Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

Beitrag zur Entwicklung eines EDV-Programmes zur Optimierung der Packungsdichte von Beton

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Elemer Bölcskey
Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer
Ass.Prof.Dipl.-Ing.Dr.-techn. Heinrich Bruckner

Institut für Hochbau und Technologie [E206]
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Thomas Knogler, BSc

0426621

Neubaugasse 82 / 18
1070 Wien

Wien, am

Thomas Knogler

Vorwort

Die stetig steigenden Anforderungen seitens Nutzer, Architektur, Tragwerksplanung und Bauindustrie führen zu immer höheren, weiteren und filigraneren Bauwerken mit unterschiedlichsten Nutzungsanforderungen. Dementsprechend müssen auch die verwendeten (Verbund-) Baustoffe den höher werdenden Ansprüchen entsprechen.

Am Beispiel des Betons ist dies durch die Entwicklung von hochfesten Betonen bis hin zu ultrahochfesten Betonen erkennbar. Es wird ein Baustoff gewünscht, der sich durch seine hohe Festigkeit bei gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit auszeichnet.

Diese Eigenschaften lassen sich neben dem Einsatz neuester Mischverfahren vor allem durch die optimale Zusammensetzung der Ausgangsstoffe des Betons, sowie der Verwendung von diversen Zusatzstoffen erreichen.

Im Allgemeinen gilt, je dichter das Gefüge des Betons, desto höher die Festigkeit. Die Dichtigkeit kann durch ein reines Auffüllen von bestehenden Hohlräumen mittels feinerer Bestandteile erhöht werden, oder durch chemisch reaktive Stoffe die durch ihre Reaktion beim Abbinden des Betons selbst zur Festigkeitsentwicklung beitragen.

Betrachtet man die reine physikalische Füllerwirkung, kann demzufolge allein durch eine optimale Abstimmung der einzelnen Bestandteile hinsichtlich der Korngröße und Kornverteilung eine wesentlich höhere Festigkeit erzielt werden. Ein Parameter der diese Abstimmung der einzelnen Körner zueinander darstellt, ist die Packungsdichte. Dementsprechend stellt sie einen der wesentlichsten Faktoren zum Erreichen hoher Festigkeiten dar.

Eine optimale Zusammensetzung zu finden ist jedoch von diversen Faktoren abhängig und bedingt ein aufwendiges Rechenverfahren, weshalb der Bedarf eines entsprechenden computerunterstützten Programmes besteht.

Abstract

Countinously increasing demands of users, architects, structural design and building industry lead to higher, wider and filigreeder buildings with widely varied use requirements. Thus also the used (composite) building materials have to meet the rising standars.

Using the example of concrete this is discernible by the development from high-strength concrete through to ultra high-strength concrete. A building material is desired, that distinguishes itself by high strength while at the same time good processability.

In addition to the use of latest mixing processes this properties can be achieved by a optimum composition of the source materials as well as the use of various additives.

In general, the denser the concrete, the higher the strength. The tightness can be increased by the filling of voids with finer components or by the use of chemical reactive materials, which contribute to the strength development by their chemical reaction during the process of binding concrete.

Considering the physical filler effect, a significantly higher strength can be obtained alone through the optimal coordination of the various components regarding grain size and grain distribution. Packing density is a parameter that represents the coordination of the individual grains. Accordingly it constitutes one of the most essential factors for achieving high strength.

Finding the optimum composition depends on various factors and requires a complex calculation procedure. Thus there is a need for a corresponding computer program.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
2 Grundlagen 3
2.1 Betonzusammensetzung 3
2.1.1 Zement 4
2.1.2 Silicastaub / Microsilica 8
2.1.3 Flugasche 12
2.1.4 Metakaolin 14
2.1.5 Hüttensand 15
2.1.6 Quarzmehl 19
2.2 Granulometrie 21
2.2.1 Korngröße 23
2.2.1.1 Schlämmanalyse 25
2.2.1.2 Lasergranulometrie 25
2.2.1.3 Fotooptische Verfahren 27
2.2.1.4 Bestimmung des Porenvolumens und der Porenradienverteilung mit Hilfe des Quecksilberporosimeters 28
2.2.2 Korngrößenverteilung 29
2.2.3 Spezifische Oberfläche 31
2.2.4 Kornform und Kornformfaktor 32
2.2.5 Agglomeration 39
3 Packungsdichte: Berechnung, Optimierung, Einflussfaktoren 44
3.1 Optimierung der Packungsdichte 45
3.1.1 Einfluss der Komponentenanzahl *n* 47
3.1.2 Einfluss der Komponentenmenge S_i 49
3.1.3 Einfluss des Mischungsverhältnisses der einzelnen Komponenten 50
3.1.4 Einfluss des Wassergehaltes 52
3.2 Mathematische Modelle zur Optimierung der Packungsdichte 52
3.2.1 Packungsdichteberechnung nach dem Modell von *Schwanda* 54
3.2.1.1 Ermittlung des Hohlraumgehaltes 54
3.2.1.2 Einfluss der Teilchenbehinderung 57
4 Entwicklung eines EDV-Programmes zur Optimierung der Packungsdichte 63
4.1 Eingabemaske 63
4.1.1 Schritt 1: Daten neu laden 65
4.1.2 Schritt 2: Eingabe der Berechnungsparameter k_0 und w_0 65
4.1.3 Schritt 3: Auswahl der Stoffanzahl für die Kombination 66

4.1.4 Schritt 4: Auswahl der Stoffgruppen 67
4.1.5 Schritt 5: Auswahl der gewünschten Stoffe 68
4.1.6 Schritt 6: Begrenzung der Mengenanteile 69
4.1.7 Schritt 7: Auswahl der Schrittweite der Mengenanteile 69
4.1.8 Starten der Berechnung 70
4.1.9 Mögliche Eingabefehler 71
4.1.10 Berechnungsergebnis 72
4.1.11 Berechnung der Packungsdichte eines einzelnen Stoffes 73
4.2 Berechnungsablauf 74
4.2.1 Tabellenblätter mit Korngrößenverteilungen der ausgewählten Stoffe 74
4.2.2 Tabellenblatt „Teilchenbehinderungsfaktor“ 76
4.2.3 Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ 78
4.2.3.1 Berechnung der möglichen Stoffmengenkombinationen 79
4.2.3.2 Berechnung der Kornanteile jeder einzelnen Stoffkombination 82
4.2.4 Tabellenblatt zur Berechnung des Hohlraumgehaltes 85
4.2.4.1 Erstellen einer Matrix zur Ermittlung des maximalen Hohlraumgehaltes 85
4.2.4.2 Vor- und Nachteile des gewählten Berechnungsverfahrens 90
4.2.5 Liste der maximalen Hohlraumgehalte der einzelnen Stoffmengenkombinationen 91
4.2.6 Erstellen des Tabellenblattes „Packungsdichte“ 93
4.3 Endergebnis 94
5 Ausgewertete Beispiele und Analyse 97
5.1 Einfluss der Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 97
5.2 Einfluss des Hohlraumanteils der Einkornschüttung k_0 101
5.3 Korngemische aus drei verschiedenen Quarzmehlen 103
5.4 Gemisch aus Zement, Microsilica und Quarzmehl 107
5.5 Fazit und Ergebnis 111
6 Zusammenfassung und Ausblick 113

1 Einleitung

Um die Festigkeitseigenschaften und die rheologischen Eigenschaften von Beton dem jeweiligen Verwendungszweck optimal anpassen zu können, ist es von Interesse den Einfluss der verschiedenen Parameter zu erfassen. Einer dieser Parameter ist die Packungsdichte. Da jedoch die Ermittlung dieser Größe aufwendige Versuche erfordert, bzw. alternativ nicht ohne enorm großen rechnerischen Aufwand möglich ist, besteht der Bedarf nach einem einfachen computergestützten Berechnungsprogramm zur Ermittlung der Packungsdichte von Einzelstoffen und Korngemischen. Die Entwicklung eines solchen Programmes wird das Thema dieser Arbeit sein.

Zum Verständnis über die Zusammenhänge der Festigkeitsentwicklung und der rheologischen Eigenschaften werden im ersten Kapitel diverse Betoninhaltsstoffe näher erläutert werden. Hauptaugenmerk wird auf den feinkörnigen Bestandteilen, die bei der Herstellung von Hochleistungsbetonen (UHPC) Verwendung finden, liegen. Im Einzelnen werden Zement, Silicastaub/Microsilica, Flugasche, Metakaolin, Hüttensand und Quarzmehl genauer beschrieben werden.

Eine hohe Packungsdichte erfordert eine optimale Zusammensetzung dieser Stoffe. Die feineren Körner schlüpfen in die Zwischenräume der größeren Körner. Die Folge ist eine hohe Dichte und hohe Festigkeitswerte.

Ob die Teilchen optimal in die einzelnen Hohlräume hinein passen, hängt von der Kornform und der Oberflächenrauheit ab. Runde oder kubische Körner mit einer glatten Oberfläche sind wesentlich günstiger als Partikel mit einer länglichen, plattigen Form mit rauer Oberfläche. Übliche Mischungsberechnungen für Normalbetone berücksichtigen diesen Umstand nicht. Außerdem fließen lediglich Gesteinskörner größer 0,125 mm in die Berechnung mit ein. Die Feinkornanteile werden jedoch nur mengenmäßig beschränkt. Aus den Arbeiten von *Reschke* [1] sowie von *Teichmann* [2] geht allerdings hervor, dass gerade die Feinkornanteile

[1] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000

[2] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008

und die Kornform einen großen Einfluss auf die Packungsdichte und auf die Festigkeitsentwicklung haben.

Ein geeignetes Verfahren, dass die oben genannten Faktoren berücksichtigt, bildet das Modell von *Schwanda* [3] [4], welches für die Entwicklung des Berechnungsprogrammes herangezogen werden wird. Die Kornform wird mit Hilfe zweier Eingangsparameter, Reichweite der Teilchenbehinderung und Hohlraumanteil der Einkornschüttung, berücksichtigt. Diese beiden Faktoren werden für die Berechnung für alle in einem Korngemisch vorhandenen Kornklassen als konstant angenommen. Dadurch ist jedoch mit einem gewissen Fehler gegenüber einer Partikelsimulation zu rechnen. Derartige Verfahren benötigen allerdings eine enorme Rechenleistung, weshalb sie in der Praxis ungeeignet sind.

Die Beschreibung des entwickelten Programmes wird ein weiterer Hauptteil dieser Arbeit sein. Es werden zunächst alle nötigen Eingabeparameter erläutert und anschließend der gesamte Programmablauf im Zuge eines Beispiels in Einzelschritten anschaulich dargestellt werden. Anhand von Beispielen soll schließlich der Einfluss der beiden Eingabeparameter Reichweite der Teilchenbehinderung und Hohlraumanteil der Einkornschüttung analysiert werden. Weitere Beispiele sollen die Auswirkungen von Gemischen aus Stoffen mit sehr ähnlicher und sehr unterschiedlicher Kornzusammensetzung untersuchen. Es soll gezeigt werden, dass sich vor allem Stoffe mit sehr unterschiedlichen Sieblinienverläufen gut für die Herstellung eines optimalen Gemisches in Hinblick auf den minimalen Hohlraumgehalt eignen.

[3] Vgl. *Schwanda Fritz*, Der Hohlraumgehalt von Korngemischen, beton 9 Heft 1/1959, S.12-17

[4] Vgl. *Schwanda Fritz*, Der Hohlraumgehalt von Korngemischen – Ein Vergleich rechnerisch gewonnener Werte mit versuchsmäßig ermittelten, beton 9 Heft 12/1959, S.427-431

2 Grundlagen

2.1 Betonzusammensetzung

Beton ist in seiner einfachsten Form ein 3-Komponenten-System aus Gesteinskörnung, Zement und Wasser. Für Normalbetone werden definierte Gesteinskörnungen mit einem Durchmesser größer 0,125 mm verwendet. Die Korngrößenverteilung der einzelnen Zuschlagsstoffe lässt sich anhand von Sieblinien darstellen. Der Kornanteil kleiner als 0,125 mm wird lediglich massenmäßig beschränkt. Durch gezieltes zusammenfügen einzelner Gesteinskörnungen kann eine Optimierung der Sieblinie erzielt werden und dadurch der Hohlraumgehalt und in weiterer Folge der Zementleimbedarf minimiert werden. [5]

Für Hochleistungsbetone (UHPC) wird das Größtkorn zumeist auf rund 0,6 bis 1,0 mm beschränkt. Dabei müssen zum Erreichen der hohen Festigkeiten auch die Körnungen bis zu Korngrößen von 0,125 mm optimiert werden, die bei Normalbeton nur mengenmäßig beschränkt werden. Diese Feinanteile bestehen bei Normalbeton aus Gesteinskörnungsanteilen und Zement. Beim UHPC kommen dazu zusätzlich diverse Feinstoffe zum Einsatz, die eine Erhöhung der Packungsdichte und in weiterer Folge der Festigkeit ermöglichen. [6]

Diese Feinstoffe können aufgrund ihrer Wirkungsweise im Beton in inerte und reaktive Stoffe unterteilt werden. Der Mehlkornanteil des Zuschlagstoffes, d.h. Körner mit einem kleineren Durchmesser als 0,125 mm, und insbesondere Quarzmehle und Kalksteinmehle werden zu den inerten Stoffen gezählt. Sie dienen im Wesentlichen dazu den zwischen gröberen Gesteinskörnern bzw. Stoffpartikeln entstehenden Hohlraum zu füllen. Man spricht von einer physikalischen Füllerwirkung. Dem gegenüber stehen die reaktiven Stoffe die neben der Füllerwirkung auch eine chemisch-mineralogische Reaktivität besitzen

[5] Vgl. *Geisenhanslüke Carsten*, Modellierung und Berechnung hochdichter Feinstkornpackungen für Beton, Universität Kassel, 45. Forschungskolloquium des DAfStb, 2005, S.65

[6] Vgl. *Fehling, Schmidt, Teichmann, Bunje, Bornemann, Middendorf*, Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC), Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 1 Universität Kassel 2005, S.4

und selbst zur Festigkeitsbildung beitragen. Dazu zählen neben dem Zement auch Microsilica, Flugaschen, Metakaoline und Hüttensand. Diese Stoffe binden das in den Poren und an den Randzonen zu groben Partikel vorhandene Wasser chemisch ein. Dieser Umstand führt zu einer Verminderung der Porosität der Feinstoffmatrix sowie der Zuschlagstoffrandzone. [7]

Im Folgenden werden wichtige Feinstoffe näher erläutert:

- Zement
- Silicastaub/Microsilica
- Flugasche
- Metakaolin
- Hüttensand
- Quarzmehl.

2.1.1 Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, dass nach Zugabe von Wasser an der Luft und unter Wasser selbstständig erhärtet und dauerhaft beständig bleibt. Im fein gemahlenen Zustand wird er zur Herstellung von Beton und Mörtel verwendet. Der Zement wirkt dabei sozusagen als mineralischer Klebstoff, der die Zuschlagsstoffkörner, im Allgemeinen Kies und oder Sand, dauerhaft miteinander verbindet. [8]

Ausgangsstoffe für die Herstellung von Zement sind Kalkstein und Ton bzw. Mergel. Diese Stoffe werden vorerst fein vermahlen und anschließend unter sehr hohen Temperaturen in Drehrohröfen gebrannt. Dabei wird zunächst das in den Rohstoffen vorhandene Wasser ausgetrieben. Danach beginnt bei einer Temperatur von ca. 800 °C die Entsäuerung. Aus dem Kalkstein ($CaCO_3$) entweicht Kohlendioxid (CO_2) und es entsteht Calciumoxid (CaO). Anschließend beginnt bei steigernder Temperatur auf ca. 1450 °C der Sinterprozess. Es entstehen hydraulisch wirksame Klinkermineralien in kugeliger Form. Der so

[7] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.14

[8] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.44

erhaltene Zementklinker wird je nach gewünschter Zementsorte mit Hüttensand, Flugasche, Kalkstein und zur Steuerung des Erstarrungsverhaltens mit sulfathältigen Stoffen wie Gips fein vermahlen. [9] [10]

Im Allgemeinen werden folgende Zementsorten verwendet:

- CEM I – Portlandzement
- CEM II – Portlandhüttenzement
- CEM III – Hochofenzement.

Wobei CEM I vorwiegen aus Portlandzementklinker ohne weitere Hauptbestandteile besteht. CEM II unterscheidet sich vom Portlandzement auf Grund der Menge an zugefügtem Hüttensand. Der Anteil liegt zwischen 6 und 35 M.-%. Noch höhere Anteile werden bei Hochofenzementen CEM III verwendet. Der Bereich bewegt sich zwischen 36 und 95 M.-%. [11] [12]

Die Mahlfeinheit hat große Auswirkungen auf das Reaktionsverhalten des Zementes. Je größer die spezifische Oberfläche, desto reaktionsfreudiger ist der Zement. Das heißt feinere Zemente entwickeln schneller ihre Festigkeit und es kommt zu einer höheren Wärmeentwicklung bei der Hydratation. [13]

Durch den Mahlprozess entstehen im Wesentlichen kantige und raue Partikel. Vergleicht man diese mit der perfekten kugeligen und glatten Form der Silicastaubkörner mit einem Kornformfaktor von 1,0 werden für den Zement Werte von 1,5 bis 1,8 erreicht. [14] Die spezifische Oberfläche nach *Blaine* bewegt sich je nach Zementsorte zwischen 3000 und 7000 cm²/g Zement. Die mittlere Teilchengröße beträgt zirka 10 µm. [15]

[9] Vgl. *Friembichler, Spaun, Steigenberger*, Zementerzeugung in Österreich, Broschüre der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie VÖZ, 09/2012, S.13

[10] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.44-46

[11] Vgl. ÖNORM EN197-1, Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, Ausgabe 2004-09-01, S.14

[12] Vgl. *Bosold Diethelm, Pickhardt Roland*, B1 - Zemente und ihre Herstellung, Zement-Merkblätter der Informationsplattform der deutschen Zement- und Betonindustrie, 04/2014, S.4

[13] Vgl. *Friembichler, Spaun, Steigenberger*, Zementerzeugung in Österreich, Broschüre der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie VÖZ, 09/2012, S.13

[14] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.38-39

[15] Vgl. *Hermann, Kurt*, Zusatzstoffe: Teil 4, Silicastaub, Zeitschrift Cementbulletin Band 63 (1995) Heft 7, S.4

Wie schon eingangs erwähnt erhärtet Portlandzement unter Zugabe von Wasser selbstständig durch Bildung wasserhaltiger Hydratphasen. Hauptverantwortlich für die Festigkeitsentwicklung sind dabei die faserförmigen Calciumsilikathydrate (CSH-Phasen), die 80 % des Zementsteines bilden. Die entstehenden spitznadeligen Fasern verzahnen sich ineinander, wodurch ein starker Zusammenhalt und eine hohe Festigkeit erreicht werden. [16] Abbildung 2.1 zeigt das Mikrogefüge eines erhärteten Zementstein unter dem Rasterelektrodenmikroskop. Die verzahnten Calciumsilikathydratfasern sind deutlich zu erkennen.

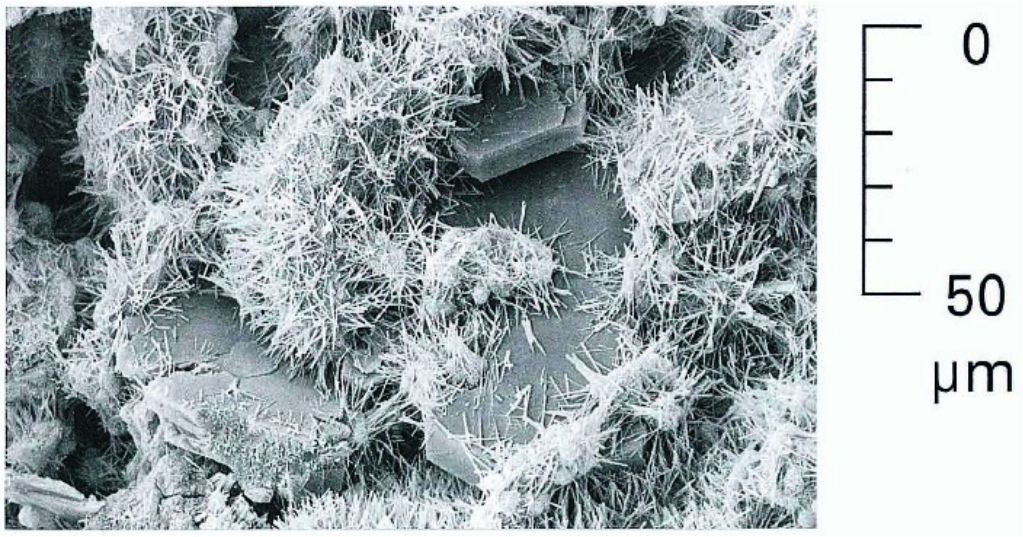


Abbildung 2.1 Mikrogefüge eines erhärteten Zementsteines mit verzahnten Calciumsilikathydratfasern und plättchenförmigem Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) unter dem Rasterelektronenmikroskop [17]

Das beigefügte Wasser wird in einer Menge von etwa 25 % des Zementgewichtes chemisch eingebunden. Zusätzliches lagert sich in den Gelporen Wasser in einer Menge von rund 10 bis 15 % ein. Für eine vollständige Hydratation des Zementes wird demnach eine Wassermenge von 35 bis 40 % des Zementgewichtes benötigt. Eine höhere Menge kann chemisch nicht mehr aufgenommen werden. Es bildet Kapillarporen aus, die die Porosität erhöhen und die Festigkeit verringern. Wird zu wenig Wasser beigefügt kann ein Teil des Zementes nicht hydratisiert werden. Diese Zementpartikel wirken lediglich als Füllstoffe im Zementsteingefüge. Ein schlechterer Verbund und eine geringere Festigkeit sind

[16] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.19-21

[17] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.46

die Folge. Auf eine genaue Abstimmung des W/Z-Wertes sollte demnach hohe Beachtung geschenkt werden. [18] Abbildung 2.2 zeigt die Zusammensetzung des Zementsteines in Abhängigkeit des W/Z-Wertes, wobei ein zu hoher Anteil an Kapillarwasser aber auch ein zu hoher Anteil an unhydratisiertem Zement vermieden werden sollte.

