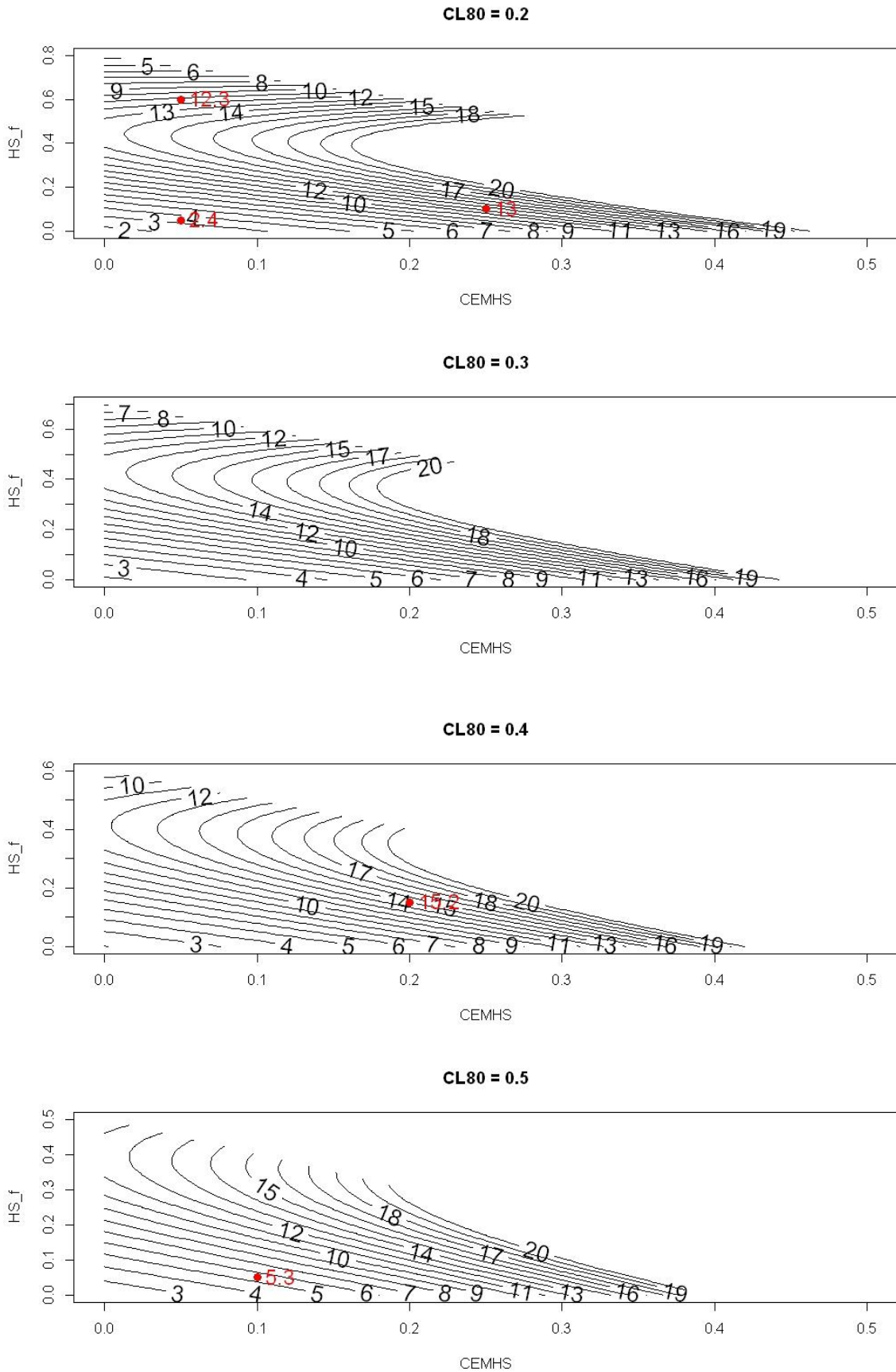


Abb. 8.6.11: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL80 / CEM_HS / HS_f / KSTM