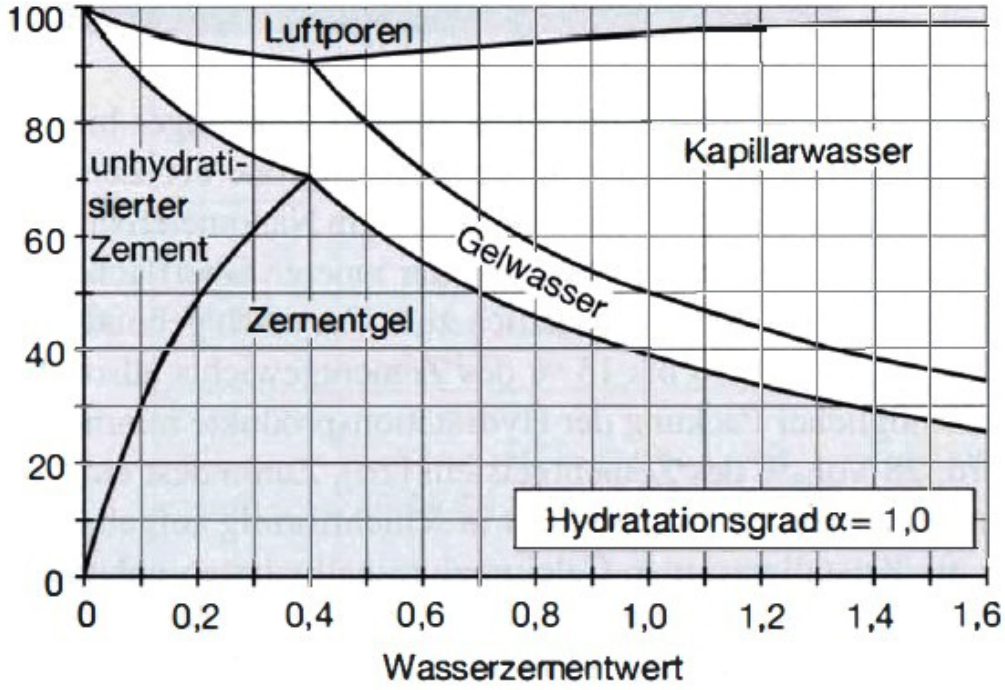


Abbildung 2.2 Zusammensetzung des Zementsteines in Abhängigkeit des W/Z-Wertes bei vollständiger Hydratation des Zementes [19]

Zusätzlich zur Bildung der Calciumsilikathydrate reagieren die vorhandenen Calciumaluminate und Calciumaluminatferrite ebenfalls zu Hydratphasen. Dieser Vorgang erfolgt wesentlich langsamer und der Festigkeitsbeitrag ist deutlich geringer, jedoch verzögern sie das Ansteifverhalten positiv und der Sulfatwiderstand wird erhöht. Der zur Regelung des Erstarrungsverhaltens beigefügte Gips bildet nadelförmiges, ebenfalls festigkeitsverminderndes Ettringit aus. Allerdings können diese Ettringitbereiche, wie in Kapitel 2.1.2 angeführt, durch beifügen von Microsilica in den Bereichen der Zuschlagsstoffrandzone deutlich verringert werden. Durch die Hydratation von Calciumsilikat wird Calciumhydroxid freigesetzt. Es trägt im Wesentlichen zur Gefügeverdichtung

[18] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.19-21

[19] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.22

bzw. zur Festigkeitssteigerung bei und spielt als Reaktionspartner für die latent-hydraulischen und puzzolanischen Zusatzstoffe eine wichtige Rolle (siehe nachfolgende Kapitel). [20]

2.1.2 Silicastaub / Microsilica

Microsilica bzw. auch Silicastaub genannt, ist ein amorphes Siliciumdioxid, das in perfekt runder Form vorliegt. Seine kugelige Kornform ist bedingt durch den Herstellungsprozesses. Bei der Produktion von elementarem Silicium bzw. von Siliciumlegierungen (z.B. Ferrosilicium) entsteht als Nebenprodukt Silicastaub. Im elektrischen Lichtbogenofen wird hochreiner Quarzkies auf ca. 2.000 °C erhitzt. Dabei entsteht gasförmiges Siliciumoxid SiO, das unter Bildung von CO_2 zu Rohsilicium reduziert wird. Der restliche Teil des Siliciumoxids oxidiert und kondensiert bei Abkühlung (bei ca. 1.700 °C) zu Siliciumdioxid SiO_2 in Form von feinen kugelförmigen Perlen. Der reaktive amorphe SiO_2–Gehalt liegt bei rund 90 M.-%. [21, 22]

Der Durchmesser eines Microsilicapartikels beträgt im Mittel zwischen 100 und 150 nm. Das heißt im Vergleich zum Zement kommen auf das gleiche Volumen rund 100.000 Microsilicapartikel. Dementsprechend ist auch die spezifische Oberfläche mehr als das 100-fache höher als die des Zementes. Sie bewegt sich im Bereich von 150.000 bis 250.000 cm²/g. [23] [24] [25]

Bedingt durch die perfekte kugelige Form und der glatten Oberfläche ergibt sich ein idealer Kornformfaktor von 1,0. Silicastaub kann demnach hervorragend herangezogen werden um die Hohlräume im Betongemisch zu füllen und damit

[20] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.19-21

[21] Vgl. *Friede Bernd, Fidjestøl Per*, Microsilica – Ein Staub macht Karriere (Microsilica – A dust makes career), Nachrichten aus der Chemie 10/2011, 59(10), S.956

[22] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.58

[23] Vgl. *Friede Bernd, Fidjestøl Per*, Microsilica – Ein Staub macht Karriere (Microsilica – A dust makes career), Nachrichten aus der Chemie 10/2011, 59(10), S.958

[24] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.37 u. S.48

[25] Vgl. *Hermann, Kurt*, Zusatzstoffe: Teil 4, Silicastaub, Zeitschrift Cementbulletin Band 63 (1995) Heft 7, S.4

die Packungsdichte wesentlich zu erhöhen. Bei Versuchen zeigte sich, dass durch die Zugabe von 5 bis 25 M.-% deutliche Festigkeitssteigerungen erzielt werden können. Bei einem höheren Anteil sind quasi keine Hohlräume mehr vorhanden welche von den Microsilicapartikel gefüllt werden können, wodurch es zu einer Verdrängung der Zementkörner kommt. Dadurch wird die Packungsdichte der Zementpartikel erhöht und der Hohlraumgehalt steigt wieder an. [26, 27] Ein höherer Anteil an Microsilica kann bei der Verwendung von Quarzmehlen mit einer ähnlichen Korngrößenverteilung des Zementes erforderlich werden. Die Partikel des Zementes und des Silicastaubes beeinflussen sich gegenseitig, wodurch es zu einer Aufweitung der Hohlräume kommen kann. Damit diese frei werdenden Bereiche wieder gefüllt werden können wird zusätzliches Microsilica erforderlich. [28]

Neben den physikalischen Füllereffekten sind auch die chemischen Eigenschaften von Microsilica ein Grund für den Einsatz bei der Betonherstellung. Die geringe Partikelgröße und die amorphe Struktur von Silicastaub führen zu einer hohen puzzolanischen Reaktionsfähigkeit, welche wiederum positive Auswirkung auf die Festigkeitsentwicklung mit sich bringt. [29] Wie in

Abbildung 2.3 ersichtlich kann durch den Einsatz von Microsilica die Druckfestigkeit deutlich gesteigert werden. Dabei nimmt die Festigkeit mit zunehmendem Anteil an Silicastaub erkennbar zu. Wobei für die Versuchsreihen bei einem unterschiedlichem Anteil an Microsilica der W/F-Wert, definiert als das Verhältnis Masse Wasser zu Masse Feststoff des Trockenmischgutes, konstant gehalten wurde.

[26] Vgl. *Friede Bernd, Fidjestøl Per*, Microsilica – Ein Staub macht Karriere (Microsilica – A dust makes career), Nachrichten aus der Chemie 10/2011, 59(10), S.958

[27] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.37 u. S.48

[28] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.59

[29] Vgl. *Hermann, Kurt*, Zusatzstoffe: Teil 4, Silicastaub, Zeitschrift Cementbulletin Band 63 (1995) Heft 7, S.4-5

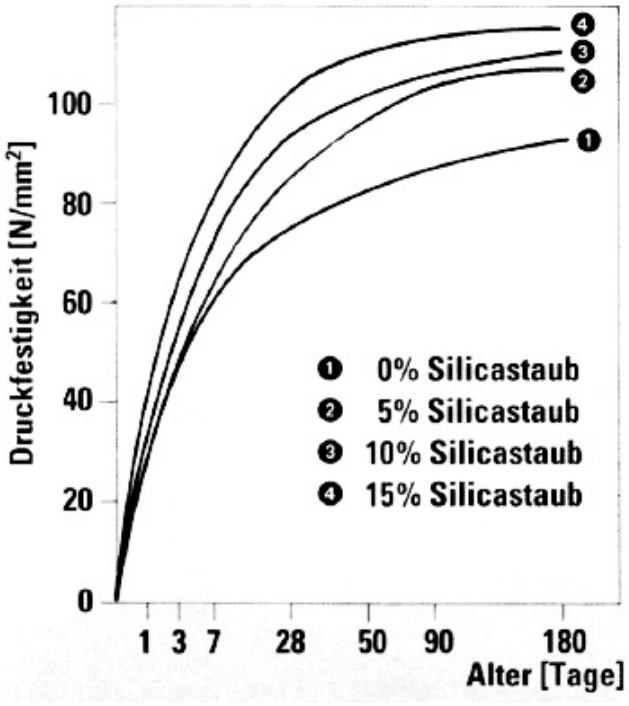


Abbildung 2.3
Druckfestigkeitsentwicklung von Betonen mit gleichem W/F-Wert aber unterschiedlichem Anteil an Silicastaub [30]

Silicastaub reagiert mit dem aus der Zementreaktion gebildetem Calciumhydroxid zu Calciumsilikathydrate (CSH). Dabei nehmen die Microsilicapartikel zunächst den Platz des Wassers beim ansonsten silicastaubfreiem Beton ein. Es folgt die Bildung der CSH-Phasen in unmittelbarer Nähe der Körner des Zuschlagstoffes. Die Folge ist ein stärkerer Verbund zwischen Zementstein und Zuschlagstoff, wodurch wiederum die Druckfestigkeit ansteigt. Der Anteil an Kapillarporen im Beton wird wesentlich verringert. [31]

Abbildung 2.4 zeigt die schematische Darstellung der Bildung von Übergangszonen bei a) an einem Beton ohne Zusatz von Microsilica und bei b) an einem Beton mit Zusatz von Microsilica. Es wird deutlich, dass der Anteil von festigkeitsverminderndem Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$ und Ettringitbereichen beim Vorhandensein von Silicastaub an der Randzone zum Gesteinskorn abnimmt. Unter dem Elektronenmikroskop (Abbildung 2.4 links oben und unten) wird ein deutlich bessere Verbund zwischen Zementstein und Zuschlagstoff sichtbar.

[30] Vgl. *Hermann, Kurt*, Zusatzstoffe: Teil 4, Silicastaub, Zeitschrift Cementbulletin Band 63 (1995) Heft 7, S.4
[31] Vgl. *Hermann, Kurt*, Zusatzstoffe: Teil 4, Silicastaub, Zeitschrift Cementbulletin Band 63 (1995) Heft 7, S.4-5

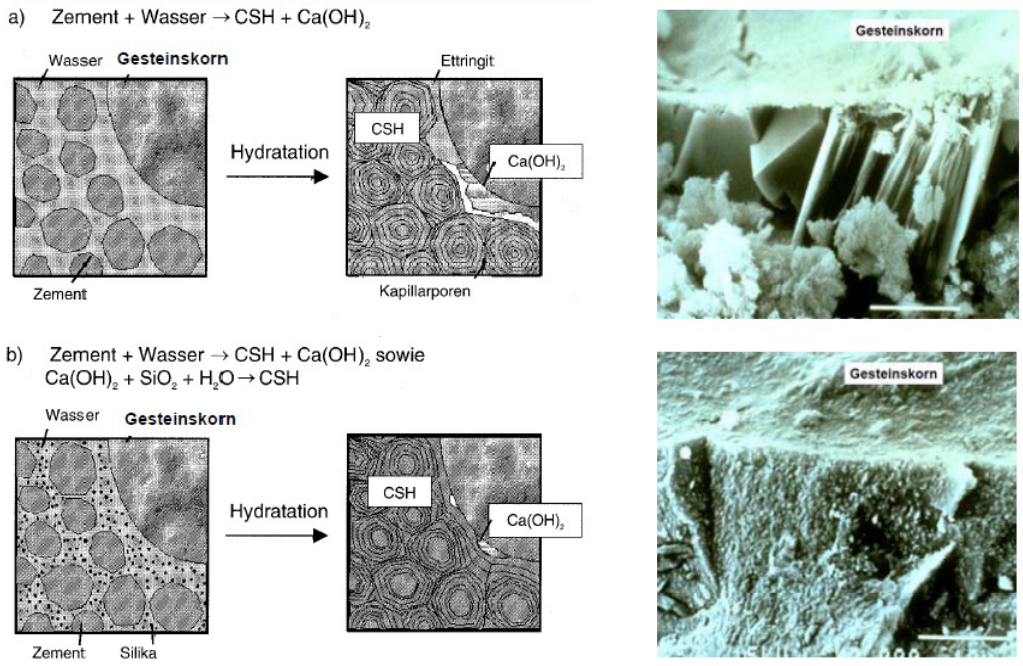


Abbildung 2.4 a) Bild l.o. Wasser-Zement-Suspension an der Übergangszone zum Gesteinskorn vor der Hydratation; Bild m.o. Bildung von CSH-Phasen, große $Ca(OH)_2$ und Ettringit Bereiche am Übergang zum Gesteinskorn; Bild r.o. Übergangsbereich unter dem Elektronenmikroskop. b) Bild l.u. Hohlräume durch Microsilica gefüllt; Bild m.u. kleinere $Ca(OH)_2$ Bereiche; Bild r.u. verbesserter Verbund zw. Zementstein und Zuschlagstoff unter dem Elektronenmikroskop [32]

Zusammenfassend können demnach folgende verbesserte Eigenschaften bei Einsatz von Silicastaub im Beton festgestellt werden:

- Erhöhung der Druck-, Zug- und Biegezugfestigkeit aufgrund des dichteren Gefüges und der Bildung von CSH-Phasen im Übergangsbereich zum Gesteinskorn.
- Mit der Druckfestigkeit steigt auch der E-Modul an. Dies führt zu einem sprödharten Beton mit dem unerwünschten Nebeneffekt des plötzlichen Versagens ohne Vorankündigung.
- Durch das dichtere Gefüge kann eine deutliche Verbesserung der Dauerhaftigkeit erzielt werden. Sowohl der Widerstand gegen mechanische Einwirkungen (Abriebfestigkeit, Erosionsbeständigkeit) als auch gegen chemischen Angriff (Frosttausalzwiderstand, Widerstand gegen treibende und lösende Angriffe) kann wesentlich erhöht werden.

[32] Vgl. *Thienel Christian*, Baustoff aus Recyclaten und Nebenprodukten - Silikastaub, Skriptum zur Vorlesung Sonderbetone und Baustoffkreislauf, Institutes für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, 2010 S.36-43

2.1.3 Flugasche

Flugasche ist ein feinkörniger Staub, der auf Grund des Entstehungsprozess, aus zumeist kugelförmigen, glasigen Partikeln besteht. In der Betontechnologie wird im Allgemeinen Steinkohleflugasche verwendet, die bei der Verbrennung von fein gemahlener Kohle anfällt. Chemisch betrachtet setzt sie sich im Wesentlichen aus SiO_2 und Al_2O_3 zusammen. Wegen ihrer puzzolanischen Aktivität eignet sich Flugasche hervorragend als Zusatzstoff bei der Betonherstellung zur Verringerung der Zementmenge und zur Verbesserung der Frischbetoneigenschaften hinsichtlich des Fließverhaltens. [33] [34]

Obwohl Flugasche größtenteils aus gerundeten, kugelförmigen Partikeln besteht werden die idealen Werte des Microsilica für den Kornformfaktor nicht reicht. Der Grund liegt vor allem an der teilweisen porösen Oberfläche. Die Werte liegen dennoch in einem sehr guten Bereich von 1,1 bis 1,35. [35] Die Korngrößen ähneln sehr stark denen des Zementes. Im Allgemeinen werden mittlere Teilchengrößen von etwa 10 µm erreicht. Die spezifische Oberfläche nach *Blaine* beträgt im Mittel 3000 bis 5500 cm²/g. [36]

Wird Flugasche beim Mischen des Betons beigemengt reagieren die Kieselsäurebestandteile sowie das vorhandene reaktionsfähige Aluminiumoxid mit dem in Lösung gegangenen Calciumhydroxid und dem Anmachwasser. Es bilden sich Calciumsilikathydrate (CSH-Phasen) und Calciumaluminathydrate. Der Anteil an Calciumhydroxid, welches bei der Hydration von Portlandzement entsteht und die schwächste Komponente der Zementsteinmatrix darstellt, wird verringert. Die gebildeten CSH-Phasen führen zu einer Festigkeitssteigerung und gleichzeitig zu einer Verringerung der Kapillarporen im Beton. Bei Normalbeton ohne Zusatz von Flugasche kommt es besonders in den Zuschlagstoffrandzonen zu einer erhöhten Konzentration von $Ca(OH)_2$-Kristallen und Ettringitnadeln. Durch Einsatz von Flugasche werden diese Übergangszonen mit den Flugaschepartikeln umhüllt und

[33] Vgl. *Wolfgang vom Berg*, Flugasche als Betonzusatzstoff, Verband Deutscher Betoningenieure Heft 87/01 ,2001, S.1-2

[34] Vgl. *Slowik/Schmidt*, Kapillare Schwindrissbildung in Beton, Forschungsbericht zu Ursachen und Auswirkungen sowie zur Vermeidung von Frühschwindrissen, 2010, Kap. 3.2 S.20

[35] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.38-39

[36] Vgl. *Hermann, Kurt*, Zusatzstoffe: Teil 4, Silicastaub, Zeitschrift Cementbulletin Band 63 (1995) Heft 7, S.4

es bilden sich anstelle der spröden $Ca(OH)_2$ und Ettringitbereiche dichte CSH-Phasen. Ein besserer Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskorn ist die Folge. [37] [38]

In Abbildung 2.5 wird die puzzolanische Reaktion der Flugasche ersichtlich. Dabei wurde 33 Vol.-% des Zementes durch drei verschiedene Steinkohleflugaschen ersetzt und die Festigkeitsentwicklung ermittelt. Zum Vergleich wurde eine Mischung ohne Ersatz des Zementes (Nullmischung) und eine Mischung mit Ersatz durch ein Inertmaterial (Quarzmehl) ausgewertet. Durch die puzzolanische Reaktion nähert sich die Druckfestigkeitskurve mit zunehmender Zeit nach Beginn der Hydratation immer näher der Nullmischung an. [39]

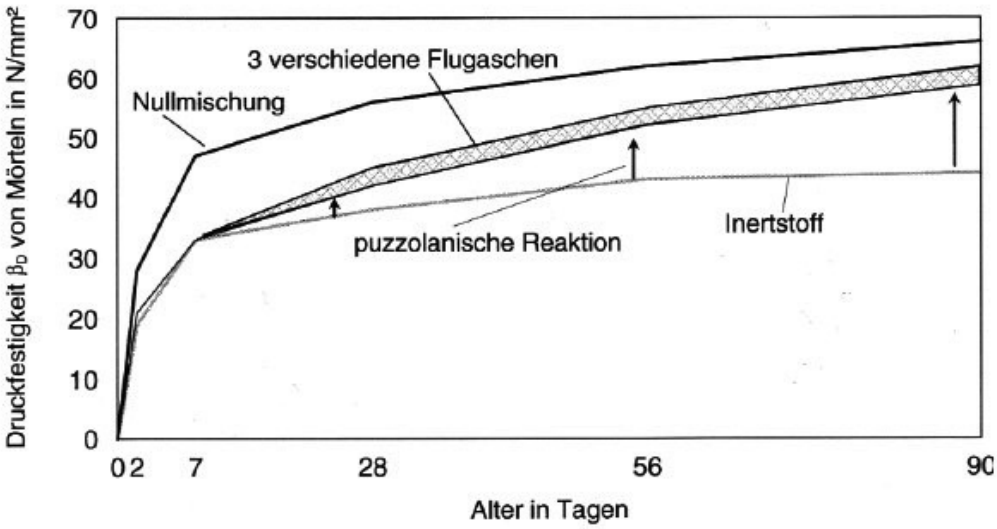


Abbildung 2.5 Druckfestigkeitsentwicklung und puzzolanisches Reaktionsverhalten von Mörtelmischungen bei Ersatz von 33 Vol.-% des Zementes durch Flugasche bzw. Inertmaterial (Quarzmehl) [40]

Wie schon eingangs erwähnt hat Flugasche eine positive rheologische Wirkung auf den Frischbeton. Durch Ersetzen von Zementanteilen mit Flugasche, bei gleichbleibendem Wassergehalt, kommt es meist zu einer erkennbaren Verflüssigung des Betons. Dieser Umstand lässt sich auf eine Art

[37] Vgl. *Wolfgang vom Berg*, Flugasche als Betonzusatzstoff, Verband Deutscher Betoningenieure Heft 87/01 ,2001, S.1-2

[38] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.23

[39] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.16

[40] Vgl. *Hermann, Kurt*, Zusatzstoffe: Teil 4, Silicastaub, Zeitschrift Cementbulletin Band 63 (1995) Heft 7, S.4

„Kugellagereffekt“ zurückführen. Die glatten kugelförmigen Flugaschepartikeln erleichtern das Gleiten der Zement- und Gesteinskörner im Frischbeton. Es kommt zu einer deutlichen Verbesserung des Fließvermögens. Umgekehrt kann demnach der Wassergehalt und damit der W/Z-Wert bei gleichbleibender Konsistenz verringert werden. Zusätzlich zum „Kugellagereffekt“ konnte durch Untersuchungen festgestellt werden, dass der Wasseranspruch durch eine verbesserte Kornzusammensetzung im Feinstkornbereich verringert werden kann.[41]

Durch Beimengung von Flugasche wird eine physikalische Füllerwirkung erzielt. Die wassergefüllten Hohlräume werden durch kleinste Partikel ersetzt. Die hohlraumfüllende Wirkung ist umso größer, je feiner der Füller ist. Der Porenanteil kann verringert werden und die Festigkeit nimmt im Allgemeinen mit zunehmender Feinheit der Flugasche zu. Allerdings wird die Wirkung sehr stark vom Anteil der feinsten Partikel mit einem Durchmesser kleiner 10 µm bestimmt. Die höchsten Festigkeiten wurden mit gemahlener Flugasche bei einer Zugabemenge von rund 30 bis 45 M.-% bezogen auf den Zementanteil erzielt. [42]

2.1.4 Metakaolin

Metakaoline entstehen durch Erhitzen des Tonminerals Kaolinit auf 650 °C bis 800 °C. Dabei verdampft das im Kaolinit gebundene Wasser. Zusätzlich kommt es zur Abspaltung von Hydroxygruppen. Übrig bleibt eine quasi-amorphe Verbindung mit puzzolanischen Eigenschaften. [43]

Metakaoline weisen eine länglich, plattige Kornform auf. Sie besitzen eine eher poröse, geschieferte Struktur, wodurch sie im Vergleich zu Zement oder Hüttensand einen erhöhten Kornformfaktor aufweisen. Die Werte bewegen sich zwischen 2,8 bis 3,1. [44]

[41] Vgl. *Wolfgang vom Berg*, Flugasche als Betonzusatzstoff, Verband Deutscher Betoningenieure Heft 87/01 ,2001, S.1-2

[42] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.26

[43] Vgl. *Stark Jochen, Wicht Bernd*, Dauerhaftigkeit von Beton, 2.Auflage, 2013, S.353

[44] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.38-39

Bezüglich der Festigkeitsentwicklung konnte festgestellt werden, dass durch Zugabe von 10 bis 20 M.-% Metakaolin und W/Z-Werten kleiner gleich 0,50 eine deutliche Festigkeitssteigerung erzielt werden kann.[45] In gleicher Weise wie auch die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen puzzolanischen Füllstoffe Microsilica und Flugasche, reagieren Metakaoline mit dem Calciumhydroxid durch Bildung von CSH-Phasen. Sie tragen dementsprechend einen Teil zur Festigkeitsentwicklung bei. Allerdings kann bei Einsatz von Metakaoline die festigkeitssteigernde Wirkung bereits nach zwei Tagen festgestellt werden, während bei Flugasche die Wirkung erst nach rund drei Monaten erkennbar wird. Dieser Umstand lässt sich durch den deutlich höheren Feinheitsgrad und der damit verbunden größeren Reaktionsfreudigkeit der Metakaoline erklären. Im Vergleich zu Betonen mit Kalksteinmehl als Zusatzstoff konnten beinahe doppelt so hohe Frühfestigkeiten erreicht werden. [46]

Die hohe Reaktionsfreudigkeit und die rasche Festigkeitsentwicklung führen jedoch auch zu einer erhöhten Temperaturentwicklung während der ersten Tage des Abbindeprozesses. Die Gefahr von Rissbildungen auf Grund von Temperaturspannungen steigt. [47]

2.1.5 Hüttensand

Hüttensand ist eine granulierte Hochofenschlacke mit latent hydraulischen Eigenschaften. Er entsteht durch Aufsprühen von Wasser mittels Hochdruckdüsen auf noch flüssige Hochofenschlacke. Dadurch wird die Schlackenschmelze rasch auf Temperaturen von unter 800 °C abgekühlt und fein zerteilt. Eine Rekristallisation der Schlacke wird verhindert und es entsteht ein glasförmiges Granulat bestehend aus vorwiegend CaO, SiO_2 und Al_2O_3 Verbindungen. Im Vergleich zum Portlandzement sind seine Bestandteile sehr ähnlich, jedoch ist der Kalkanteil im Hüttensand wesentlich geringer. Bedingt durch den

[45] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.26

[46] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.103 u. 109

[47] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.26

Herstellungsprozess weist er einen sehr hohen Wassergehalt von bis zu 30 M.-% auf. [48] [49]

Durch den Abkühlungsprozess entstehen kleine Glastropfen mit einer Korngröße größer 4mm. Fein vermahlen entwickelt Hüttensand seine besonders guten latent hydraulischen Eigenschaften. Bedingt durch den Mahlprozess und aufgrund der schwereren Mahlbarkeit weisen die Partikel des Hüttensandes eine kantigere Struktur als Zement oder Gesteinsmehl auf. Durch die sehr glatte Oberfläche können dennoch ähnliche Werte für den Kornformfaktor erreicht werden. Sie liegen zwischen 1,20 und 1,65. Im Allgemeinen werden Hüttensandmehle mit einer spezifischen Oberfläche von ≥ 2750 cm²/g verwendet. [50] [51]

Die Ursache der guten latent hydraulischen Eigenschaften des Hüttensandes liegt im Wesentlichen an seiner glasigen Stoffzustandsform. Es liegt eine unterkühlte, eingefrorene Schmelze vor, dessen Energiegehalt im Gegensatz zum kristallinen Zustand deutlich höher ist. Da mit zunehmendem Glasgehalt der Energiegehalt ansteigt, werden als Zusatzstoff Hüttensande mit einem Glasgehalt von 95 % bis beinahe 100 % verwendet. [52]

Hüttensand bildet die gleichen Reaktionsprodukte wie Portlandzement aus und kann daher hervorragend als teilweiser Zementersatz eingesetzt werden. Die Mengen variieren von 6 bis 35 M.-% beim Portlandhüttenzement (CEM II-S) bis zu 81 bis 95 M.-% bei Hochofenzementen (CEM III/C). Für den Ablauf der Reaktion benötigt er jedoch das aus der Zementreaktion gebildete Calciumhydroxid oder Sulfat als Anreger. Ansonsten würde zwar eine Reaktion mit Wasser erfolgen, allerdings nur sehr langsam. Der Zement fungiert demnach als Reaktionsbeschleuniger. Die Anfangserhärtung hüttensandhältiger Zemente verläuft langsamer als bei Portlandzementklinker. Dieser Umstand lässt sich auf Grund des geringeren Kalkgehaltes im Hüttensand erklären. Er reagiert langsamer mit Wasser und bildet nur sehr geringe Mengen an Calciumhydroxid. Dafür erhält

[48] Vgl. *Stark Jochen, Wicht Bernd*, Dauerhaftigkeit von Beton, 2.Auflage, 2013, S.40

[49] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.47

[50] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.37-39

[51] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.47

[52] Vgl. *Stark Jochen, Wicht Bernd*, Dauerhaftigkeit von Beton, 2.Auflage, 2013, S.40

man, je nach Menge an Aluminaten im Hüttensand, als Reaktionsprodukte einen etwas höheren Anteil an Calciumaluminathydraten. [53] [54] [55]

Im Vergleich zu reinen Portlandzementbetonen werden deutlich geringere Festigkeitswerte nach den ersten beiden Tagen ab Beginn des Abbindeprozesses erreicht. Daraus resultiert eine niedrigere Hydratationswärmentwicklung, die wiederum den Vorteil geringerer Zwangsspannungen und geringerer Rissneigung mit sich bringt (siehe Abbildung 2.6).