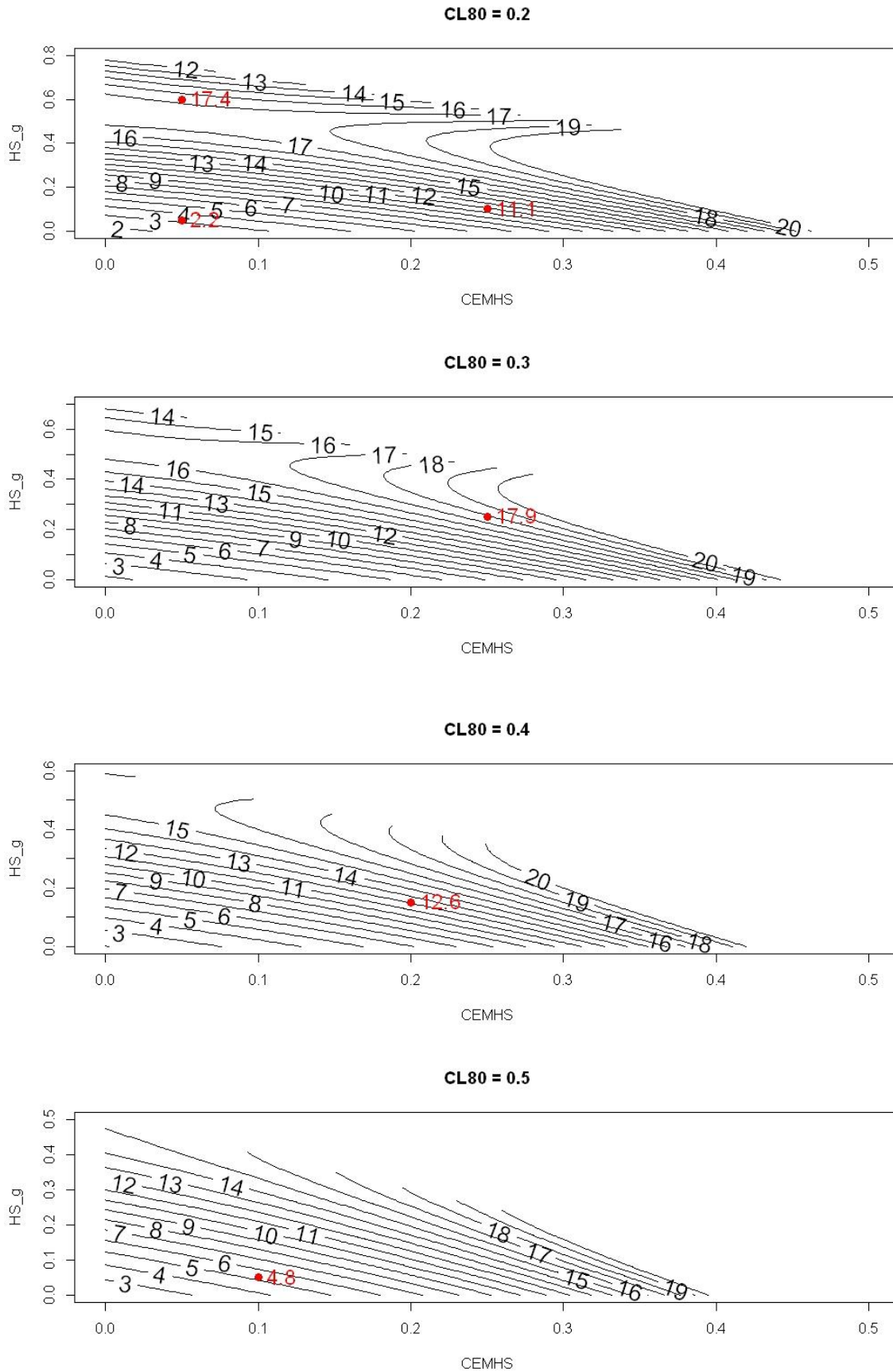


Abb. 8.6.12: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL80 / CEM_HS / HS_g / KSTM

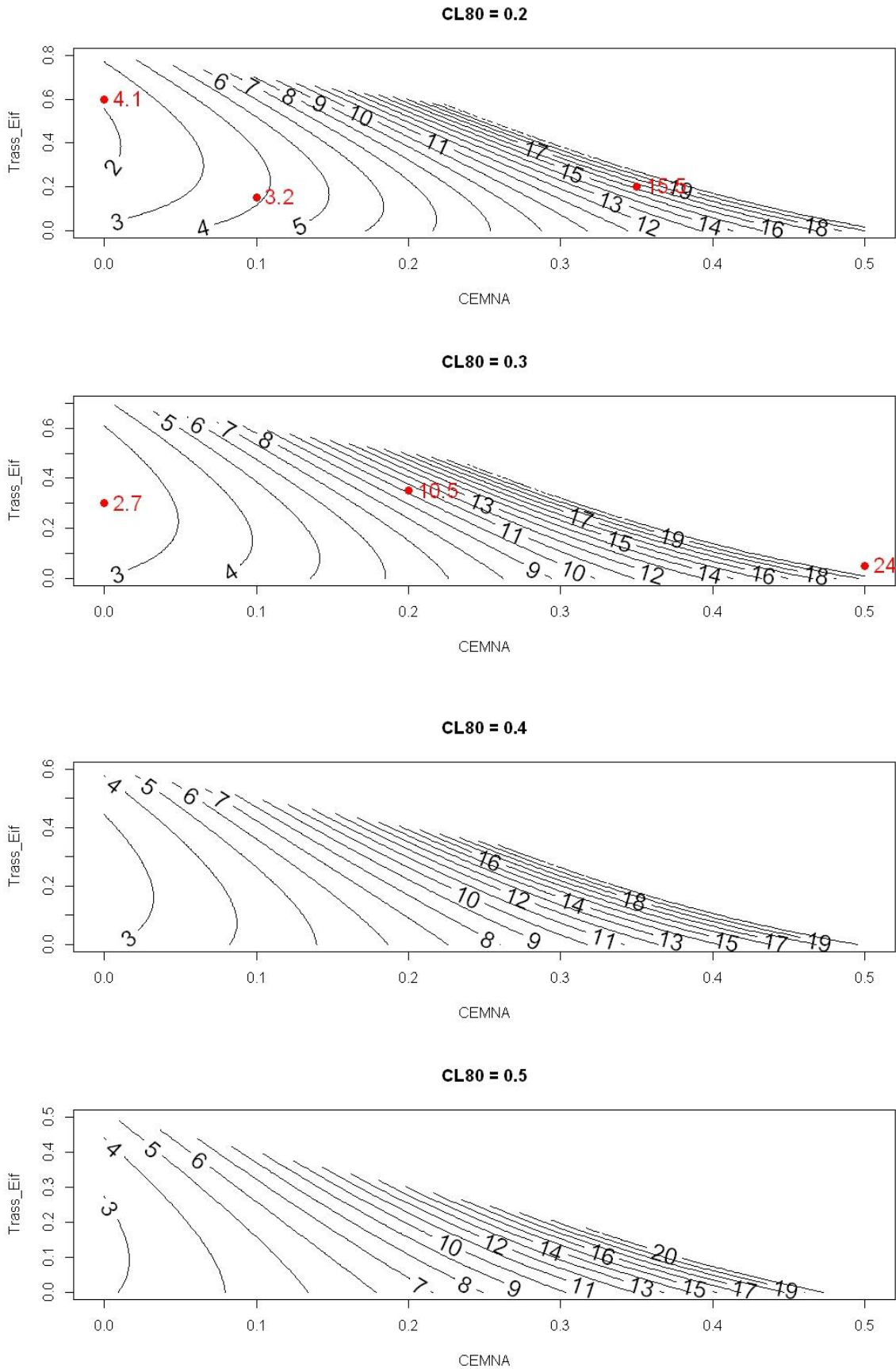


Abb. 8.6.13: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL80 / CEM_NA / Trass_Eif / KSTM