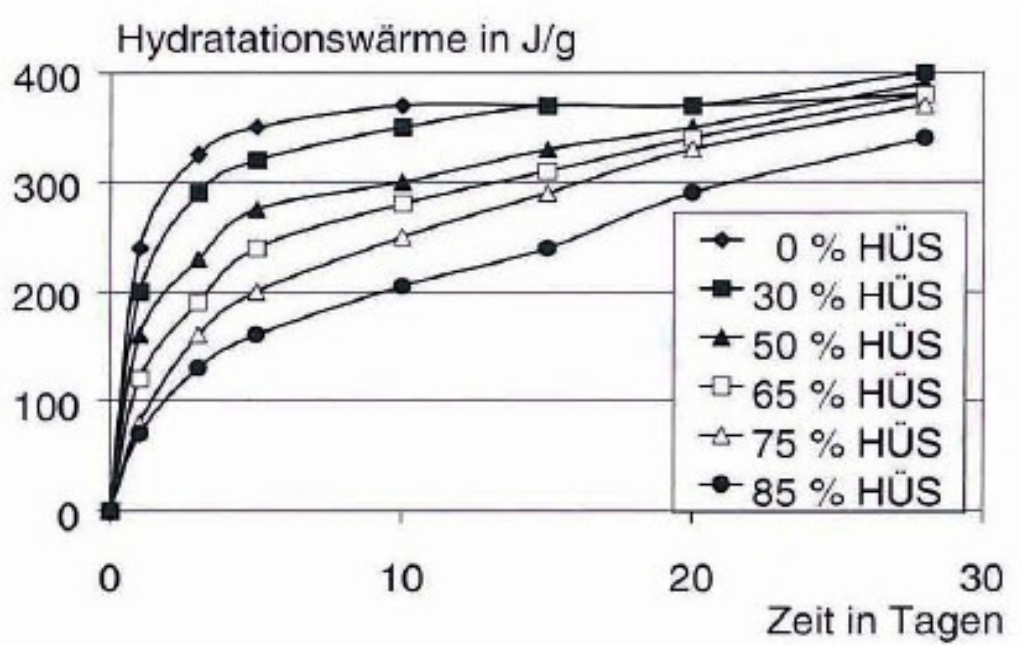


Abbildung 2.6 Hydratationswärmeentwicklung von Mörteln aus Zementen mit unterschiedlichem Hüttensandgehalt. [56]

Ab dem siebten Tag werden durch die latent-hydraulische Reaktion des Hüttensandes schließlich ähnliche Festigkeitswerte wie für reinen Portlandzementbeton erzielt. Im höheren Betonalter können sogar höhere Festigkeitswerte erzielt werden, da hüttensandreiche Zemente eine höhere Nacherhärtung aufweisen (siehe Abbildung 2.7). [57] [58]

[53] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.20

[54] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.48-49

[55] Vgl. *Bosold Diethelm, Pickhardt Roland*, B1 - Zemente und ihre Herstellung, Zement-Merkblätter der Informationsplattform der deutschen Zement- und Betonindustrie, 04/2014, S.4

[56] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.50

[57] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.109

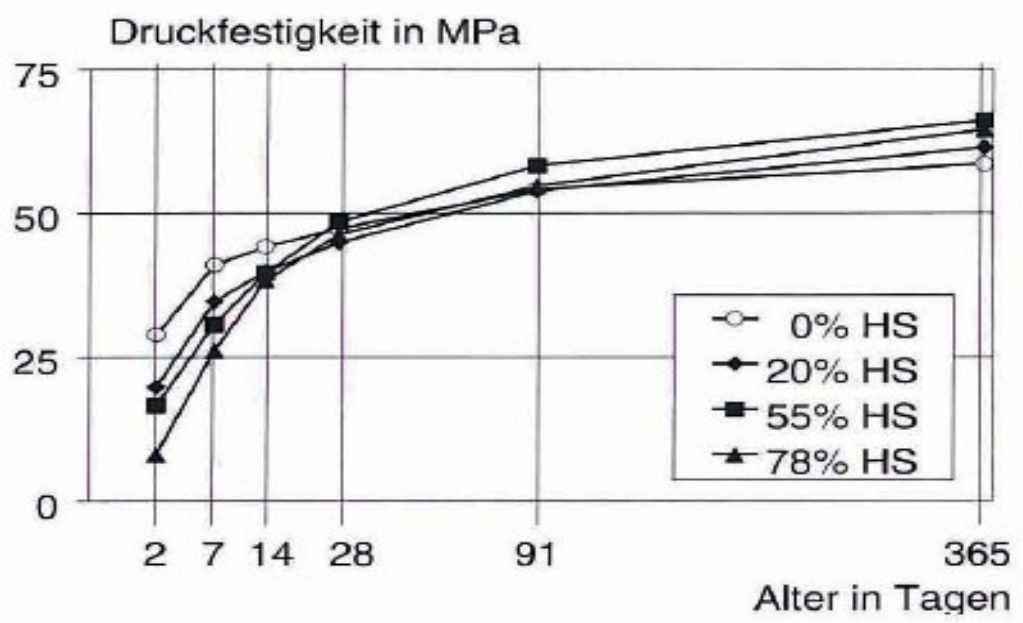


Abbildung 2.7 Druckfestigkeitsentwicklung von Mörteln aus Zementen gleicher Festigkeitsklasse mit unterschiedlichem Hüttensandgehalt [59]

Die Festigkeitsentwicklung wird durch die Feinheit des Hüttensandes beeinflusst. Mit zunehmender Feinheit nimmt die festigkeitssteigernde Wirkung zu. Jedoch wird dieser Umstand erst im höheren Alter von 28 bzw. 91 Tagen wirksam. [60]

Desweiteren kann durch Einsatz von Hochofenzementen ein dichteres Betongefüge mit geringerem Kapillarporenanteil erreicht werden. Die Porosität hängt vom Hydratationsgrad der latent-hydraulischen Feinstoffe ab. Je größer das Verhältnis des Hydratationsgrades des Hüttensandes zum Hydratationsgrad des Portlandzementklinkers ist, desto geringer die Porosität der Feinstoffmatrix. Mit steigernder Feinheit wird zudem eine Verfeinerung der Porenstruktur bewirkt. Demnach sind Betone unter Verwendung von Hochofenzement besser für Bauteile mit Frost-Tausalzbeanspruchung oder einer anderen Beanspruchung aggressiver Medien geeignet. [61] [62] Abbildung 2.8 zeigt einen Vergleich der

[58] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.48

[59] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.50

[60] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.25

[61] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.22 u. 115

[62] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.49

Porengrößenverteilung von Mörteln mit Portlandzement und Hochofenzement mit einem Hüttensandanteil von 50 %.

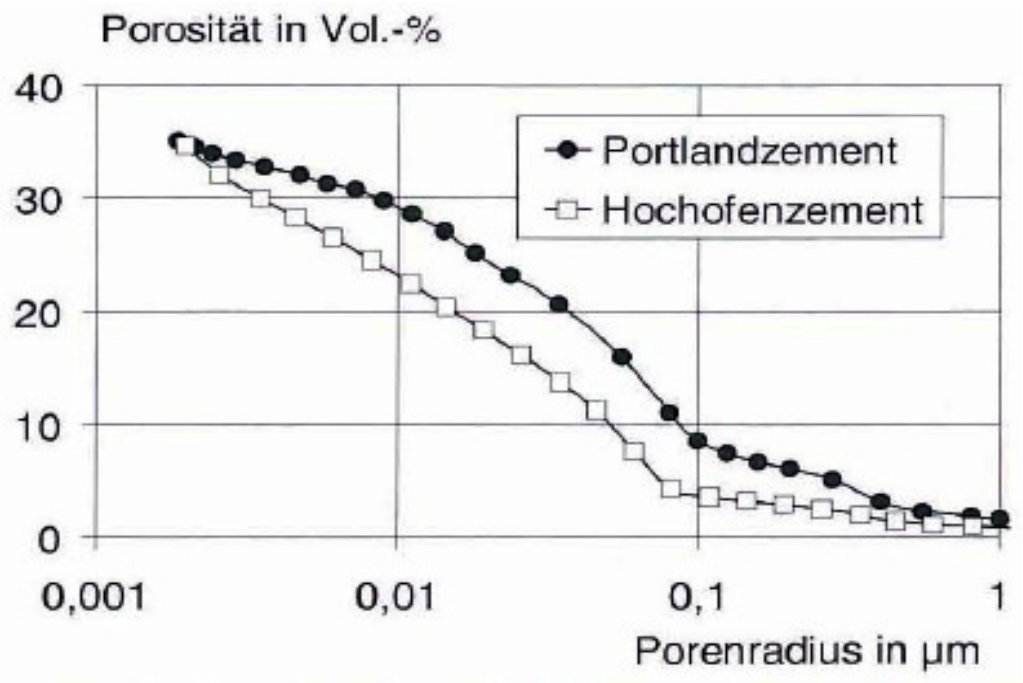


Abbildung 2.8 Vergleich der Porengrößenverteilung von Portlandzement und Hochofenzement mit 50 % Hüttensandanteil [63]

2.1.6 Quarzmehl

Quarzmehl ist im Allgemeinen ein sehr fein gemahlenes Quarzgestein das vorwiegend bei der Herstellung hochfester Betone als Füllstoff zur Erhöhung der Packungsdichte bzw. zur Erhöhung des Mehlkornanteils verwendet wird. Es ist in unterschiedlichen Feinheitsgraden erhältlich und kann daher sehr gut zur Optimierung der Kornzusammensetzung herangezogen werden. Der mittlere Korndurchmesser bewegt sich zwischen 4 und 50 µm. Die Partikelform kann als vorwiegend kantig mit rauer Oberfläche beschrieben werden. Bedingt dadurch bewegen sich die Werte für den Kornformfaktor zwischen 1,2 und 1,9. Zum Unterschied von Kalksteinmehl besitzt Quarzmehl eine relativ hohe Festigkeit, wodurch es sich besser zur Herstellung hochfester Betone eignet. Außerdem führt

[63] Vgl. *Schneider Martin, Meng Birgit*, Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand, Fachzeitschrift Beton-Information, 2000, Heft 1, S.50

der Einsatz von Kalksteinmehlen zu einer eher zähflüssigen, schwer zu verarbeitenden Frischbetonkonsistenz. [64] [65] [66]

Wie schon eingangs erwähnt zählen Quarzmehle zu der Gruppe der inerten Stoffe. Ihre Wirkung im Beton beschränkt sich im Wesentlichen auf eine physikalische Füllerwirkung. [67]

Für die Herstellung von UHPC-Beton wird häufig ein sehr hoher Zementgehalt von 700 bis 900 kg/m³ verwendet. Mit zunehmendem Zementgehalt und ohne entsprechende Zugabe von Fließmitteln entstehen eher zähflüssige Betone die sich nur schwer verarbeiten lassen. Zudem kann es zu sehr hohen Temperaturen bei der Hydratation und zu großen autogenen Schwindverformungen kommen.

Ersetzt man nun einen Teil des Zementes durch Quarzmehl können die Frischbetoneigenschaften positiv verändert werden. Die glattere Oberfläche und die besseren Dispergierungseigenschaften des Quarzmehls führen zu einer Verringerung der relativen Fließgrenze und dementsprechend zu einer besseren Verarbeitbarkeit. Dadurch kann auf die Zugabe von Fließmittel verzichtet werden bzw. zumindest der Anteil reduziert werden. [68]

Weiters haben Untersuchungen gezeigt, dass der Zementgehalt durch den Einsatz von Quarzmehlen deutlich reduziert werden kann, ohne dass die Druckfestigkeit wesentlich abnimmt (siehe Abbildung 2.9).

[64] Vgl. *Slowik/Schmidt*, Kapillare Schwindrissbildung in Beton, Forschungsbericht zu Ursachen und Auswirkungen sowie zur Vermeidung von Frühschwindrissen, 2010, Kap. 3.2 S.21

[65] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.37-39

[66] Vgl. *Bergmeister/Fingerloos/Wörner*, Beton - Kalender 2013, Lebensdauer und Instandsetzung Brandschutz, Kap. Grundlagen zur Herstellung ultrahochfester Betone S.127

[67] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.14

[68] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.57

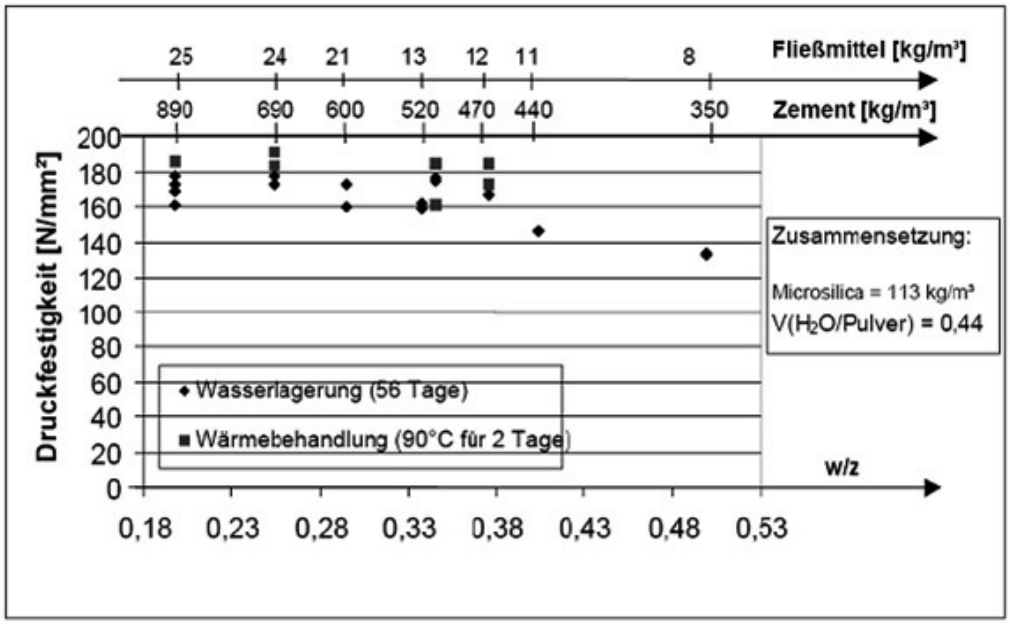


Abbildung 2.9 Druckfestigkeit bei abnehmenden Zementgehalt aber konstantem Verhältnis von Wasser zu Feinteilen [69]

Obwohl Quarzmehle zu den inerten Stoffen gezählt werden, konnte eine geringfüge puzzolanische Reaktivität festgestellt werden. Im Vergleich zu Kalksteinmehl wurde bei nahezu gleichem Feinheitsgrad eine 15 bis 20 % höhere Festigkeit erzielt. Besonders bei sehr fein gemahlenen Quarzmehlen wird der Effekt deutlicher erkennbar. Durch das Feinmahlen werden die Quarzkristalle zerstört und zusätzlich Reaktionsfläche geschaffen. Diese geringe Reaktivität beschränkt sich jedoch lediglich auf Oberflächenreaktionen. [70]

2.2 Granulometrie

Normalbetone setzen sich im Allgemeinen aus der Gesteinskörnung, dem Zement als Bindemittel und Wasser zusammen. Die Beifügung feiner Zusatzstoffe, wie Flugasche oder Hüttensand, erfolgt vorwiegend nur um die Eigenschaften des Betons positiv auf die jeweilige Nutzung abzustimmen. Für die Zusammensetzung der Normalbetone wird eine auf *Fuller und Thompson* zurückzuführende gravimetrische Mischungsberechnung herangezogen. Dadurch kann die

[69] Vgl. *Schmidt Michael, Geisenhanslüke Carsten*, Optimierung der Zusammensetzung des Feinstkorns von Ultra-Hochleistungs- und von selbstverdichtendem Beton, 2005, beton 36

[70] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.102-103

Korngrößenverteilung für Gesteinskörnungen größer 0,125 mm mit Hilfe eines zweidimensionalen Kreisscheibenmodells geometrisch dargestellt werden. Für die Praxis erfolgt dies in Form von Sieblinien mit unterschiedlichen Größtkörnern am anschaulichsten. Durch Abstimmung dieser Sieblinien aufeinander kann eine Verminderung des Hohlraumgehaltes und in weiterer Folge eine Minimierung des Zementleimgehaltes erzielt werden. [71]

Bei hochfesten bzw. ultra-hochfesten Betonen werden unterschiedlichste Zusatzstoffe mit Korngrößen kleiner 0,125 mm eingesetzt. Eine reine Optimierung der Sieblinien reicht nicht mehr aus um die erhöhten Ansprüche an die Festigkeit und Verarbeitbarkeit der Hochleistungsbetone zu erfüllen. Vielmehr haben die Kornform und die Zusammensetzung der Feinstoffe mit Korngrößen kleiner 0,125 mm, sowie interpartikuläre Kräfte zwischen den Partikel, größeren Einfluss auf die gewünschten Betoneigenschaften. [72]

Im Folgenden werden einzelne wesentliche Einflussgrößen auf die Kornpackung sowie den volumetrischen Wasserbedarf beschrieben. Abbildung 2.10 gibt einen Überblick über diese Faktoren.

[71] Vgl. *Geisenhanslüke Carsten*, Modellierung und Berechnung hochdichter Feinstkornpackungen für Beton, Universität Kassel, 45. Forschungskolloquium des DAfStb, 2005, S.65

[72] Vgl. *Geisenhanslüke Carsten*, Modellierung und Berechnung hochdichter Feinstkornpackungen für Beton, Universität Kassel, 45. Forschungskolloquium des DAfStb, 2005, S.65

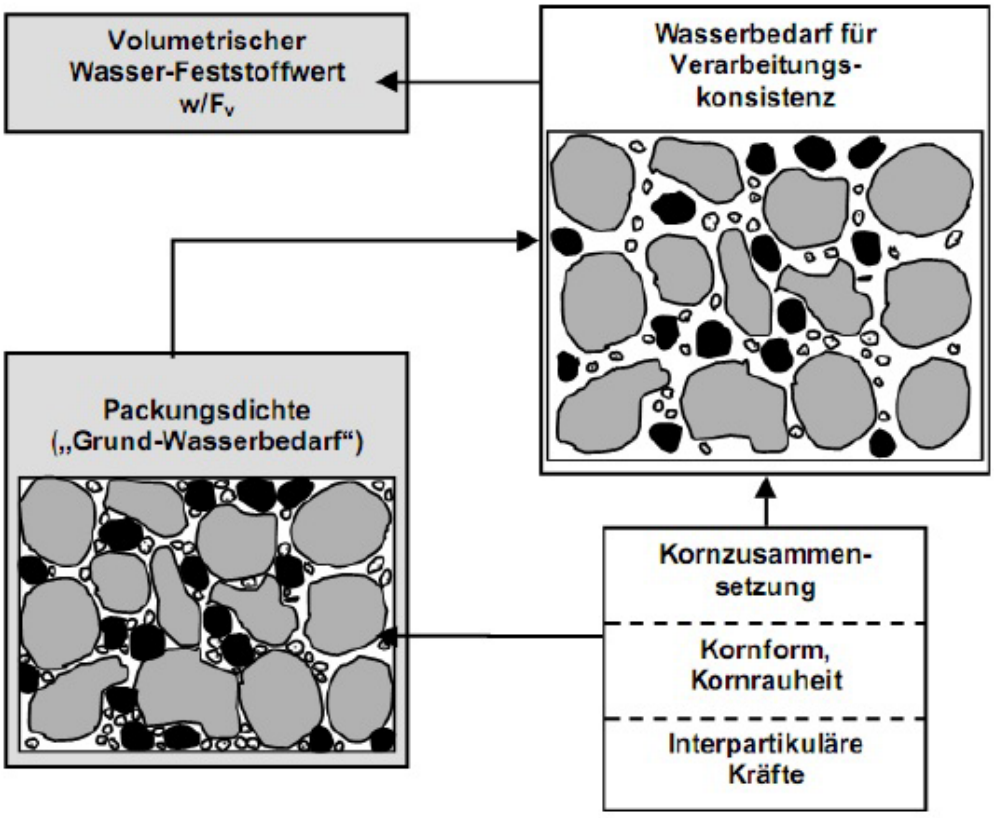


Abbildung 2.10 Einflussgrößen der Feinstoffe auf die Kornpackung und den Wasser-Feststoff-Wert [73]

2.2.1 Korngröße

Die Korngröße ist definiert durch eine geometrische Abmessung eines beliebig geformten Teilchens. Dabei hängt es von der Messmethode ab, welches Partikelmerkmal zur Korngrößenmessung herangezogen wird und letztendlich die Größe bestimmt. Im Regelfall wird die durch beispielsweise Siebung oder Lichtstreuung am Teilchen gewonnene Messgröße immer mit dem Durchmesser einer idealen Kugel verglichen, die die gleiche Korngröße erbracht hätte. Das heißt man erhält einen zu einer Vergleichskugel äquivalenten Durchmesser der unabhängig von der Kornform ist. Deshalb kann es in Abhängigkeit von der Messmethode zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Weicht die Kornform stark von der Kugel ab, kann es zu größeren Unterschieden je nach Messung

[73] Vgl. *Schmidt Michael, Fehling Ekkehard*, Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 7, 2007, S.145

kommen. Je geringer die Abweichung, desto genauer sind die Ergebnisse. Nur für kugelförmige Teilchen sollte die Bestimmung unabhängig von der gewählten Methode sein. [74]

Grundsätzlich kann hinsichtlich der Korngröße eine Unterscheidung in:

- Kolloiddisperse Teilchen mit 1 nm bis 1 μm Durchmesser
- Feindisperse Teilchen zwischen 1 μm und 100 μm Durchmesser
- Grobdisperse Teilchen und grobkörnige Schüttgüter mit Korngrößen zwischen 100 μm bis zu Körner im Zentimeterbereich

getroffen werden. [75]

Je feiner die Partikel werden umso schwieriger wird es die Korngrößen zu bestimmen. Die für grobe Körner üblicherweise eingesetzte Siebanalyse kann nur mehr bedingt angewendet werden, da es zu Verstaubungsverlusten kommt. Aus diesem Grund wurden andere Verfahren zur Bestimmung entwickelt, die sich in zwei Gruppen einteilen lassen:

- Verfahren mit indirekter Bestimmung der Korngröße
- Verfahren mit direkter Bestimmung der Korngrößen.

Zur Methode der indirekten Bestimmung zählen z.B. die Schlämmanalyse und die Lasergranulometrie. Beide Verfahren nutzen eine physikalisch leichter messbare Größe, die mit der Korngröße in einem funktionellen Zusammenhang steht. Über diesen Umweg kann schließlich auf die zu bestimmende Korngröße rückgeschlossen werden. Der Nachteil bei diesen Methoden liegt wiederum darin, dass Annahmen getroffen werden müssen, wodurch es zu Ungenauigkeiten kommen kann.

Bei den Verfahren mit direkter Bestimmung werden die Abmessungen der Körner hingegen direkt bestimmt. Dazu zählen fotooptische Verfahren, wie der Flow-Particle-Image-Analyzer (FPIA), oder Geräte die eine Auswertung von Schattenbildern vollziehen. [76]

---

[74] Vgl. *Stark Ursula, Müller Anette*, Effektive Methoden zur Messung der Korngröße und Kornform, Bauhaus-Universität Weimar, 2004, S.7

[75] Vgl. *Stark Ursula, Müller Anette*, Effektive Methoden zur Messung der Korngröße und Kornform, Bauhaus-Universität Weimar, 2004, S.7

[76] Vgl. *Fischböck Eva, Nischer Peter*, Kornzusammensetzung des Mehlkorns, Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis, Fachzeitschrift zement + beton, Ausgabe 5_09, 2009, S.22

2.2.1.1 Schlämmanalyse

Die grundlegende Überlegung hinter der Schlämmanalyse ist, eine je nach Korngröße unterschiedliche Fallgeschwindigkeit in einem Fluid. Auf Grundlage dessen lässt sich eine Endfallgeschwindigkeit eines Partikelkollektives messen. Daraus kann mit Hilfe der *Stoke'schen Gleichung* der Korndurchmesser rückgerechnet werden. Es wird angenommen dass es sich um ideal glatte und kugelförmige Partikel handelt und eine laminare Strömung vorherrscht.

$$v = \frac{1}{18} * \frac{\Delta\rho}{\eta_F} * d^2$$

v ..... Endfallgeschwindigkeit

$\Delta\rho$ ..... Differenz zwischen der Dichte der Probe und der Dichte des Messfluides

η_F ..... Viskosität des Fluids

d ..... Partikeldurchmesser

Man erhält äquivalente Durchmesser von Körnern mit gleicher Endfallgeschwindigkeit.

Mit diesem Verfahren ermittelte Korndurchmesser stellen nicht nur auf Grund der oben genannten Annahmen eine Näherung dar. Zusätzlich hat auch die Konzentration der Suspension Auswirkungen auf die Messergebnisse. Bei einer zu hohen Konzentration behindern sich die Teilchen gegenseitig beim Absetzvorgang. Die Endfallgeschwindigkeit wird zu gering angenommen und der Korndurchmesser überschätzt. [77]

2.2.1.2 Lasergranulometrie

Bei der Lasergranulometrie macht man sich den Umstand zunutze, dass ein Laserstrahl beim Auftreffen auf ein Partikel eine Beugung widerfährt. Der Beugungswinkel ist dabei indirekt proportional zur Korngröße und kann daher für

[77] Vgl. *Fischböck Eva, Nischer Peter*, Kornzusammensetzung des Mehlkorns, Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis, Fachzeitschrift zement + beton, Ausgabe 5_09, 2009, S.22-23

die Bestimmung herangezogen werden. [78] Zur Verdeutlichung ist die Abhängigkeit des Beugungswinkels vom Korndurchmesser in Abbildung 2.11 schematisch dargestellt. Je kleiner ein Teilchen ist, desto größer ist der Beugungswinkel des Laserstrahls.

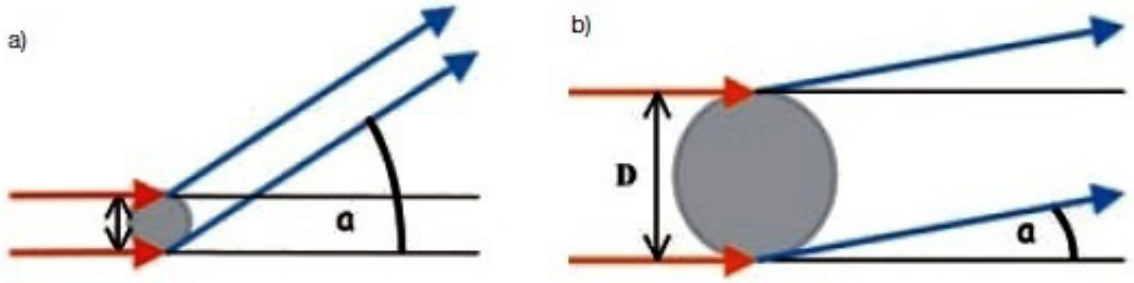


Abbildung 2.11 Schematische Darstellung des Beugungswinkels in Abhängigkeit des Korndurchmessers [79]

Bei der Messung eines Kornhaufwerks entstehen Beugungsmuster über die mit mathematischen Theorien auf die Korngrößenverteilung rückgeschlossen werden kann. Dabei ist die Theorie nach *Frauenhofer* die am häufigsten angewendete Methode. Auch hierbei werden glatte, runde und lichtundurchlässige Körner vorausgesetzt, wodurch es wie bei der Schlämmanalyse zu Ungenauigkeiten bei der Bestimmung kommt. Zu dem kommt es zu Streu- und Absorptionseffekten, die bei der genannten Theorie nicht berücksichtigt werden, und vor allem im Bereich sehr feiner Partikel (ca. 1 µm) zu nicht korrekten Ergebnissen führen. Eine weitere Problematik stellt die Messung von Hüttensand dar. Hüttensand besteht vorwiegend aus glasigen Partikeln, die die vorhin genannte Forderung von lichtundurchlässigen Körnern nicht erfüllt. D.h. Messungen von Portlandhüttenzementen oder Hochofenzementen können nur unter Vorbehalt durchgeführt werden, da sie mit Sicherheit ungenaue Ergebnisse liefern. Daher dient die Methode der Lasergranulometrie im Allgemeinen mehr als

[78] Vgl. *Fischböck Eva, Nischer Peter*, Kornzusammensetzung des Mehlkorns, Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis, Fachzeitschrift zement + beton, Ausgabe 5_09, 2009, S.24

[79] Vgl. *Fischböck Eva, Nischer Peter*, Kornzusammensetzung des Mehlkorns, Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis, Fachzeitschrift zement + beton, Ausgabe 5_09, 2009, S.23

Abschätzungs- und Vergleichsmethode. Für genauere Aussagen hinsichtlich der Korngrößenverteilung sollte auf fotooptische Methoden zurückgegriffen werden. [80]

2.2.1.3 Fotooptische Verfahren

Ein Beispiel einer fotooptischen Methode ist der Flow-Particle-Image-Analyzer (FPIA). Das Gerät erlaubt eine direkte Vermessung der einzelnen Körner, wodurch sehr genaue Ergebnisse erzielt werden können. Mittels einer hochauflösenden Kamera werden Fotos einer in Suspension befindlichen Probe gemacht. Anschließend kann anhand der Fotos jedes einzelne Korn vermessen werden und daraus die Korngröße bestimmt werden. Abbildung 2.12 zeigt eine stark vergrößerte fotographische Aufnahme eines Kornes in einer Suspension und die Vorgangsweise der Bestimmung einzelner Parameter aus den Messergebnissen. [81]

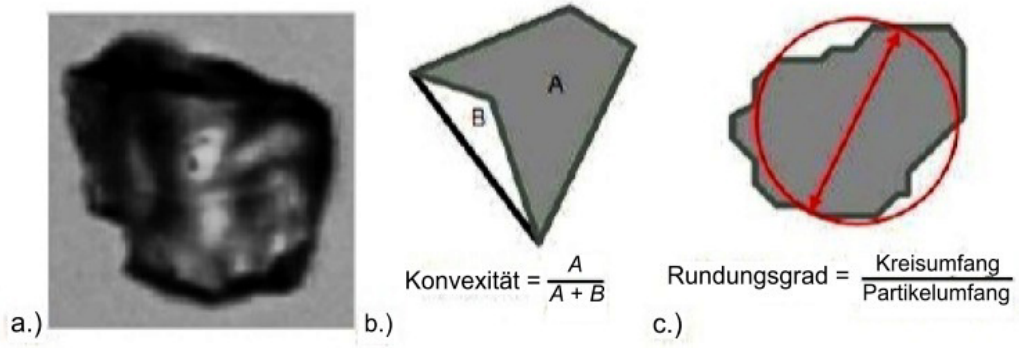


Abbildung 2.12 a) Bildaufnahme eines Kornes einer suspendierten Probe, b) Bestimmung der Konvexität eines Partikels, c) Berechnung des Rundungsgrades eines Kornes [82]

Für aussagekräftige Ergebnisse müssen sämtliche Körner einer Probe, das sind in etwa 2 Millionen Stück, vermessen werden. Die möglichen bestimmbaren Partikelgrößen bewegen sich zwischen 0,5 µm und 200 µm. Der große Vorteil liegt daran, dass nicht nur die Korngröße exakt ermittelt werden kann, sondern auch

[80] Vgl. *Fischböck Eva, Nischer Peter*, Kornzusammensetzung des Mehlkorns, Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis, Fachzeitschrift zement + beton, Ausgabe 5_09, 2009, S.24

[81] Vgl. *Fischböck Eva, Nischer Peter*, Kornzusammensetzung des Mehlkorns, Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis, Fachzeitschrift zement + beton, Ausgabe 5_09, 2009, S.24-25

[82] Vgl. *Fischböck Eva, Nischer Peter*, Kornzusammensetzung des Mehlkorns, Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis, Fachzeitschrift zement + beton, Ausgabe 5_09, 2009, S.24

Parameter der Kornform bestimmt werden können. Man erhält Aussagen über die massespezifische Oberfläche, den Rundungsgrad, das Länge zu Breite Verhältnis und die Konvexität. [83]

2.2.1.4 Bestimmung des Porenvolumens und der Porenradienverteilung mit Hilfe des Quecksilberporosimeters

Ein Verfahren, dass nicht die Korngröße sondern das umgebende Porenvolumen misst, ist die Quecksilberporosimetrie. Dabei wird Quecksilber auf eine Probe aufgebracht und mit Druck in die einzelnen Hohlräume hineingepresst. Je kleiner der Porenradius, desto mehr Druck wird benötigt um eine Pore zu füllen. Demnach kann jedem Porenradius ein bestimmter Druck zugeordnet werden. Dieser Umstand lässt sich mit Hilfe der *Washburn-Gleichung* beschreiben.

$$r = \frac{2 * \sigma_{Hg} * \cos\theta}{p}$$

r ..... Porenradius

σ_{Hg} ..... Oberflächenspannung von Quecksilber (= 480 mN/m)

θ ..... Kontaktwinkel (= 141,3°)

p ..... Druck

Die Gleichung geht von idealisierten zylindrischen Poren aus. Das heißt es wird lediglich ein kreisäquivalenter Radius bestimmt. Zudem ist der Druck vom Eintrittsradius einer Pore abhängig, wodurch mit einem gewissen Fehler zu rechnen ist. Das Größenspektrum der messbaren Porenradien ist abhängig vom Leistungsspektrum des Messgerätes. Je mehr Druck aufgebracht werden kann, desto kleinere Porenradien können bestimmt werden. [84] [85]

[83] Vgl. *Fischböck Eva, Nischer Peter*, Kornzusammensetzung des Mehlkorns, Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis, Fachzeitschrift zement + beton, Ausgabe 5_09, 2009, S.24-25

[84] Vgl. *Reschetilowski Wladimir*, Einführung in die heterogene Katalyse, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015, S.71-72

[85] Vgl. *Koch Andreas*, Deformation von Fassadenplatten aus Marmor – Schadenskartierung und gesteinstechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden, Universitätsverlag Göttingen, 2006, S.26-27

2.2.2 Korngrößenverteilung

Durch eine optimale Kornzusammensetzung kann eine hohe Packungsdichte erreicht und der Wasserbedarf verringert werden. Die feineren Körner schlüpfen in die Zwischenräume der größeren Körner. Die Folge ist ein geringer Anteil an mit Wasser zu füllenden Hohlräumen, eine hohe Dichte und dadurch hohe Festigkeitswerte. [86]

Abbildung 2.13 zeigt die Korngrößenverteilung von im Beton typischen enthaltenen Feinstoffen in Form von Sieblinien. Die mögliche Korngröße der feinsten und feinen Stoffe deckt dabei einen weit gestreuten Bereich zwischen 0,01 bis 500 µm ab. Zudem können sich auch die Verläufe der Kornverteilungen der einzelnen Stoffe deutlich unterscheiden. [87]

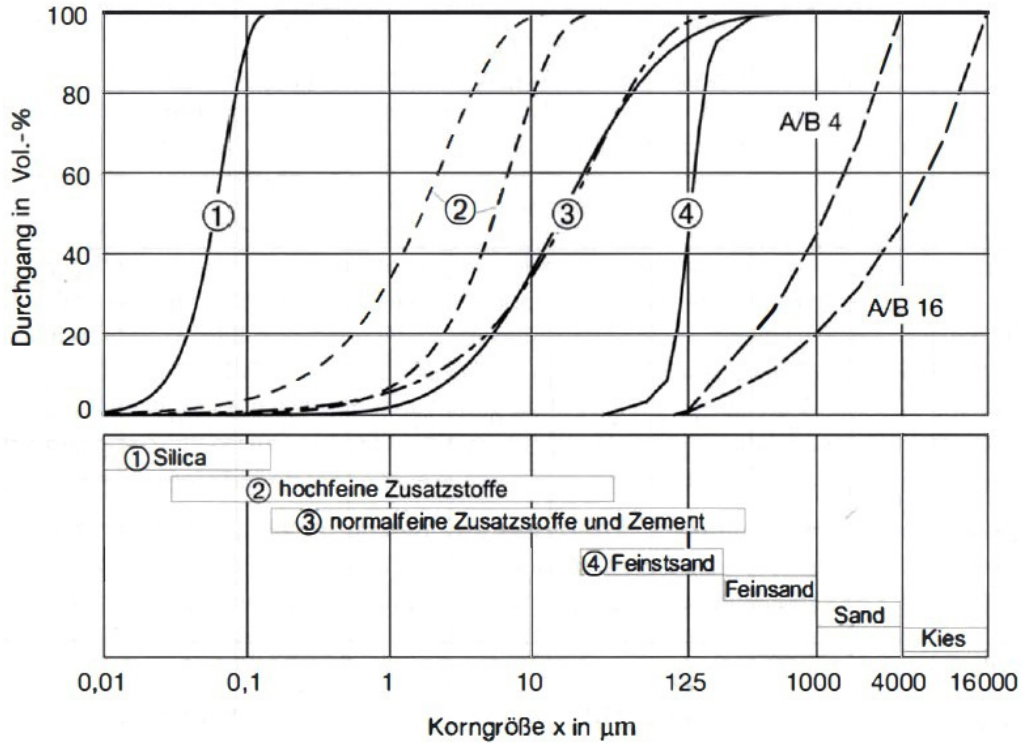


Abbildung 2.13 Typische im Beton enthaltene Feststoffe und deren Kornverteilungen [88]

[86] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.9

[87] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.32

[88] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.32

Damit mit diesen gemessenen Kornverteilungen besser gearbeitet werden kann, ist es sinnvoll mathematische Funktionen für deren Beschreibung heranzuziehen. Durch Erfahrungswerte und wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen konnten verschiedene Verteilungsfunktionen entwickelt werden. Mit deren Hilfe können die häufigsten Korngrößenverteilungen mit nur wenigen Parametern beschrieben werden.

Für Feinstoffe die durch einen Mahlprozess entstanden sind, dazu zählen z.B. der Zement oder Gesteinsmehle, eignet sich eine RRSB-Verteilung nach DIN 66145 sehr gut. Dabei definiert der Lageparameter *x'* die Korngröße *x* bei einer Massenverteilungssumme $Q_{3(x)}$ von 63,2 % und gibt damit ein Maß für die Feinheit des Stoffes an. Die Breite der Kornverteilung wird durch das Steigungsmaß *n* definiert. Ein kleiner Wert für *n* bedeutet eine weite Kornverteilung und dadurch eine hohe Packungsdichte, weil viele Füllkörner vorhanden sind.

Die Korngrößenverteilung der Flugasche hingegen kann am sinnvollsten durch eine logarithmische Normalverteilung entsprechend DIN 66144 beschrieben werden. Tabelle 2.1 zeigt einen Überblick über die üblicherweise verwendeten Verteilungsfunktionen mit deren Formel und Parametern. [89]

Tabelle 2.1 Üblich verwendete Verteilungsfunktionen einzelner Feinstoffe [90]

Feinstoff	Verteilungsfunktion			
	Bezeichnung	Formel	Feinheit	Verteilungsbreite
Zement	RRSB-Verteilung	$Q_3(x) = 1 - e^{\left(\frac{x}{x'}\right)^n}$	*x'*	*n*
Feinstsand				
Gesteinsmehle				
Metakaolin				
Silicastaub				
Flugasche	Logarithmische Normal-verteilung	$Q(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{d} e^{-\frac{1}{2}*x^2}\, dx$ $mit\ x = \frac{1}{s} \ln \frac{x^*}{d_{50}}$	d_{50}	$s = \ln\left(\frac{d_{50}}{d_{16}}\right)$

[89] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.32-33

[90] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.33

2.2.3 Spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche eines Gemisches von kugelförmigen Partikeln lässt sich indirekt aus der Korngrößenverteilung berechnen. Allerdings wird man selten eine perfekte Kugelform unter den einzelnen Körnern finden. Dieser Umstand wird mit Hilfe eines Kornformfaktors φ berücksichtigt. Es wird näherungsweise angenommen, dass alle Partikel den gleichen Formfaktor besitzen. Daraus ergibt sich schließlich die volumenbezogene Oberfläche zu: [91]

$$S_v = 6\,\varphi * \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta Q_{3,i}}{\bar{x}_i}$$

S_v ..... volumenbezogene Oberfläche

φ ..... Formfaktor

$\Delta Q_{3,i}$ ..... Volumenanteil der Kornklasse *i*

x_i ..... mittlerer arithmetischer Durchmesser der Kornklasse *i*

Wird die Dichte ρ in die Formel mit einbezogen erhält man die massebezogene Oberfläche S_m. Jedoch führt diese Betrachtung zu Fehlern, da die Dichte ρ im Allgemeinen nicht über den gesamten Korngrößenbereich konstant ist. Würde man ein genaueres Ergebnis benötigen, müssten die Dichte ρ_i und die Kornform φ_i für jede einzelne, möglichst eng abgestufte Kornklasse x_i, bestimmt werden. Das würde allerdings zu einem unpraktikabel hohen Prüfaufwand führen. Ein einfacheres Verfahren mit genaueren Ergebnissen liefert hingegen das Luftdurchlässigkeitsverfahren nach *Blaine*, dass in der ÖNORM EN 196-6 geregelt ist. Hierbei wird die spezifische Oberfläche im Vergleich zur Oberfläche einer Referenzprobe gemessen. Für hochfeine Stoffe wie Microsilica und Metakaoline kann dieses Verfahren jedoch nicht angewendet werden. Für diese Stoffe muss auf Hersteller- und Literaturangaben zurückgegriffen werden oder das Stickstoffadsorptionsverfahren nach *Brunauer, Emmett, Teller* (BET-Methode)

[91] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.34-36

angewendet werden. Zur Vergleichbarkeit ist es sinnvoll die BET-Oberflächen mittels folgender Formel in *Blaine-Oberflächen* umzurechnen. [92]

$$S_{m,Blaine} = \sqrt{\frac{S_{m,BET} - 3500}{3{,}89 * 10^{-4}}}$$

$S_{m,Blaine}$ ..... spezifische Oberfläche nach Blaine [cm²/g]

$S_{m,BET}$ ..... spezifische Oberfläche nach BET [cm²/g]

2.2.4 Kornform und Kornformfaktor

Die Kornform und Oberflächenrauheit haben einen wesentlichen Einfluss auf die Kornpackung. Im Allgemeinen gilt, dass möglichst regelmäßige, runde oder kubische Körner mit einer vergleichsweisen glatten Oberfläche günstiger sind als Partikel mit einer länglichen, plattigen Form mit rauer Oberfläche. Bei möglichst regelmäßigen kugeligen Körnern nimmt die Oberfläche bezogen auf das Volumen ab und die innere Reibung wird geringer. Die Folge ist, dass die Beweglichkeit der einzelnen Körner untereinander verbessert wird, wodurch die Verarbeitbarkeit erleichtert und ein dichteres Gefüge erreicht werden kann. [93]

Zur Charakterisierung der Kornform gibt es in der Literatur unterschiedlichste Ansätze. Meist wird ein Verhältnis zweier Teilchenabmessungen gebildet, wobei diese unabhängig voneinander ermittelt werden. Für manche Anwendungen reicht auch eine rein verbale Beschreibung der Körner, z.B. kantig oder rund usw., aus. Abbildung 2.14 gibt einen schematischen Überblick über mögliche Methoden zur Kornformbestimmung.

[92] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.34-36

[93] Vgl. *Schmidt Michael, Fehling Ekkehard*, Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 7, 2007, S.101

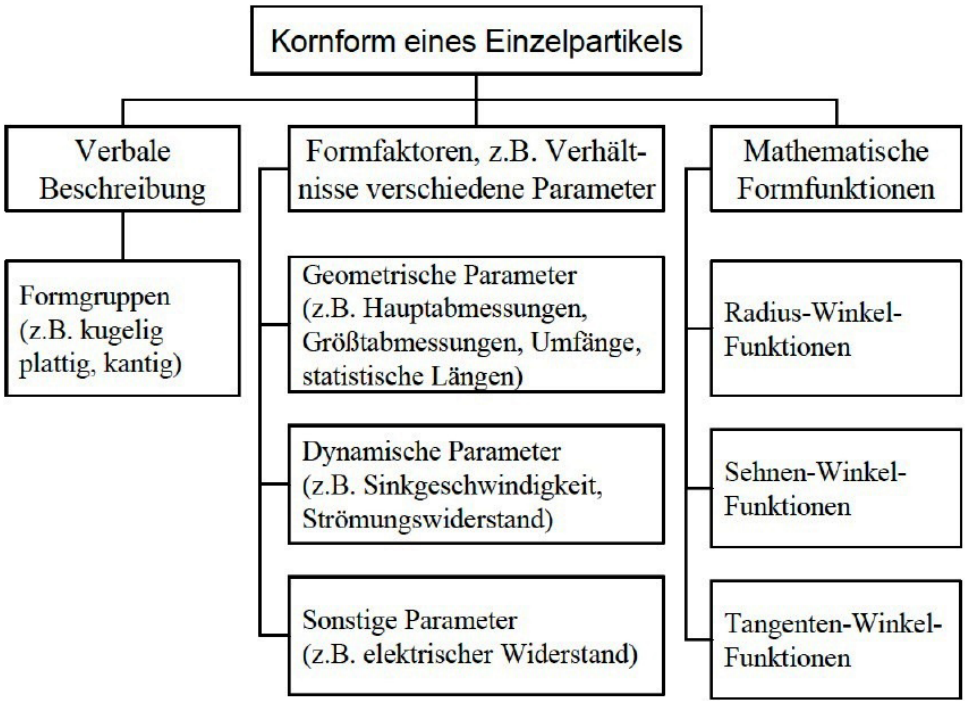


Abbildung 2.14 Überblick über mögliche Methoden zur Kornformbeschreibung [94]

Beispielsweise können Sandkörner durch eine visuelle Beurteilung der Form und der Oberflächenbeschaffenheit beschrieben werden und in Kategorien wie in Abbildung 2.15 gezeigt eingeteilt werden.