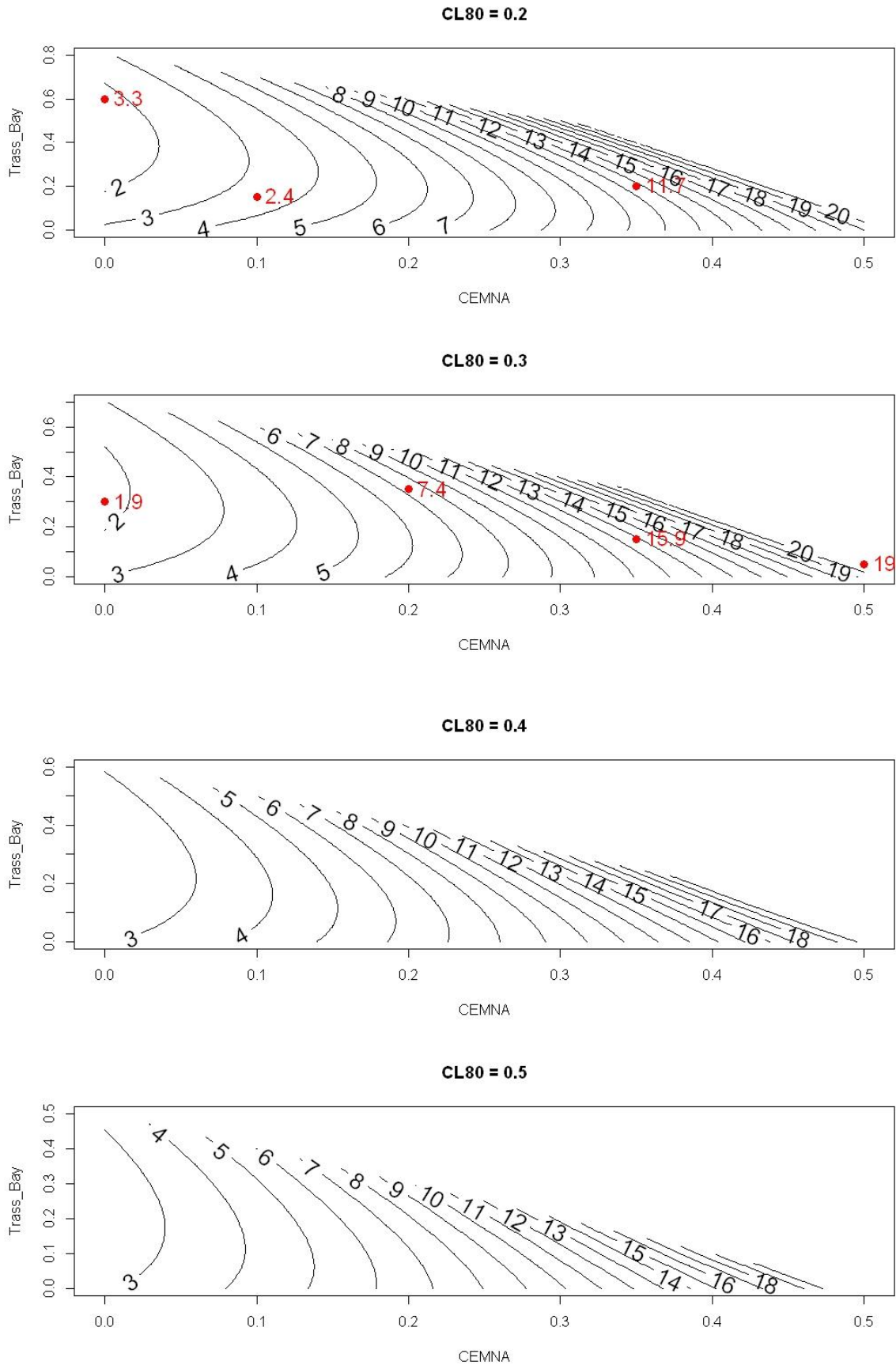


Abb. 8.6.14: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL80 / CEM_NA / Trass_Bay / KSTM

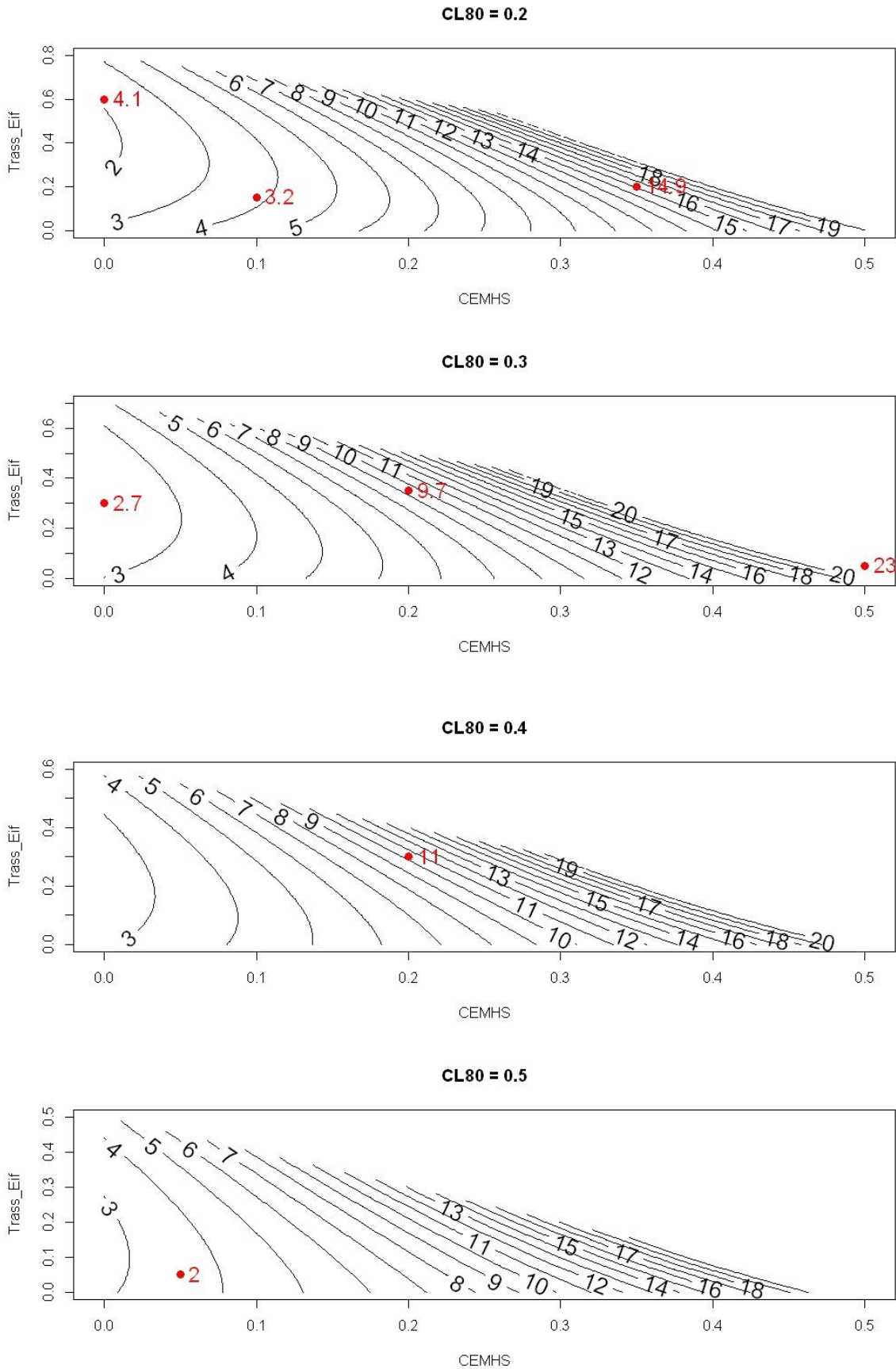


Abb. 8.6.15: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL_{80} / CEM_{HS} / $Trass_Eif$ / $KSTM$