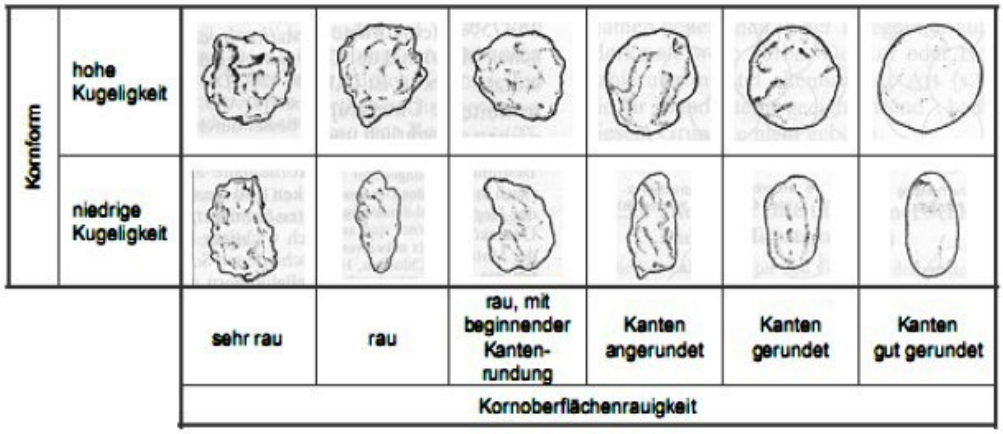


Abbildung 2.15 Charakterisierung von Sandkörner anhand der Kornform und Oberflächenrauigkeit [95]

[94] Vgl. *Huß Andreas*, Mischungsentwurf und Fließeigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) vom Mehlkorntyp unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung, Dissertation an der Universität Stuttgart, 2010, S.7

[95] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.19

In Bereichen in denen die Kornform eine größere Rolle spielt, wie beispielsweise bei der Optimierung der Packungsdichte, benötigt man jedoch genauere Methoden zur Bestimmung der Kornform. Im feindispersen Größenbereich kann mit Hilfe der Sphärizität nach *Wadell*, bei der ein Verhältnis zwischen der Oberfläche einer volumengleichen Kugel zur tatsächlichen Oberfläche gebildet wird, die Kornform charakterisiert werden. Man erhält Faktoren kleiner Eins. Eine andere Möglichkeit bittet der *Heywoodfaktor*. Dabei wird die gemessene spezifische Oberfläche mit der spezifischen Oberfläche einer Kugel mit einem äquivalenten Durchmesser verglichen. Entspricht der äquivalente Durchmesser gleich dem Durchmesser einer volumengleichen Kugel, so kann der *Heywoodfaktor* als Kehrwert der Sphärizität betrachtet werden. Die DIN 66141 gibt den Kornformfaktor nach diesen Überlegungen als reziproken Wert der Sphärizität nach *Wadell* an. Demzufolge ergeben sich Kornformfaktoren mit Werten von Eins für die Kugel und größer Eins für alle anderen beliebig geformten Partikel. [96]

Für gröbere Körnungen wird im Allgemeinen der Kornformfaktor aus dem Verhältnis von Länge *L* zu Breite *B* bestimmt. Dazu werden sämtliche Teilchen eines Korngemisches vermessen und die größte sowie die kleinste Abmessung ermittelt. Das Verhältnis der beiden Werte bildet den gewünschten Faktor, der zusammen mit den dazugehörigen Mengenanteilen zur Charakterisierung eines Korngemisches dient. Bildet man nun das Verhältnis der Masse der nicht kubischen Körner, mit einem *L/B*-Verhältnis größer Drei, zur Gesamtmasse des Korngemisches erhält man die Kornformkennzahl. Wobei in den Normen für bestimmte Anwendungsfälle Grenzwerte für diese Kennzahl festgelegt sind. [97]

Die neuesten Verfahren zur Kornformbestimmung sind fotooptische Verfahren, wie in Kapitel 2.2.1.3 beschrieben. Die Teilchen werden zweidimensional betrachtet, wobei die Partikel durch Rotation aus verschiedenen Richtungen fotografiert werden, um sichere Ergebnisse zu erhalten. Man benötigt zumindest zwei Parameter um Kornformen beschreiben zu können. Meist wird das Verhältnis von Länge *L* zu Breite *B* gebildet. Eine weitere Möglichkeit ist die Berechnung der Sphärizität mit Hilfe der Formel:

[96] Vgl. *Stark Ursula, Müller Anette*, Effektive Methoden zur Messung der Korngröße und Kornform, Bauhaus-Universität Weimar, 2004, S.7-8

[97] Vgl. *Stark Ursula, Müller Anette*, Effektive Methoden zur Messung der Korngröße und Kornform, Bauhaus-Universität Weimar, 2004, S.7-8

$$SPHT = \frac{U}{2 * \sqrt{\pi * A}}$$

SPHT ..... Sphärizität

U ..... Umfangen der Projektion des Teilchens

A ..... Fläche des flächengleichen Kreises

Die untere Grenze der messbaren Teilchen hängt von der möglichen Auflösung der verwendeten Kamera ab. [98]

Wie schon zuvor beschrieben wird der Kornformfaktor φ nach DIN 66141 durch das Verhältnis der tatsächlichen Partikeloberfläche eines beliebig geformten Teilchens zur Oberfläche einer volumengleichen Kugel angegeben. Dabei hat eine exakt geformte Kugel den Wert $\varphi = 1{,}0$. Die Berechnung dieses Faktors kann auch durch den Vergleich der spezifischen Oberfläche nach *Blaine* $S_{m,Blaine}$ zur massebezogenen Oberfläche $S_{m,cal}$ erfolgen. [99]

$$\varphi = \frac{S_{m,Blaine}}{S_{m,cal}}$$

φ ..... Kornformfaktor

$S_{m,Blaine}$ ..... spezifische Oberfläche nach *Blaine* [cm²/g]

$S_{m,cal}$ ..... berechnete massebezogene Oberfläche [cm²/g]

Es gibt zahlreiche Untersuchungen zur Kornform und ihrer Auswirkung in einer Kornpackung. Versuche von *Stark u. Müller* haben ergeben, dass eine eher runde Körnung bei einer engen Kornabstufung zu hohen Packungsdichten führen kann. Hingegen benötigen kantige Körner eine breite Korngrößenverteilung um hohe Raumausfüllungsgrade zu erreichen. *Horn* hat ebenfalls Untersuchungen hinsichtlich der Sphärizität und ihre Auswirkung auf die Packungsdichte bei stetigen und unstetigen Korngrößenverteilungen durchgeführt. Dabei wurden Verteilungen mit und ohne Ausfallskörnung jeweils mit natürlichen Rundkörnern, Splitt und Sicherheitsglasscherben erstellt und die erzielbare Raumausfüllung

[98] Vgl. *Stark Ursula, Müller Anette*, Effektive Methoden zur Messung der Korngröße und Kornform, Bauhaus-Universität Weimar, 2004, S.8-10

[99] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.37

ermittelt. Die Versuche ergaben, dass bei einer stetigen Verteilung runde Teilchen die besten Ergebnisse erzielen. Bei einer unstetigen Korngrößenverteilung konnte keine bzw. nur eine geringe Beeinflussung aufgrund der Sphärizität der Körner auf die Packungsdichte festgestellt werden. [100]

Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass die Oberflächengestalt, d.h. die Partikelgeometrie und die Oberflächenrauhigkeit, die Werte der Kornformfaktoren bestimmen. Um einen Eindruck der Oberflächengestalt einzelner Partikelgemische zu erhalten und um die Plausibilität der erhaltenen Ergebnisse zu überprüfen, können Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt werden. [101] [102] Die folgende Abbildung 2.16 zeigt Aufnahmen einiger ausgewählte Stoffe bei einer rund 2000-fachen Vergrößerung unter dem Rasterelektronenmikroskop. Man erhält einen guten Überblick über die Unterschiede der Kornform und der Oberflächenbeschaffenheit der hauptsächlich im Beton verwendeten Feinstoffe.

[100] Vgl. *Palm Sebastian*, Optimierung der Raumausfüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen, Dissertation an der Technischen Universität Clausthal, 2009, S.21

[101] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.17

[102] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.37-39

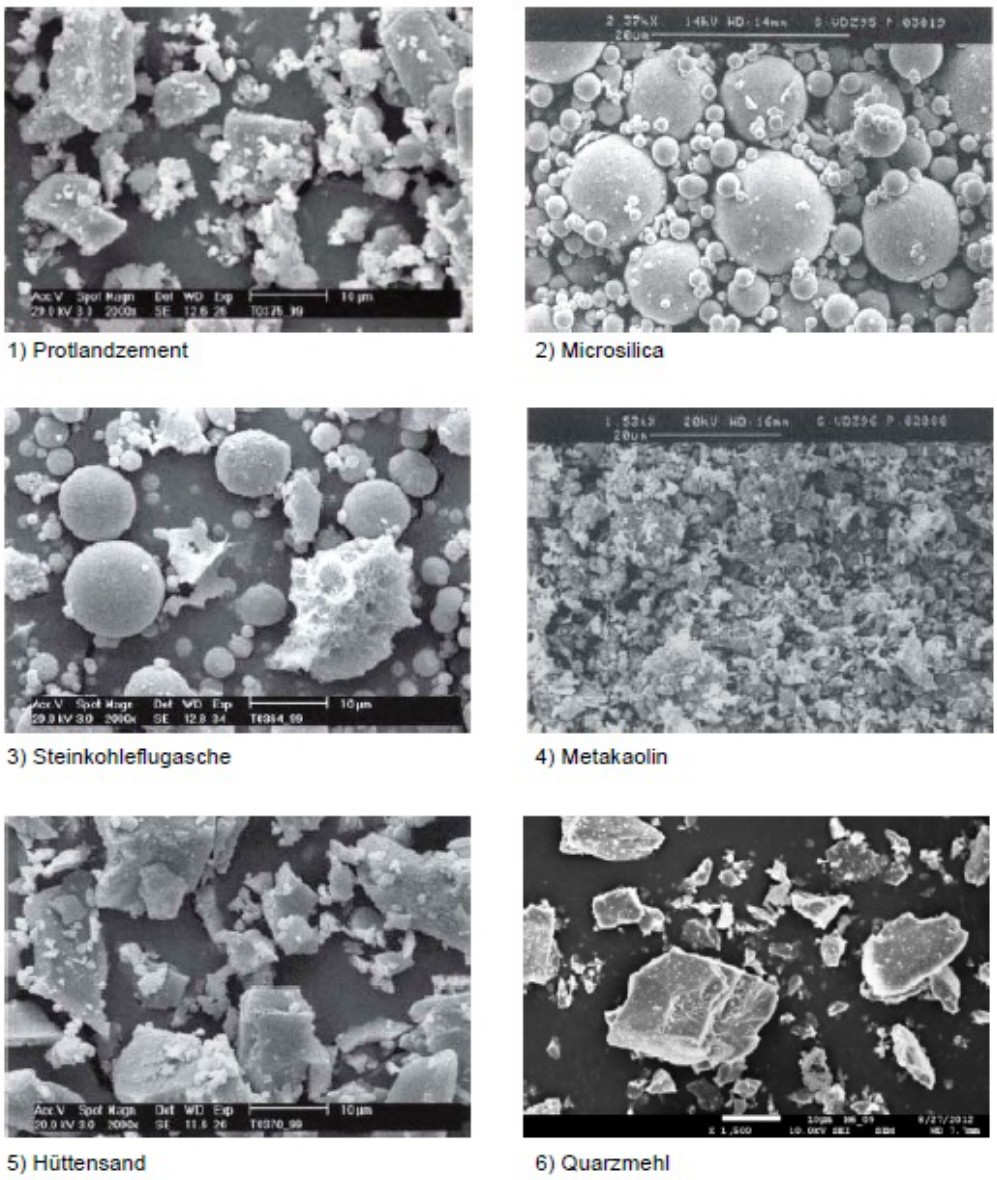


Abbildung 2.16 Elektronenmikroskopaufnahmen einiger ausgewählter Feinstoffe bei einer rund 2000-fachen Vergrößerung [103] [104]

Als Vergleichsmaterial dienen dabei die Mikroglaskugeln des Silicastaubes (siehe Abbildung 2.16 - Bild 2). Aufgrund ihrer perfekt kugeligen Form und glatten Oberfläche ergibt sich ein Kornformfaktor φ von 1,0. Den geringsten Unterschied zum Microsilica weist die Flugasche (siehe Abbildung 2.16 - Bild 3) auf. Sie besteht im Wesentlichen auch aus vorwiegend gerundeten Körnern, jedoch

[103] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.38

[104] Vgl. *Kindermann Carsten*, Entstaubtes Quarzmehl von Euroquarz als Zuschlag, Füllstoff und mehr für die Herstellung bauchemischer Produkte, Produktinformation Euroquarz GmbH, 2013, S.2

mischen sich teilweise unverbrannte Kokspartikel, Quarzkörner oder gebrochene Hohlkugeln hinzu. Zudem ist die Oberfläche etwas poröser. Dahingehend ist auch der etwas höhere Kornformfaktor von 1,10 bis 1,35 zu begründen. Bei Portlandzement (siehe Abbildung 2.16 - Bild 1) oder auch beim Gesteinsmehl fällt die viel kantigere Struktur der Partikel auf. Dieser Umstand lässt sich in erster Linie durch den Herstellungsprozess erklären. Der Mahlprozess führt zu eher kantigen Körnern mit rauer Oberfläche. Wobei beispielsweise Quarzmehl (siehe Abbildung 2.16 - Bild 6) im Vergleich zu Kalksteinmehl aufgrund des höheren Härtegrades noch kantigere Formen ausbildet. Dementsprechend sind die Werte für den Kornformfaktor höher als die der Flugasche. Ähnlich wie das Quarzmehl wird auch Hüttensand (siehe Abbildung 2.16 - Bild 5) fein vermahlen. Es entstehen scherbenartige Partikel deren Kanten noch schärfer als die des Zementes sind. Da die Partikel aber eine sehr glatte Oberfläche besitzen, werden relativ niedrige Werte von 1,18 bis 1,65 für φ erreicht. Beim Metakaoline (siehe Abbildung 2.16 - Bild 4) ist die besonders plattige Struktur auffällig. Zudem sind die Partikel eher porös mit einer geschieferten Struktur. Alle diese ungünstigen Faktoren führen zu einem sehr hohen Kornformfaktor. Er bewegt sich zwischen 2,81 bis 3,08. [105]

Die hier beschriebene visuelle Beurteilung der Feinstoffe ist in der folgenden Tabelle 2.2 nochmals übersichtlich zusammengefasst.

[105] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.37-39

Tabelle 2.2 Kornformfaktoren und visuelle Beurteilung der Kornform anhand von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen ausgewählter Feinstoffe [106]

Feinstoffart	Kornform der Partikel	Oberflächenrauigkeit der Partikel	Kornformfaktor φ	zugehörige REM-Aufnahme in obiger Abbildung
Zement	kantig	rau	1,50 - 1,80	Bild 1)
Microsilica	kugelig	glatt	1,00	Bild 2)
Flugasche	gerundet	glatt bis porös	1,10 - 1,35	Bild 3)
Metakaolin	plattig	schiefrig, rau	2,81 - 3,08	Bild 4)
Hüttensand	sehr kantig	glatt	1,18 - 1,65	Bild 5)
Quarzmehl	kantig	rau	1,22 - 1,89	Bild 6)

2.2.5 Agglomeration

Bei Versuchen von *Reschke* konnte festgestellt werden, dass der Hohlraumgehalt einer Feinstkornpackung mit zunehmender Feinheit deutlich ansteigt. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurde dieser auf drei verschiedene Arten, zum Einem mit dem Stampfvolumeter, mit der Quecksilberdruckporosimetrie und mit Hilfe des Wasseranspruches, gemessen. Wie in Abbildung 2.17 zu erkennen ist, kommt es besonders im Bereich kleiner 10,0 µm der mittleren Partikelgröße zu einem überproportionalen Anstieg des Hohlraumgehaltes. Folglich wird eine optimal dichte Zusammenlagerung mit zunehmender Feinheit stark behindert. [107]

[106] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.39

[107] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.54

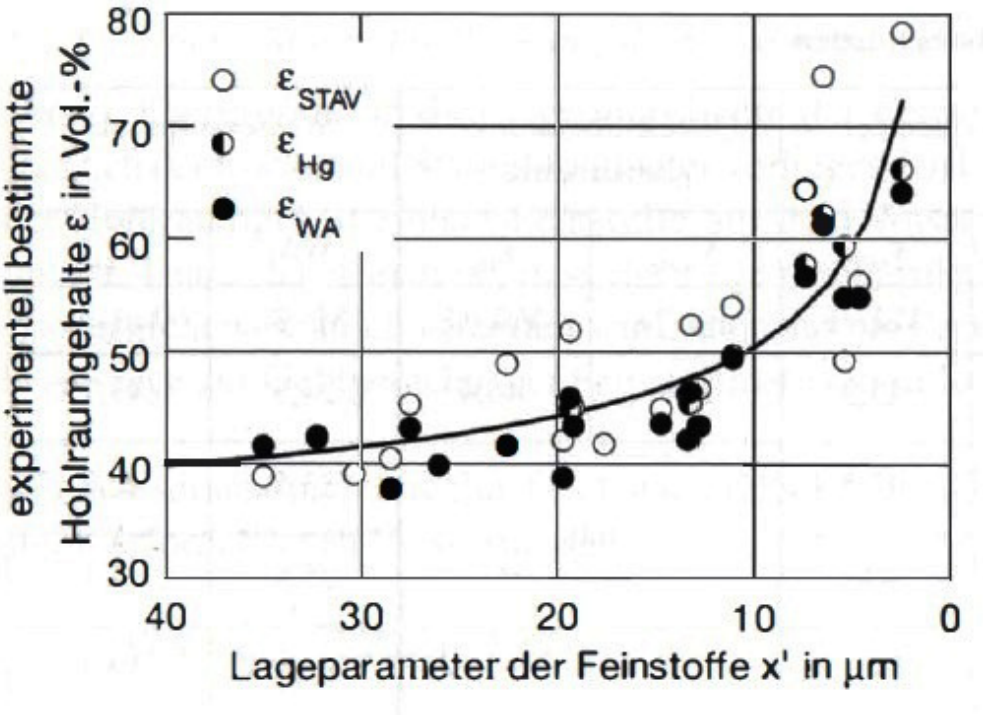


Abbildung 2.17 Zusammenhang zwischen experimentell ermittelten Hohlraumgehalten und der mittleren Feinheit von Feinstoffen, ε_{STAV}…Hohlraumgehalt mittels Stampfvolumeter ermittelt, ε_{Hg}…mittels Quecksilberdruckporosimetrie, ε_{WA}…mittels Wasseranspruch [108]

Ursache des starken Einflusses feiner Stoffe auf die Packungsdichte stellen interpartikuläre Kräfte dar, die zur Agglomeration führen. Zusätzlich werden als Begleiterscheinung die Korngrößenverteilung und die spezifische Oberfläche beeinflusst. Dabei ist neben der Feinheit auch die elektrische Ladung ein maßgebender Faktor. Zu beobachten ist, dass sich Agglomerate nicht nur im trockenen Zustand sondern auch im nassen Zustand in einer Suspension bilden können. Ausschlaggebend ist das Gleichgewicht zwischen abstoßenden elektrostatischen Kräften und anziehenden *van-der-Waals'schen-Kräften*. [109]

Bei trockenen Feinstoffgemischen haften einzelne Teilchen aufgrund *van-der-Waals'scher Kräfte* und elektrostatischen Haftkräfte aneinander. Je feiner die Partikel sind, desto häufiger kann es zum Auftreten von Agglomeraten kommen. Der Grund dafür liegt in der gegenüber den *van-der-Waals'schen* und elektrostatischen Kräften sehr geringen Gewichtskraft der Teilchen. Allerdings

[108] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.54

[109] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.73

können auch Phänomene auftreten, bei denen sehr große Partikel aneinander haften, die im Normalfall nicht miteinander agglomerieren würden, indem sich kleinere Partikel an deren Oberfläche festsetzen und dadurch diesen Effekt auslösen. Ein Zusammenhang zwischen der theoretischen Haftkraft zweier kugelförmiger Partikel und dem Partikeldurchmesser wird in Abbildung 2.18 gezeigt. [110] [111]

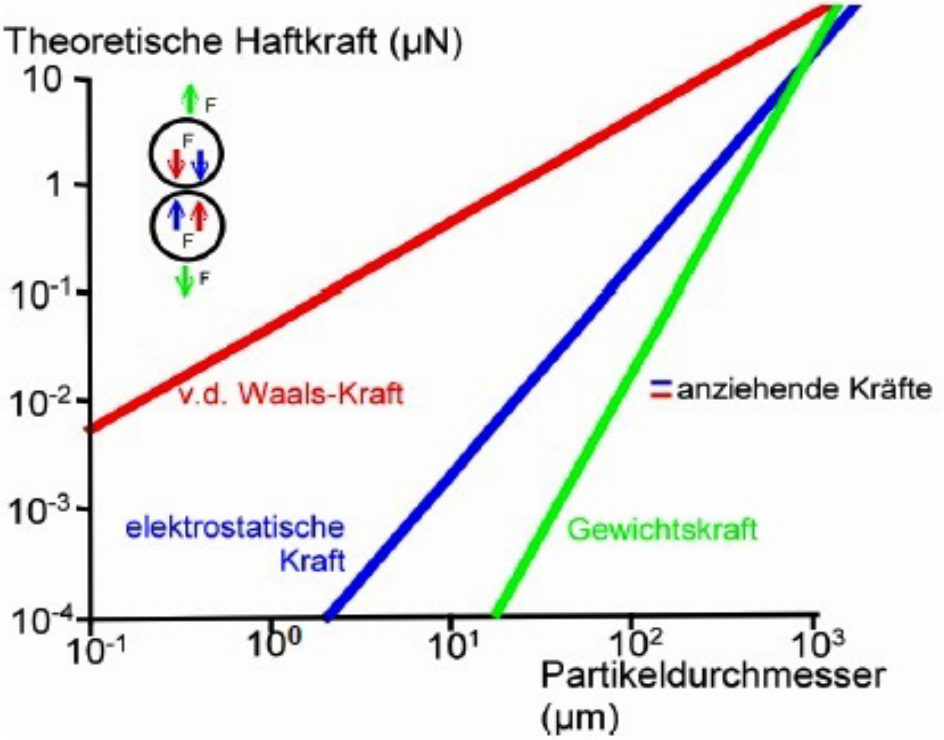


Abbildung 2.18 Zusammenhang zwischen dem Partikeldurchmesser, der Gewichtskraft und den interpartikulären Kräften [112]

In einer Suspension mit feinen Partikeln hingegen wirken sich die *van der Waals'schen Kräfte* nur bei sehr dicht zusammenliegenden Partikeln aus. Mit zunehmendem Abstand der Teilchen wirken die elektrostatischen Abstoßungskräfte stärker als die Anziehungskräfte, wodurch eine

[110] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.16-17

[111] Vgl. *Palm Sebastian*, Optimierung der Raumausfüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen, Dissertation an der Technischen Universität Clausthal, 2009, S.17

[112] Vgl. *Palm Sebastian*, Optimierung der Raumausfüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen, Dissertation an der Technischen Universität Clausthal, 2009, S.16

Zusammenlagerung der Partikel verhindert wird. Abbildung 2.19 zeigt den raschen Abfall der *van der Waals Kräfte* bei größer werdendem Abstand. [113]

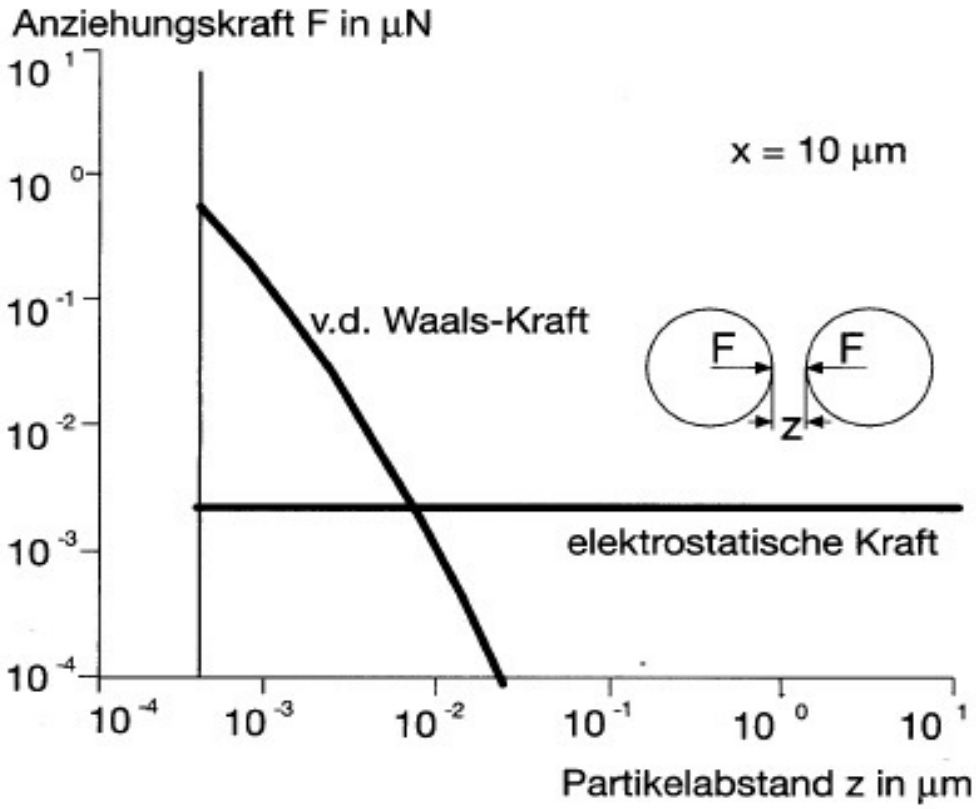


Abbildung 2.19 *Van der Waals'sche Anziehungskräfte* und elektrostatische Abstoßungskräfte in Abhängigkeit des Partikelabstandes [114]

Die elektrostatischen Kräfte werden nicht nur von der Ladung der Partikel selbst, sondern auch von den im Anmachwasser gelösten Ionen bestimmt. Den Partikeln entgegengesetzt geladene Ionen lagern sich an der Oberfläche der Teilchen an. Dieser Umstand führt bei steigender Ionenkonzentration zu einem Ladungsausgleich an der Partikeloberfläche. Die elektrostatischen Abstoßungskräfte nehmen ab und die Wirkung der *van der Waals'schen Kräfte* überwiegt. Dieser Umstand wird vor allem bei sehr feinen Partikeln wirksam. [115]

[113] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.18

[114] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.18

[115] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.18

Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass es aufgrund der Agglomeration zur Verringerung der Packungsdichte und der Beweglichkeit der Feinstoffsuspension kommt. Mit Hilfe von Komprimierungsmethoden, wie rütteln oder stampfen, bzw. durch die Anwesenheit von Wasser können die zwischenpartikulären Kräfte überwunden und dadurch die Bildung von Agglomeraten zumindest teilweise verhindert werden. [116]

[116] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.54

3 Packungsdichte: Berechnung, Optimierung, Einflussfaktoren

Laut Definition gibt die Packungsdichte *D* das Verhältnis des Feststoffvolumens zum Gesamtvolumen einer Partikelschüttung an, wobei sich das Gesamtvolumen aus dem Feststoffvolumen und dem Hohlraumgehalt errechnet. Daraus erhält man eine Formel für die Packungsdichte. Eine etwaige Teilchenbehinderung wird in diesem Fall vernachlässigt. [117] [118]

$$D = \frac{Feststoffvolumen}{Gesamtvolumen}$$

$$D = 1 - \frac{\varepsilon}{100}$$

D ..... Packungsdichte

ε ..... Hohlraumgehalt [Vol.-%]

Die Bestimmung „optimierter", d.h. dichter Kugelpackungen ist ein sehr altes Problem der angewandten Mathematik. Sie geht unter anderem auf die 1611 formulierte Kugelstapel-Theorie des Astronomen und Mathematikers *Johannes Kepler* (*„Kepler´sche- Vermutung"*) zurück. Dabei beschreibt er, wie man Kugeln schichten muss, damit der Raum optimal genützt werden kann. Über zahlreiche nachfolgende Arbeiten stellte sich ebenfalls heraus, dass die hexagonale Packung aber auch die flächenzentrierte kubische Packung für gleich große Kugeln in einem dreidimensionalen Raum optimale Lösungen darstellen. Dabei wird eine mittlere Dichte von 74,05% (=$\pi/\sqrt{18}$) erreicht. Ein eindeutiger Beweis für die *Kepler´sche Vermutung* konnte allerdings nicht formuliert werden. Erst 2014 gelang es *Hales* computerunterstützt den Beweis zu erbringen. [119]

[117] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.39

[118] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.35-36

[119] Vgl. *George G. Szpiro*, Die Keplersche Vermutung – Wie Mathematiker ein 400 Jahre altes Rätsel lösten, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S.1-10

Für Korngemische, mit Körnern von unterschiedlicher Form und Durchmesser, erweist sich die Ermittlung der optimalen Packung jedoch als weit komplexer. Die Höhe der Packungsdichte wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Beispielsweise wird sie erheblich durch die Kornverteilung der einzelnen Partikel, insbesondere der Feinteile, bestimmt. Dabei hängt der Hohlraumgehalt sehr stark von der Kornverteilung der verwendeten Feinstoffpartikel ab. Im Allgemeinen gilt, je unterschiedlicher die Kornverteilung, desto geringer wird der Hohlraumgehalt der Partikelschüttung. Der Vorteil der Zugabe von hochfeinen, gut dispergierten Bestandteilen liegt neben der erzielbaren höheren Packungsdichte auch daran, dass der Hohlraumgehalt an der Zuschlagrandzone deutlich verringert wird. [120]

3.1 Optimierung der Packungsdichte

Eine hohe Packungsdichte wird erreicht, wenn die Hohlräume zwischen den groben Körnern durch kleinere Partikel aufgefüllt werden, ohne jedoch die groben Teilchen zu verdrängen. Zwischen den kleineren Partikeln entstehen wiederum Hohlräume, die durch noch feinere Teilchen aufgefüllt werden können usw. Dadurch nähert man sich mit zunehmender Anzahl an kleiner werdenden Füllpartikel einem theoretischen Grenzwert einer optimalen Packungsdichte von D = 1,0 an. Voraussetzung dafür ist eine tatsächlich vorhandene Packung, d.h. dass sich alle Partikel an mindestens drei Punkten berühren müssen. Abbildung 3.1 zeigt das beschriebene Prinzip, wobei zur Vereinfachung kugelförmige Partikel angenommen wurden. [121] [122]

[120] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.12 u. 27

[121] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.39

[122] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.35-36

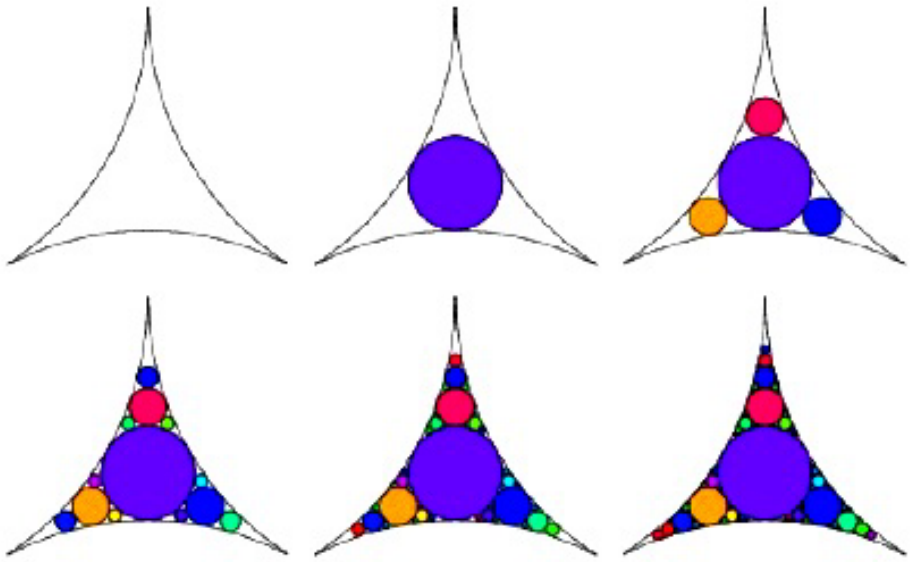


Abbildung 3.1 Schematische Darstellung der optimalen Packungsdichte unter der Annahme kugelförmiger Partikel [123]

Die wesentlichen Vorteile, die durch die Optimierung der Packungsdichte erreicht werden sind, dass durch den geringeren Hohlraumgehalt und der damit verbundenen höheren Gefügedichtigkeit des Zementsteines, die Dauerhaftigkeit und die Druckfestigkeit gesteigert werden können. Eine solche dichte Kornpackung besitzt mehr Stütz- und Reibungsflächen zwischen den einzelnen Teilchen. Die gröberen Körner bilden das Grundtraggerüst (siehe Abbildung 3.2). Die verbleibenden Hohlräume werden durch die Feinstoffe aufgefüllt. Voraussetzung dafür ist eine gute Verdichtung der Kornpackung. [124]

[123] Vgl. *Palm Sebastian*, Optimierung der Raumausfüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen, Dissertation an der Technischen Universität Clausthal, 2009, S.16

[124] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.12 u. 28

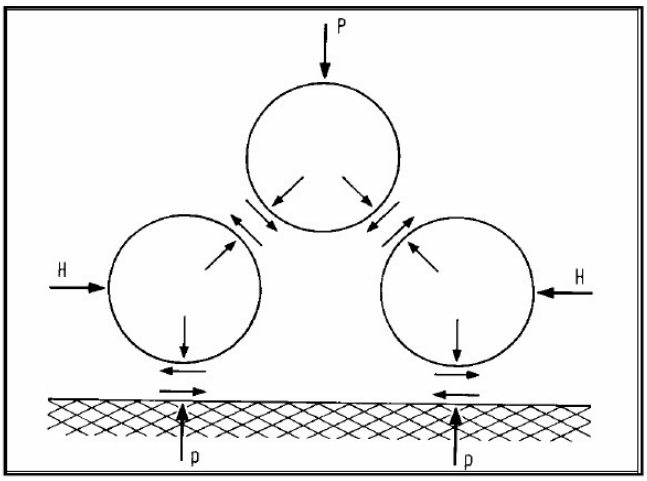


Abbildung 3.2 Tragstruktur und wirkende Kräfte im Korngerüst [125]

Ein weiterer Aspekt der für den Einsatz von feinen Zusatzstoffen spricht ist der sogenannte Wandeffekt. Im Nahbereich einer Behälterwandung oder Schalung, sowie in der Nähe größerer Partikel, verhindern die begrenzenden Flächen eine gleichmäßige Anordnung der Partikel. Dadurch entstehen in diesen Bereichen größere mit Luft oder Wasser gefüllte Poren. Durch Beimengung feiner Partikel können diese Hohlräume aufgefüllt werden und in weiterer Folge spätere Schäden an der Betonoberfläche vermieden werden. Man erhält eine gleichmäßigere Oberflächenstruktur und mit Hilfe entsprechender Maßnahmen sehr gute Sichtbetonqualitäten. [126]

3.1.1 Einfluss der Komponentenanzahl *n*

Der Einfluss der Anzahl an immer feiner werdenden Körnungen auf die Packungsdichte wird in Abbildung 3.3 dargestellt. Dabei wurde in Abhängigkeit der Komponentenzahl *n* die theoretisch höchstmögliche Packungsdichte D_{max}

[125] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.28

[126] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.38

berechnet. Bei den unterschiedlichen Linien handelt es sich um unterschiedliche Ausgangspackungsdichten D_0. [127]

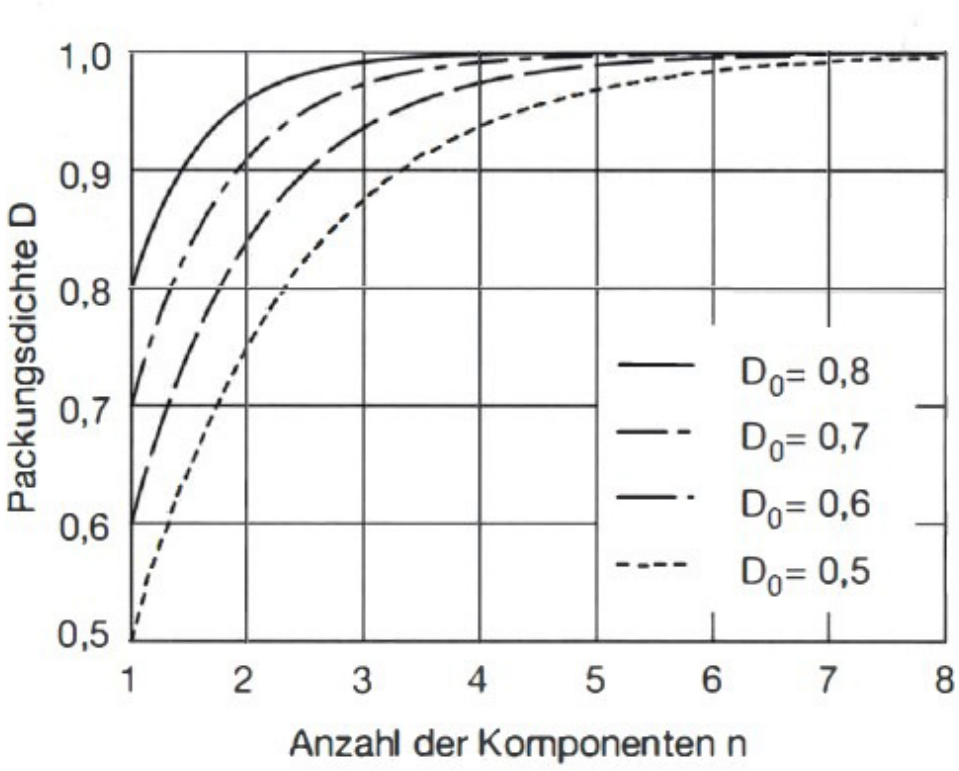


Abbildung 3.3 Abhängigkeit der Anzahl der Komponenten *n* einer Mehrkomponentenmischung auf die Packungsdichte *D* bei unterschiedlichen Ausgangspackungsdichten D_0 [128]

Mathematisch formulieren lässt sich die Packungsdichte in Abhängigkeit der Komponentenanzahl *n* wie folgt:

$$D_{max}(n) = 1 - \left(\frac{\varepsilon_0}{100}\right)^n = 1 - (1 - D_0)^n$$

$D_{max}(n)$ ..... Packungsdichte der Partikelmischung mit n Komponenten

D_0 ..... Packungsdichte der einzelnen Komponenten

ε_0 ..... Hohlraumgehalt der einzelnen Komponenten [Vol.-%]

n ..... Anzahl der Komponenten

[127] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.40

[128] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.40

Dabei wird die Partikelgeometrie außer Acht gelassen und es wird von einer Mischung aus monodispersen Komponenten mit der Eigenpackungsdichte D_0 ausgegangen. Zudem wird angenommen, dass die Partikeln der jeweils kleineren Komponente in die Hohlräume der Größeren hinein passen. [129]

3.1.2 Einfluss der Komponentenmenge S_i

Damit es zu keiner Verdrängung der gröberen Komponente durch die kleineren Partikel kommt, aber trotzdem sämtliche Hohlräume ausgefüllt werden, müssen die einzelnen Komponenten X_i in einer optimalen Menge $S_{i,opt}$ vorliegen. Mit Hilfe des Verhältnisses aus dem Feststoffgehalt der jeweiligen Komponente *i* zum Feststoffgehalt der gesamten Partikelschüttung können diese Mengen berechnet werden. Aufgrund der Proportionalität der Packungsdichte zum Feststoffgehalt kann die Berechnung auch in Abhängigkeit der Packungsdichte durchgeführt werden. [130]

$$S_{i,opt}(n) = \frac{Feststoffgehalt\ der\ Komponente\ i}{Gesamtfeststoffgehalt} = \frac{(1-D_0)^{i-1} * D_0}{D_{max}(n)}$$

$$wobei \quad \sum_{i=1}^{n} S_i = 1$$

$S_{i,opt}(n)$ ..... optimaler Mengenanteil der Komponente *i*

Wobei S_1 den Mengenanteil der gröbsten Komponente darstellt und S_n den der Feinsten. Die nach dieser Formel berechneten Mengenanteile sind in Abbildung 3.4 beispielhaft für ein Achtkomponentensystem dargestellt. Dabei zeigt sich ein linearer Verlauf bei logarithmischer Einteilung der y-Achse. Das heißt der

[129] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.39-40

[130] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.40-41

Anteil der nächst kleineren Füllkomponente muss jeweils exponentiell verringert werden, damit eine optimale Packungsdichte erreicht werden kann. [131]

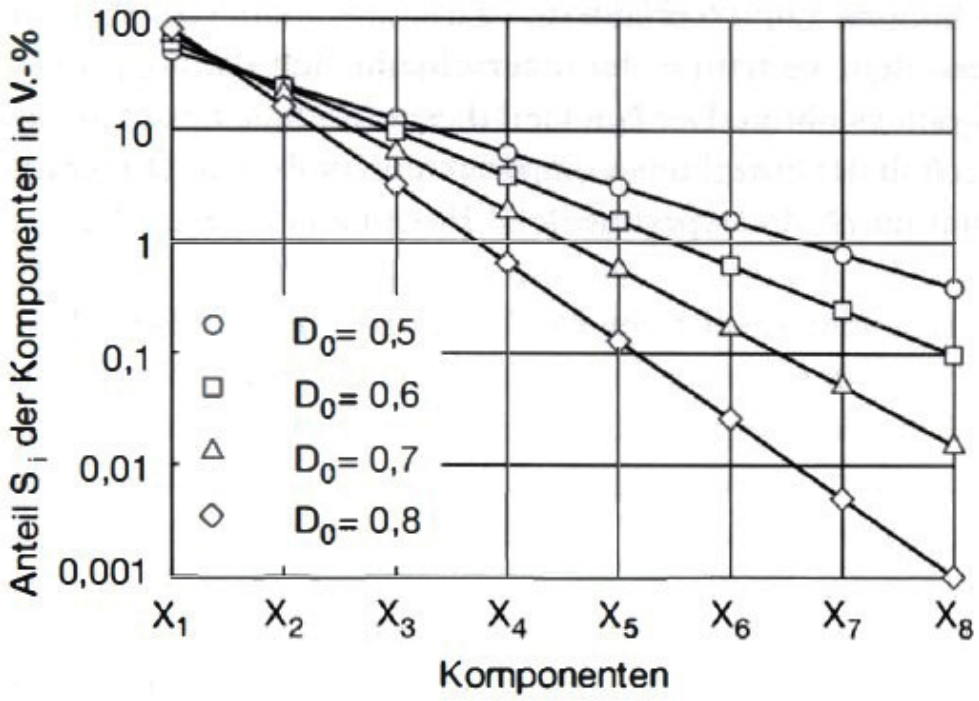


Abbildung 3.4 Optimale Mengenanteile $S_{i,opt}$ der einzelnen Komponenten X_i einer Achtkomponentenmischung bei unterschiedlichen Ausgangspackungsdichten D_0 [132]

3.1.3 Einfluss des Mischungsverhältnisses der einzelnen Komponenten

Zusätzlich spielt, wie in Abbildung 3.5 ersichtlich, auch das Mischungsverhältnis der einzelnen Komponenten eine große Rolle. Der im Bild dargestellte Versuch zeigt zwei Quarzmehle mit unterschiedlicher Feinheit, die miteinander vermischt wurden, um anschließend die Packungsdichte zu bestimmen. Die Ermittlung des mittleren Korndurchmessers ergab für Quarzmehl Q_1 2,9 µm. Das Quarzmehl Q_2 ist mit 42 µm deutlich gröber. Mit 47 % für Q_1 und 48,6 % für Q_2 unterscheiden sich die Packungsdichten der Einzelstoffe nur sehr wenig voneinander. Fügt man beide Stoffe zusammen erhöht sich die Packungsdichte stetig, bis bei einem

[131] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.40-41

[132] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.41

Mischungsverhältnis Q_1:Q_2 von 30:70 der maximale Wert von 54 Vol.-% erreicht wird. [133]

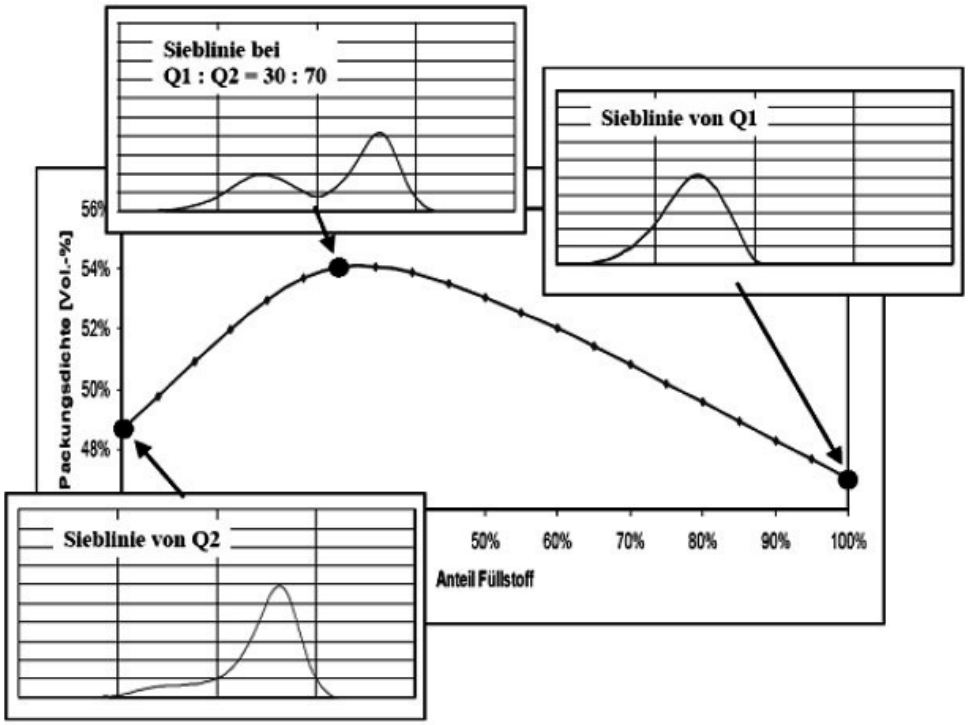


Abbildung 3.5 Packungsdichte eines Korngemisches aus zwei Quarzmehlen in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis der beiden Stoffe [134]

Dieser Versuch macht deutlich, dass durch Beimengung einer gröberen Komponente die Packungsdichte des gesamten Partikelgemisches wesentlich erhöht werden kann. Der Grund dafür liegt, wie schon in Kapitel 2.2.5 Agglomeration beschrieben, an den zwischenpartikulären Kräften, die bei sehr feinen Partikeln eine dichte Zusammenlagerung der Feinstoffpartikel behindern. Bei gröberen Körnern kommt es aufgrund der höheren Gewichtskraft gegenüber den anziehenden Kräften zu keiner Agglomeration, wodurch eine Gefüge verdichtende Wirkung erzielt wird. [135]

[133] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.37

[134] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.37

[135] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.37

3.1.4 Einfluss des Wassergehaltes

Auch der Gesamtwassergehalt hat einen wesentlichen Einfluss auf den Hohlraumgehalt des Betons. Nach der Beimengung des Wassers zum Feinstoffgemisch werden die einzelnen Teilchen mit einem Wasserfilm umhüllt. Je mehr Wasser vorhanden ist, desto dicker kann sich der umhüllende Wasserfilm ausbilden. Als Folge davon kommt es zum Auseinanderdrängen der Partikel wodurch sich die Packungsdichte verringert. Das heißt eine sehr hohe Packungsdichte im trockenen Zustand, kann durch einen zu hohen Wassergehalt zu einer verminderten Packungsdichte im Frisch- bzw. Festbeton führen.