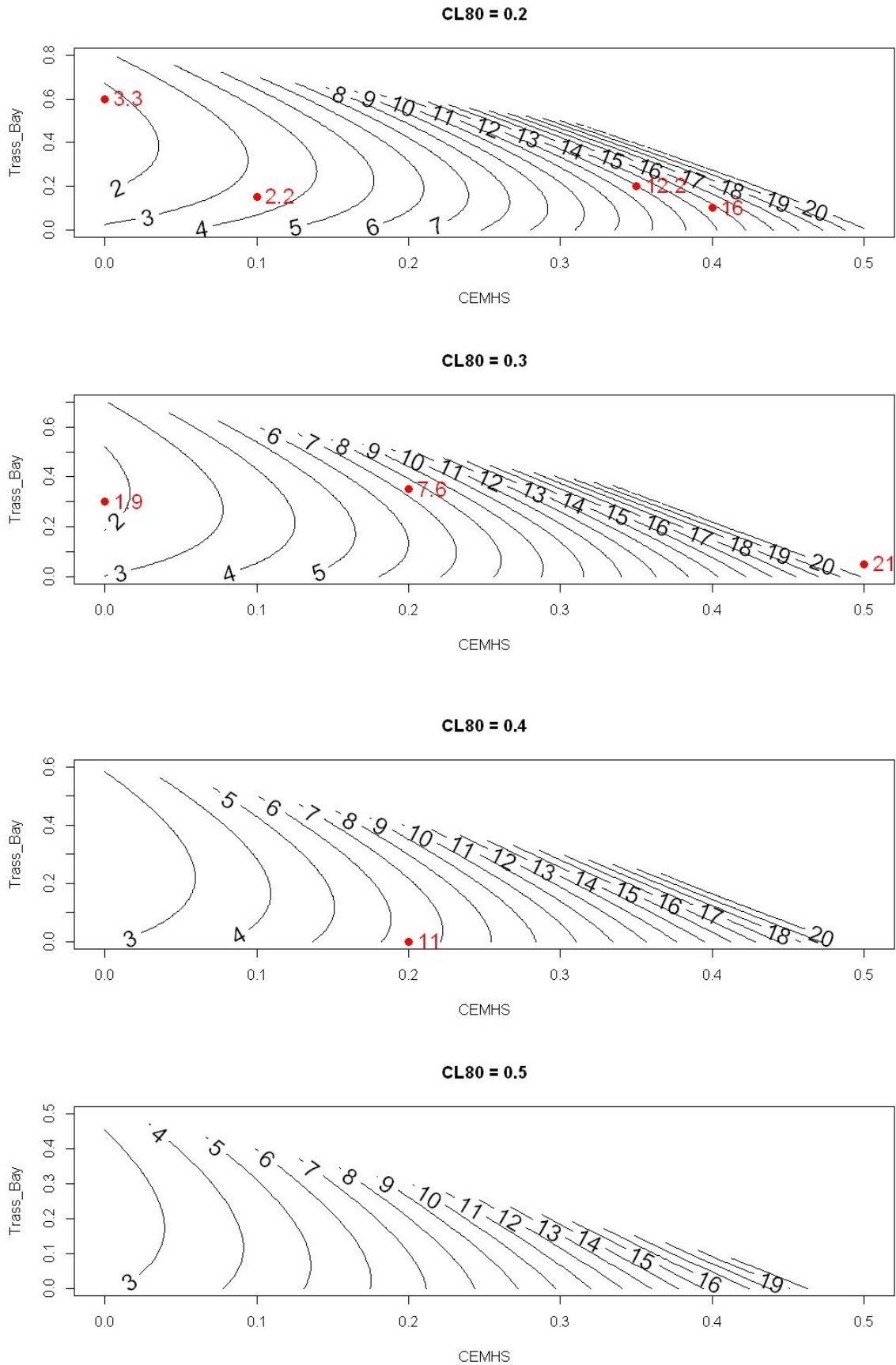


Abb. 8.6.16: 2D Projektionen des statistischen Modells mit den Komponenten CL80 / CEM_HS / Trass_Bay/ KSTM