Bei optimalem Wassergehalt hingegen, führt der Einsatz von Feinstoffen zu einer gefügeverdichtenden Wirkung. Durch die größere Feinkornoberfläche wird der Wasserfilm rund um die einzelnen Partikel dünner. Die Hydratationsprodukte müssen einen geringeren Abstand überbrücken, wodurch sich ein dichteres Gefüge im Festbeton ausbildet. *Reschke* weist jedoch darauf hin, dass eine zu dichte Lagerung der Partikel aus Gründen der Verarbeitbarkeit auch nachteilig sein kann. Zudem benötigen die Hydratationsprodukte ausreichend Raum damit eine vollständige Hydratation ablaufen kann. [136]

3.2 Mathematische Modelle zur Optimierung der Packungsdichte

Wie schon in Kapitel 2.2 erwähnt beruht die übliche Mischungsberechnung für Normalbetone auf dem zweidimensionalen Kreisscheibenmodell von *Fuller und Thompson*. Dadurch kann die Korngrößenverteilung für Gesteinskörner größer 0,125 mm relativ einfach und für den normalen Gebrauch ausreichend gut dargestellt werden. Der Nachteil dieses Modells ist, dass die Kornform und die Granulometrie der Feinstoffe mit einem Korndurchmesser kleiner 0,125 mm, sowie deren Agglomerationsneigung nicht berücksichtigt werden können. Eine nicht exakt kugelförmige und raue Oberfläche führt dazu, dass feinere Partikel nicht

[136] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.13-14 u. 27

mehr in die Zwischenräume der groben Partikel eindringen können, wodurch diese auseinander gedrängt werden. Dieser Effekt wird als Teilchenbehinderung bezeichnet. Bei der Berechnung nach *Fuller und Thompsen* wird dieser Faktor nicht berücksichtigt. Für eine Optimierung der Packungsdichte im Feinteilbereich ist der genannte Ansatz demnach nicht geeignet. Ein weitaus besser geeignetes Verfahren, dass die oben beschriebenen Anforderungen erfüllt, bildet das Modell von *Schwanda* [137] [138]. Auch *Larrard* und *Stroeven* haben derartige mathematische Verfahren entwickelt, auf die in weiterer Folge nicht näher eingegangen wird. [139] [140]

Mittlerweile werden auch computerunterstützte Verfahren verwendet, um die dichteste Lagerung von kugelförmigen Partikeln zu simulieren. *Stroeven* und *Stroeven* entwickelten ein Computerprogramm zur Berechnung einer dichten und zufallsgestreuten Packung von Kugeln. Weitere Untersuchungen gehen sogar soweit, anstelle der vereinfachten Darstellung der Partikel als Kugel, die tatsächliche Kornform der Teilchen computerunterstützt mathematisch nachzubilden und damit die dichteste Packung zu simulieren. Dafür werden dreidimensionale Abbilder der einzelnen Partikeln mittels Computertomographie und Mikrocomputertomographie erstellt, um die Kornform möglichst exakt zu ermitteln. Der Nachteil derartiger Verfahren ist jedoch die enorme Rechenleistung, die zum verarbeiten der Daten benötigt wird. [141]

In dieser Arbeit wurde zur Berechnung und Optimierung der Packungsdichte das Modell von *Schwanda* gewählt und wird dementsprechend in den folgenden Kapiteln genauer erläutert.

[137] Vgl. *Schwanda Fritz*, Der Hohlraumgehalt von Korngemischen, beton 9 Heft 1/1959, S.12-17

[138] Vgl. *Schwanda Fritz*, Der Hohlraumgehalt von Korngemischen – Ein Vergleich rechnerisch gewonnener Werte mit versuchsmäßig ermittelten, beton 9 Heft 12/1959, S.427-431

[139] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.27-28

[140] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.41

[141] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.40-41

3.2.1 Packungsdichteberechnung nach dem Modell von *Schwanda*

Das Rechenmodell von *Schwanda* erlaubt die Berechnung des Hohlraumgehaltes sowohl für stetig als auch für unstetig verteilte Korngemische, wobei die Art des Kornes bekannt sein muss. Zudem muss die Kornverteilung gegeben sein. Sie kann im Feinstkornbereich beispielsweise mit Hilfe der Lasergranulometrie ermittelt werden. Die Einflüsse der Kornform und der Oberflächenrauigkeit werden durch den Hohlraumgehalt des Einkornstapels *k* und durch die Reichweite der Teilchenbehinderung *w* bestimmt. Der Grundgedanke des Modells von *Schwanda* beruht auf den Beziehungen die aus Korngemischen mit nur zwei unterschiedlichen Korngruppen erhalten werden können. Daraus lässt sich ein Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes von beliebig vielen Korngruppen ableiten. Man erhält eine mathematische Methode zur Berechnung der optimalen Kornzusammensetzung zur Erzielung des geringsten Hohlraumgehaltes für beliebige Korngruppen. Das Modell ist sowohl für Feinstoffe und Zuschläge, aber auch für Feinstoffgemische und Feinstoff-Zuschlagstoff-Gemische geeignet. [142] [143]

3.2.1.1 Ermittlung des Hohlraumgehaltes

Für die Bestimmung des Hohlraumgehaltes nach *Schwanda* werden einige Parameter benötigt, die zum Verständnis nachfolgend kurz erläutert werden.

Der Gesamtraum *V* einer Ansammlung von Körnern im eingerütteltem Zustand setzt sich aus dem Festraum *S* und dem Hohlraum *H* zusammen. Es gilt:

$$V = H + S \quad bzw. \quad V = K + S$$

V ..... Gesamtraum einer Ansammlung von Körnern

S, *s* ..... Festraum einer Ansammlung von Körnern

[142] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.42

[143] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.28

H, *h* ..... Hohlraumgehalt eines Korngemisches im eingerütteltem Zustand

K, *k* ..... Hohlraumgehalt eines Einkornstapels

Wobei die Großbuchstaben *V*, *S*, *H*, *K* für den Rauminhalt als Maßeinheit stehen und die Kleinbuchstaben *s*, *h*, *k* das Verhältnis im Vergleich zum Festraum aller vorhandenen Körner darstellen.

$$s = \frac{S}{\sum S} \quad ; \quad h = \frac{H}{\sum S} \quad ; \quad k = \frac{K}{\sum S}$$

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen einem Grundkorn und einem Beikorn. Dabei hat das Beikorn die Aufgabe die Hohlräume der Grundkornpackung auszufüllen. Je nach Verhältnis von Grundkorn zu Beikorn können zwei Extremfälle betrachtet werden. [144]

Bei Fall 1 ist das vorhandene Volumen der feineren Beikörner geringer oder maximal gleich dem Hohlraumvolumen der Grundpackung. Die Beikörner können vollständig in die Zwischenräume der Grundkornpackung schlupfen, wodurch der Hohlraumanteil verringert wird aber das Gesamtvolumen der Mischung gleich bleibt. Die gröbere Komponente wird als Grundkorn bezeichnet. In Abbildung 3.6 wird dieser Fall nochmals veranschaulicht.

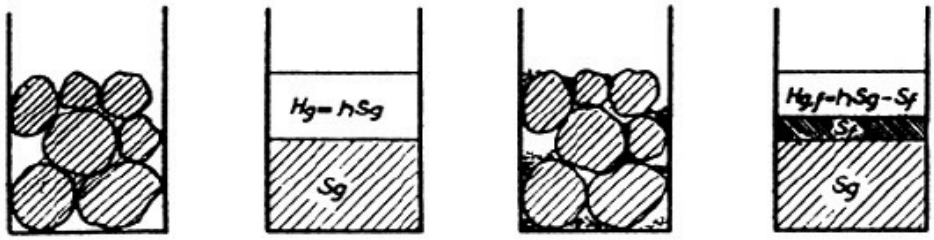


Abbildung 3.6 Fall 1: Grobes Grundkorn + feines Beikorn mit einem Volumenanteil ≤ dem vorhanden Hohlraumanteil aus der Grundkornpackung [145] [146]

[144] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.29

[145] Vgl. *Schwanda Fritz*, Der Hohlraumgehalt von Korngemischen, beton 9 Heft 1/1959, S.13

[146] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.29

Daraus lässt sich folgende Gleichung ableiten:

$$h_{Fall\ 1} = \frac{Hohlraum_{grob} - Festraum_{fein}}{Festraum_{grob+fein}} = \frac{H_g - S_f}{S_g + S_f} = h_{g,f}$$

$$h_{g,f} = h_g - (h_g + 1) * S_f = k_g - (k_g + 1) * S_f$$

Diese Gleichung gilt solange, bis das Beikorn sämtliche Hohlräume zwischen den groben Körnern ausgefüllt hat. Darüber hinaus werden die gröberen Körner durch die feineren Partikel verdrängt und es gilt ein anderer Zusammenhang der im folgendem betrachtet wird. [147] [148]

Fall 2 beschreibt den Zustand, bei dem der Anteil der feinen Partikel größer als der Hohlraumanteil zufolge des groben Kornes ist. Die groben Körner werden von den Feineren verdrängt, wodurch sich das Gesamtvolumen erhöht. Der Hohlraumgehalt der Gesamtmischung entspricht dann genau dem Hohlraumgehalt der feineren Partikel. In diesem Fall wird die feinere Komponente als Grundkorn bezeichnet. Abbildung 3.7 veranschaulicht diesen Umstand.

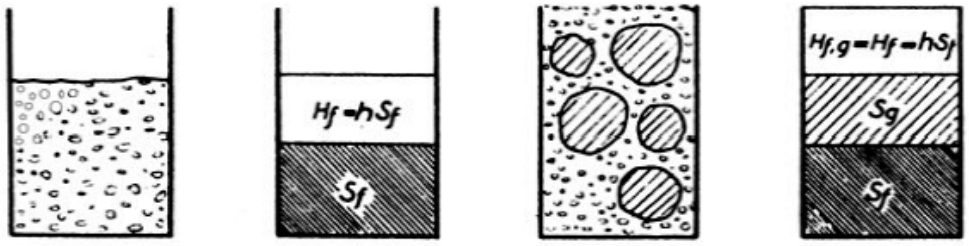


Abbildung 3.7 Fall 2: Feines Grundkorn + grobes Beikorn; Volumenanteil der feinen Partikel > dem Hohlraumanteil des groben Beikorns [149] [150]

[147] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.29-30

[148] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.43

[149] Vgl. *Schwanda Fritz*, Der Hohlraumgehalt von Korngemischen, beton 9 Heft 1/1959, S.13

[150] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.30

Dieser Zustand kann durch folgende Gleichung beschrieben:

$$h_{Fall\ 2} = \frac{Hohlraum_{fein}}{Festraum_{grob+fein}} = \frac{H_f}{S_g + S_f} = h_{f,g}$$

$$h_{f,g} = h_f - h_f * S_f = k_f - k_f * S_g$$

Mit diesen beiden Gleichungen kann der Hohlraumgehalt von Korngemischen, die aus zwei verschiedenen Körnungen bestehen, berechnet werden. Wobei diejenige Formel, die den größeren Wert für *h* ergibt, als die gültige für den jeweiligen Fall betrachtet werden kann. Das Mischungsverhältnis S_g zu S_f mit dem geringst möglichem Hohlraumgehalt wird erreicht, wenn beide Gleichungen den gleichen Wert ergeben. [151] [152]

3.2.1.2 Einfluss der Teilchenbehinderung

In den vorhergegangenen Modellansätzen wurde davon ausgegangen, dass der Durchmesser der groben Körner sehr viel größer als jener der feinen Körner ist. Wird der Unterschied zwischen den beiden Korndurchmesser gering, so kann davon ausgegangen werden, dass die feineren Partikel nicht mehr ohne weiteres in die Zwischenräume der groben Körner schlupfen können. Das Grundkorngerüst wird teilweise auseinandergedrängt. Eine Volumenvergrößerung und somit eine Erhöhung des Hohlraumanteils ist die Folge. Das heißt es gibt zwischen den beiden oben genannten Extremfällen (Fall 1 und Fall 2) einen Übergangsbereich, in dem sich die Körner gegenseitig behindern (= Fall 3).

Mit Hilfe eines Faktors *a* kann der hohlraumvermindernde Einfluss des Beikorns gesteuert werden. Dieser Faktor stellt eine Funktion in Abhängigkeit von der Form und der Oberflächenbeschaffenheit der Körner, sowie vom Verhältnis der beiden Durchmesser der groben und feinen Teilchen dar. Falls das Grundkorn und das Beikorn denselben Durchmesser aufweisen, wird *a=0*. Der Bereich, bei dem sich

[151] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.30-31

[152] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.43-44

die Teilchenbehinderung aufgrund der Größenverhältnisse von Grund- und Beikorn bemerkbar macht, wird als Reichweite der Teilchenbehinderung *w* bezeichnet. Sie hängt vom Verhältnis der Grundkorngröße x_s zu einer Grenzkorngröße x_w ab. Wobei x_w jene Korngröße ist, bei der es zu keiner Teilchenbehinderung mehr kommt. Mit Hilfe der Reichweite der Teilchenbehinderung *w* werden demnach die Auswirkungen der Kornform und der Größenverhältnisse von Grund- und Beikorn berücksichtigt. Zudem stellt sie einen Faktor zur Berechnung der möglichen Vergrößerung des Gesamtvolumens der Partikelmischung dar. Für das Modell von *Schwanda* werden demnach neben der Korngrößenverteilung zwei zusätzliche Parameter zur Berücksichtigung der Kornform, der Oberflächenrauhigkeit und der Teilchenbehinderung benötigt. [153] [154]

Der Parameter k_0 gibt den Hohlraumanteil der Einkornschüttung an. Er berechnet sich noch folgender Formel: [155]

$$k_0 = \frac{\varepsilon}{D * 100} = \frac{\varepsilon}{100 - \varepsilon}$$

k_0 ..... Hohlraumanteil der Einkornschüttung

ε ..... Hohlraumgehalt [Vol.-%]

D ..... Packungsdichte

Den zweiten wichtigen Parameter bildet die Reichweite der Teilchenbehinderung w_0, die mit Hilfe der folgenden Formel als logarithmisches Verhältnis von Grundkorngröße zu Grenzkorngröße berechnet werden kann: [156]

$$w = \log\left(\frac{x_s}{x_w}\right)$$

w ..... Reichweite der Teilchenbehinderung

[153] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.31

[154] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.44

[155] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.43

[156] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.44

x_s ..... Grundkorngröße

x_w ..... Grenzkorngröße

Beide Parameter k_0 und w_0 können durch einfache Versuche bestimmt werden. Aus diesen Überlegungen heraus, kann der Hohlraumgehalt eines beliebigen Korngemisches mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden. Eine anschauliche Darstellung der mathematischen Zusammenhänge zwischen k, w, dem Korngrößenverhältnis von Grundkorn x_s zum Beikorn x_i und dem Faktor $a_{s,i}$ zeigt Abbildung 3.8. Wobei in diesem Fall k_0 mit 0,6 angenommen wurde. [157]

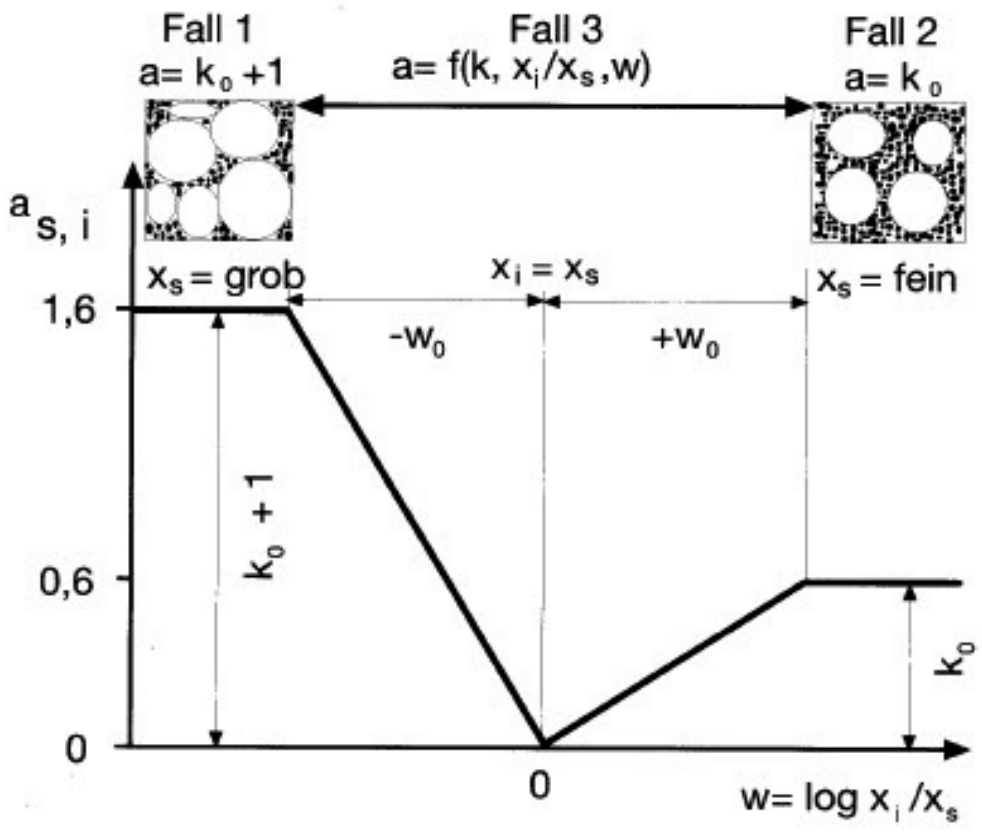


Abbildung 3.8 Diagramm der Funktion $a_{s,i}$ des Hohlraumgehaltes der Einkornschüttung k_0 und der Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 [158]

[157] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.53

[158] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.44

Auf Grundlage der Zusammenhänge aus Abbildung 3.8 kann nun der Hohlraumgehalt der jeweiligen Grundkornklassen h_s ermittelt werden. Dazu werden die einzelnen Festraumanteile des Beikorns jeder einzelnen Kornklasse s_i mit dem jeweiligen Faktor $a_{s,i}$ zur Berücksichtigung der Teilchenbehinderung multipliziert und anschließend vom Hohlraumanteil des Grundkorns k_0 abgezogen. [159] [160]

$$h_s = k_0 - \sum_{i=1}^{n} a_{s,i} * s_i$$

h_s ..... Hohlraumanteil der Grundkornklasse

k_0 ..... Hohlraumanteil der Einkornschüttung

$a_{s,i}$ ..... Faktor *a* zur Berücksichtigung der Teilchenbehinderung der jeweiligen Kornklasse *i*

s_i ..... Festraumanteil der Kornklasse *i* am Gesamtfestraum

n ..... Anzahl der Kornklassen

Für *n* Kornklassen wird diese Berechnung *n-mal* durchgeführt. Damit wird sichergestellt, dass jede Kornklasse einmal als Grundkorn x_s zum Einsatz kommt. Einen Einblick in das Rechenschema gibt Tabelle 3.1. In diesem Fall wurde k_0 mit 0,6 und w_0 mit 0,9 angenommen. [161]

[159] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.45

[160] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.33

[161] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.45

Tabelle 3.1 Beispielhafte Berechnung des Hohlraumanteils $h_{s,max}$ bei gewähltem $k_0 = 0,6$ und $w_0 = 0,9$ [162]

Kornklasse i	Korngröße x in mm	Festraumanteil s_i	Teilchenbehinderung (siehe Bild 5.3) Faktor $a_{s,i}$	Grundkorn 1 $a_{1,i} \cdot s_i$	Grundkorn 2 $a_{2,i} \cdot s_i$	Grundkorn 3 $a_{3,i} \cdot s_i$	Grundkorn 4 $a_{4,i} \cdot s_i$	Grundkorn 5 $a_{5,i} \cdot s_i$
			1,60					
			1,07					
			0,53					
1	0,25	0,10	0	0	0,05	0,11	0,16	0,16
2	0,50	0,20	0,20	0,04	0	0,11	0,21	0,32
3	1,00	0,20	0,40	0,08	0,04	0	0,11	0,21
4	2,00	0,20	0,60	0,12	0,08	0,04	0	0,11
5	4,00	0,30	0,60	0,18	0,18	0,12	0,06	0
		1,00	$\Sigma a_{s,i} \cdot s_i$	0,42	0,35	0,38	0,54	0,80
$h_s = k - \Sigma a_{s,i} \cdot s_i$				0,18	**0,25**	0,22	0,06	-0,20

Maßgebend für die Berechnung der Packungsdichte *D* ist schließlich jene Kornklasse die den größten Hohlraumanteil des Grundkorns $h_{s,max}$ liefert. Im oben angeführten Beispiel wäre das die Kornklasse 2 mit $h_{s,max} = 0,25$. Alle weiteren berechneten Hohlraumanteile gelten für Gemische, bei denen sich die von den Korngruppen eingenommenen Räume überschneiden. Mit Hilfe der nachfolgend angeführten Formel kann die Packungsdichte berechnet werden. [163] [164]

$$D = \frac{1}{1 + h_{s,max}} \quad \rightarrow \quad D = \frac{1}{1 + 0,25} = 0,80$$

D ..... Packungsdichte

$h_{s,max}$ ..... maximaler Hohlraumanteil

Demnach kann die Packungsdichte mit dem Modell von *Schwanda* durch relativ einfache und nachvollziehbare Rechenschritte berechnet werden. Der Vorteil ist, dass die Berechnung mit Hilfe von üblichen Tabellenkalkulationsprogrammen

[162] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.45

[163] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.45

[164] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.33

erfolgen kann. Ein Nachteil ist, dass die Parameter *k* und *w* bei der Berechnung für alle Kornklassen konstant bleiben. Das heißt die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Kornfraktionen eines Partikelgemisches kann nicht berücksichtigt werden, wodurch mit einem gewissen Fehler gegenüber einer wirklichkeitsnahen Partikelsimulation zu rechnen ist. Jedoch benötigt eine solche Partikelsimulation eine erhebliche Rechenleistung wodurch dem Modell von *Schwanda* für sehr viele Anwendungen der Vorzug zu geben ist. [165] [166]

[165] Vgl. *Teichmann Thomas*, Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12 Universität Kassel 2008, S.34

[166] Vgl. *Stangl Albert*, Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton, Diplomarbeit an der TU-Wien, März 2011, S.54

4 Entwicklung eines EDV-Programmes zur Optimierung der Packungsdichte

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, ein für den Anwender möglichst einfaches, aber dennoch für beliebige Stoffe und Stoffgemische anwendbares Rechenprogramm zur Ermittlung der Packungsdichte nach dem Modell von *Schwanda* zu entwickeln. Die Packungsdichte soll dabei möglichst exakt und rasch abgeschätzt werden können, um schließlich Rückschlüsse auf eine optimale Zusammensetzung des Betons ziehen zu können.

Das Programm soll die Möglichkeit bieten, die Packungsdichte eines einzelnen Stoffes, sowie jene eines Stoffgemisches mit bekannter anteilsmäßiger Zusammensetzung zu berechnen. Zusätzlich soll die Möglichkeit der Ermittlung einer optimalen Mengenkombination beliebig vieler und unterschiedlicher Stoffe bestehen. Als Ergebnis sollen die prozentuell erforderlichen Mengen der einzelnen zu verwendenden Stoffe und die dadurch erreichbare maximale Packungsdichte ersichtlich werden.

Zur Realisierung dieser Anforderungen wird ein komplexes Excel-Programm entwickelt. Um die iterative Berechnung der maximalen Packungsdichte durchführen zu können, ist es notwendig, die einzelnen Rechenschritte mit Hilfe einer VBA-Programmierung durchzuführen. Mit Hilfe dieser Programmiersprache soll schließlich eine durchwegs automatisierte Berechnung ermöglicht werden, die allen oben genannten Anforderungen genügt.

Im Folgenden werden die Bedienung des Programmes und die im Hintergrund ablaufenden Rechenschritte anhand eines Beispiels erklärt.

4.1 Eingabemaske

Durch Öffnen der xlsm-Datei „*PD-Optimierung*“ gelangt man zum Tabellenblatt *Eingabe* (Abbildung 4.1), in dem zunächst alle zur Berechnung erforderlichen Daten einzugeben sind.

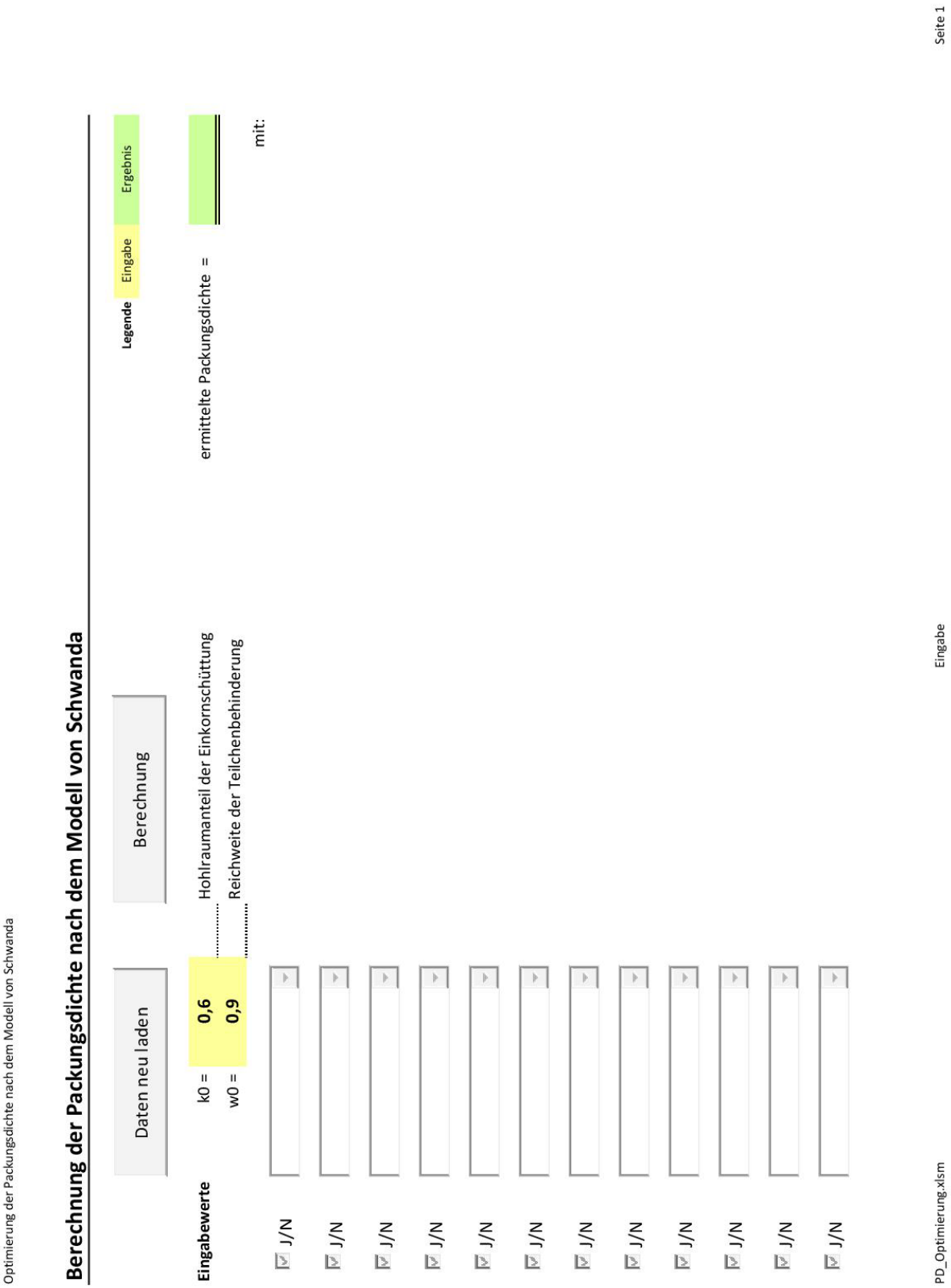


Abbildung 4.1 Übersicht des Tabellenblattes *Eingabe* aus dem entwickelten Excel-Programm „*PD-Optimierung*“

4.1.1 Schritt 1: Daten neu laden

Um eine Berechnung starten zu können ist zunächst der Button *„Daten neu laden“* (siehe Abbildung 4.2) zu drücken. Dadurch werden sämtliche zur Berechnung erforderlichen Hintergrunddateien in das Programm geladen. Ist bereits eine Berechnung voran gegangen, werden zusätzlich alle bereits erzeugten Tabellenblätter gelöscht und die Eingabemaske auf den Urzustand zurück gesetzt.

Abbildung 4.2 Schritt 1: Button *„Daten neu laden“* drücken

4.1.2 Schritt 2: Eingabe der Berechnungsparameter k_0 und w_0

Der Hohlraumanteil der Einkornschüttung k_0 und die Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 haben einen wesentlichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis (siehe auch Kap. 3.2). Dementsprechend sind diese Werte „sinnvoll“ zu wählen und in die hierfür vorgesehenen Zellen zu schreiben (siehe Abbildung 4.3). Für diverse Stoffe können die beiden Werte beim Hersteller erfragt werden. Andernfalls sind sie durch Vorversuche zu ermitteln. Dabei gilt es zu beachten, dass das Programm von fixen Werten ausgeht. Das heißt auch bei einer durch das Programm möglichen automatischen Anpassung der Mengenanteile der gewählten Stoffe, werden die Werte nicht entsprechend angepasst. Eventuell müssen sie in einer zweiten Berechnung nochmals sinnvoll korrigiert werden. Als Standardwerte sind für den Hohlraumanteil der Einkornschüttung $k_0 = 0,6$ und für die Reichweite der Teilchenbehinderung $w_0 = 0,9$ voreingestellt.

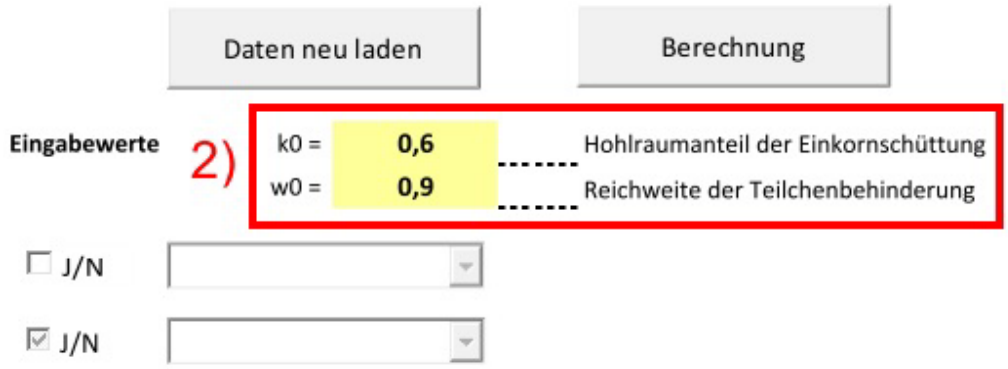


Abbildung 4.3 Schritt 2: Eingabe von k_0 und w_0

4.1.3 Schritt 3: Auswahl der Stoffanzahl für die Kombination

Durch die Kontrollkästchen, die mit *Ja/Nein* (siehe Abbildung 4.4) gekennzeichnet sind, kann eine beliebige Anzahl von Stoffen ausgewählt werden. Für das gegenwärtige Programm wurde jedoch eine Obergrenze der maximal zu kombinierenden Stoffe von zwölf gewählt. Werden dennoch mehr Stoffe benötigt, kann das durch einen versierten Benutzer leicht im Quelltext des Programmes hinzugefügt werden.

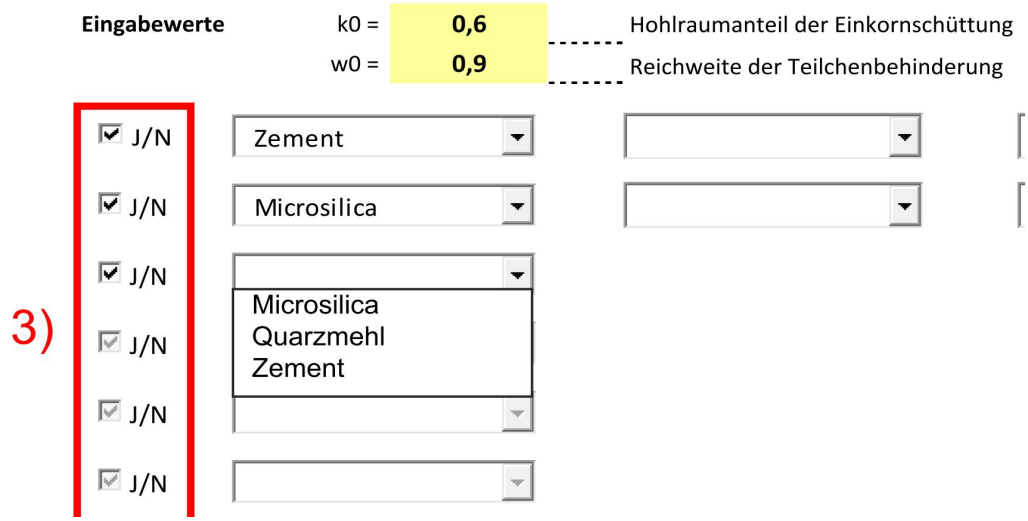


Abbildung 4.4 Schritt 3: Kontrollkästchen zur Auswahl der Anzahl der zu kombinierenden Stoffe

4.1.4 Schritt 4: Auswahl der Stoffgruppen

Durch setzten des Häkchens im Kontrollkästchen wird das daneben liegende Dropdown-Menü aktiviert. Hier können einzelne Stoffgruppen in Form von Obergruppen ausgewählt werden.

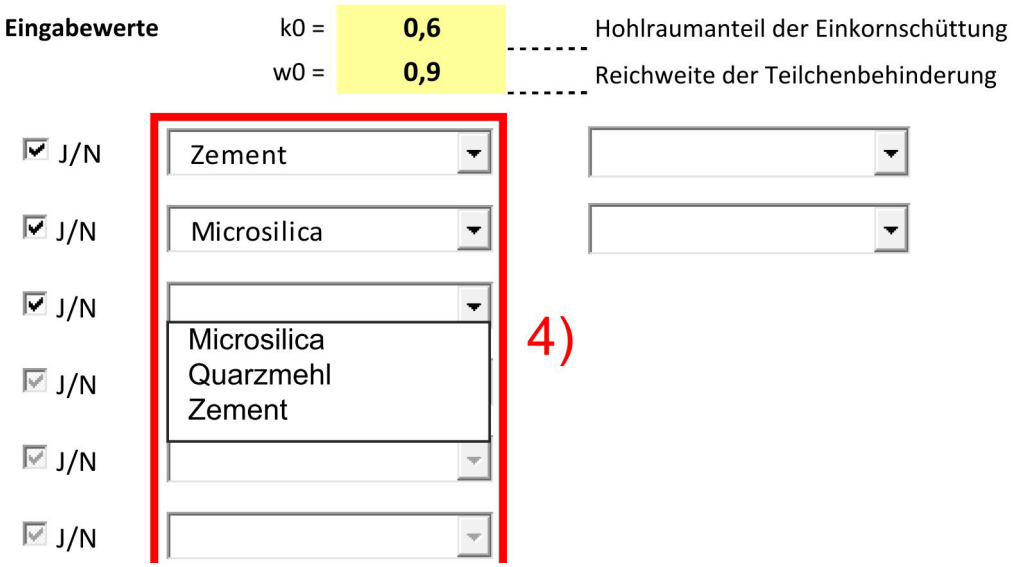


Abbildung 4.5 Schritt 4: Auswahl der Stoffgruppe

Das Programm greift dabei auf die angelegte Ordnerstruktur zu. Das heißt jeder Unterordner im Windows Explorer, der sich im selben Ordner wie die Berechnungsdatei befindet wird im Dropdown-Menü angezeigt. Im gegenständlichen Fall (siehe Abbildung 4.5), sind das die Stoffgruppen Microsilica, Quarzmehl und Zement. Das Dropdown-Menü der Excel-Tabelle zeigt dieselben Obergruppen, die auch als einzelne Ordner im Windows Explorer zu sehen sind (siehe Abbildung 4.6).

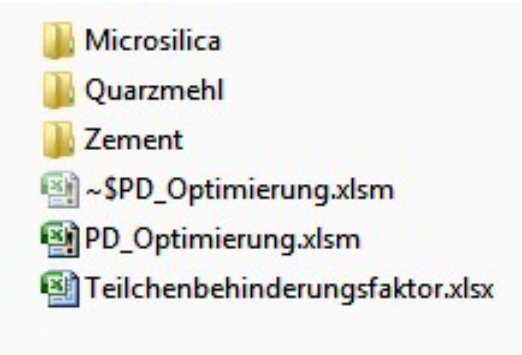


Abbildung 4.6 Ordnerstruktur im Windows Explorer

Der Vorteil dabei ist, dass eine Erweiterung der zur Auswahl stehenden Stoffe sehr leicht und unkompliziert möglich ist. Es muss keine externe Datenbank geführt werden. Durch hinzufügen eines neuen Unterordners und der Funktion *„Daten neu laden“* im Programm kann sofort damit gearbeitet werden. Allerdings ist auf eine saubere Ordnerstruktur zu achten.

4.1.5 Schritt 5: Auswahl der gewünschten Stoffe

Durch die Auswahl einer Stoffgruppe erscheinen sofort vier neue Dropdown-Menüs. Die rechte Auswahlliste dient zur Wahl des gewünschten Stoffes (siehe Abbildung 4.7). Hier greift das Programm ebenfalls auf die Ordnerstruktur im Windows Explorer zu. Es werden alle Dateien die sich im Ordner des zuvor gewählten Stoffes befinden mit deren Namen angezeigt. Auch hier können neue Stoffe leicht durch einfaches Hinzufügen einer Datei in den entsprechenden Ordner in das Programm integriert werden. Allerdings können nur Excel-Dateien verarbeitet werden in denen die Stoffdaten in einer bestimmten Form aufgelistet sind. In Kapitel 4.2.1 wird dieser Umstand genauer erklärt.

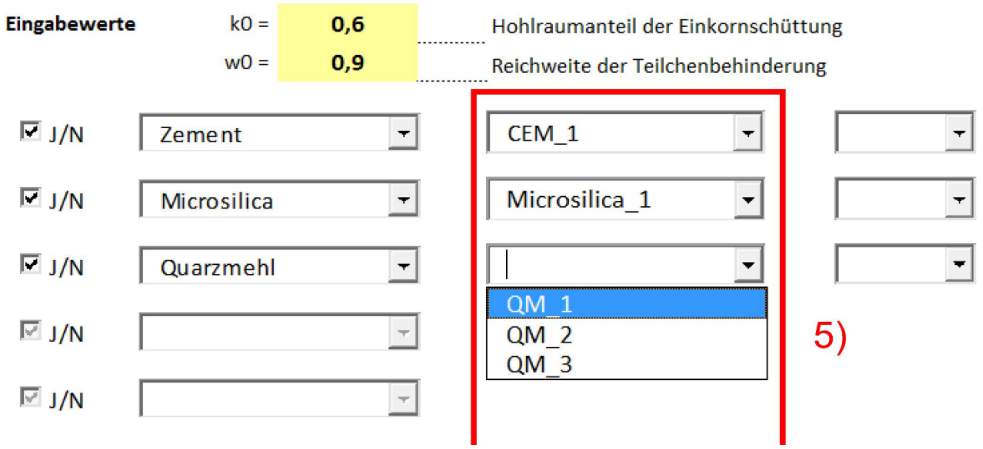


Abbildung 4.7 Schritt 5: Auswahl der gewünschten Stoffe

Abbildung 4.7 zeigt folgende ausgewählte Stoffe:

- Stoff 1 ist aus der Stoffgruppe Zement mit dem Namen *CEM_1*
- Stoff 2 ist aus der Stoffgruppe Microsilica mit dem Namen *Microsilica_1*
- Stoff 3 ist aus der Stoffgruppe Quarzmehl mit dem Namen *QM_1*.

4.1.6 Schritt 6: Begrenzung der Mengenanteile

Da das Programm bei der Berechnung sämtliche Kombinationsmöglichkeiten der ausgewählten Stoffe bestimmt, ist es erforderlich, die zu berechnenden Mengenanteile zu beschränken. Eine komplette Analyse mit allen Kombinationen ist zwar grundsätzlich möglich, erfordert allerdings bei einer großen Anzahl unterschiedlicher Stoffe eine enorme Rechenzeit. Demnach ist es sinnvoll gewisse Unter- und Obergrenzen der Mengenanteile für die einzelnen ausgewählten Stoffe einzuführen. Mit Hilfe des in Abbildung 4.8 markierten Dropdown-Menüs können diese Grenzen sinnvoll gewählt werden.

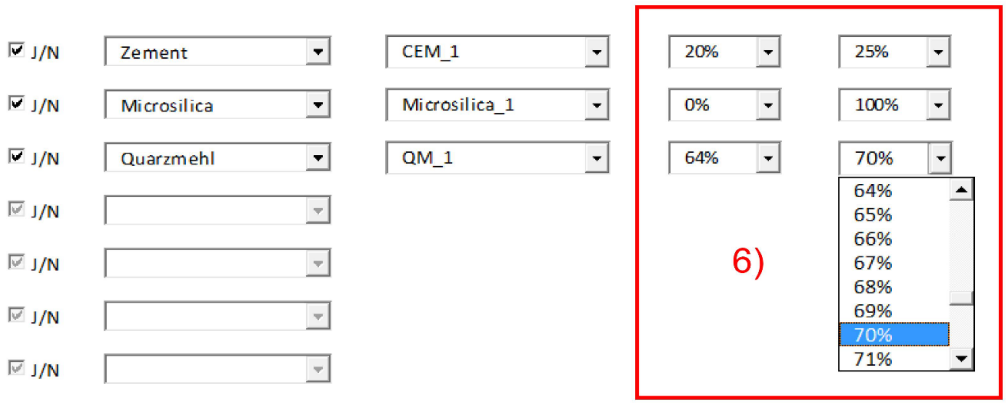


Abbildung 4.8 Schritt 6: Festlegung der Unter- und Obergrenzen für die einzelnen Stoffe

4.1.7 Schritt 7: Auswahl der Schrittweite der Mengenanteile

Zusätzlich zu den Unter- und Obergrenzen kann im ganz rechten Dropdown-Menü die Schrittweite für die Kombinationsmöglichkeiten gewählt werden (siehe Abbildung 4.9). Eine Schrittweite von Eins bedeutet, dass jede ganzzahlige Zahl innerhalb der gewählten Grenzen zur Verfügung steht. Bei einer Schrittweite von Zwei wird hingegen nur jeder zweite Wert herangezogen. D.h. bei einer Untergrenze von 64% und einer Schrittweite von Zwei sind folgende Werte möglich: 64, 66, 68, usw. Durch diese Funktion kann ebenfalls die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten verringert werden, wodurch die Berechnungszeit wesentlich reduziert werden kann.

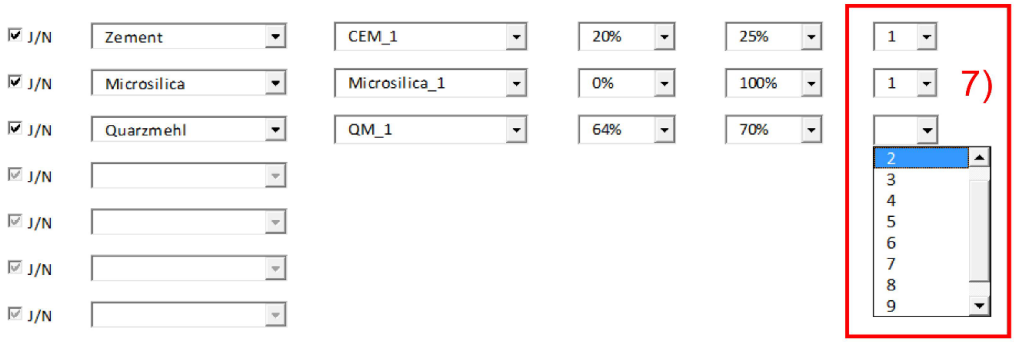


Abbildung 4.9 Schritt 7: Festlegung der Schrittweite für die einzelnen Stoffe

Mit Schritt 7 ist die Eingabe grundsätzlich abgeschlossen und die Berechnung kann gestartet werden.

4.1.8 Starten der Berechnung

Das Starten der Berechnung erfolgt, nach Eingabe der erforderlichen Eingabewerte, einfach durch drücken des Buttons mit der Aufschrift „Berechnung“ (siehe Abbildung 4.10).

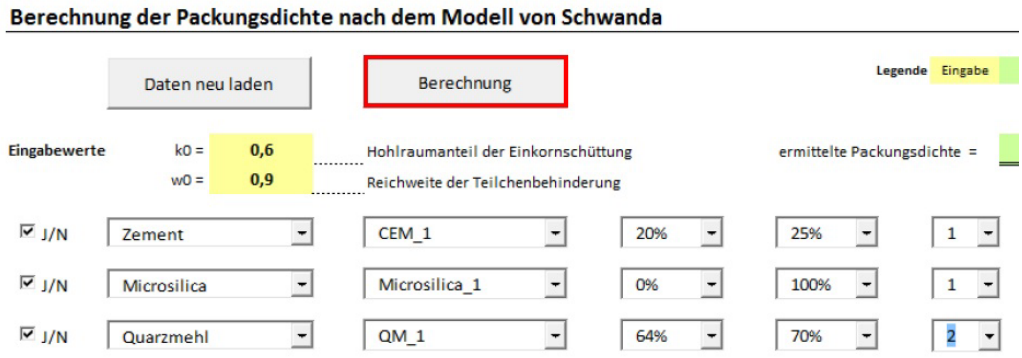


Abbildung 4.10 Starten der Berechnung durch drücken des Berechnungs-Buttons

Wurden sämtliche Unter- und Obergrenzen korrekt eingegeben erscheint die in Abbildung 4.11 gezeigte Meldung. Hier besteht die letzte Möglichkeit noch Änderung bei der Eingabe vorzunehmen. Durch Abbrechen gelangt man wieder zur Eingabemaske zurück. Durch drücken auf den OK-Button wird die Berechnung gestartet.

Abbildung 4.11 Abfrage ob die Berechnung gestartet werden soll

Während der Eingabe kann es zu Fehlern kommen die im folgenden Kapitel 4.1.9 Mögliche Eingabefehler erläutert werden.

4.1.9 Mögliche Eingabefehler

Bei der Eingabe ist darauf zu achten, dass die Summe der gewählten Obergrenzen mindestens den Wert 100 % ergibt. Sonst erscheint beim Versuch die Berechnung zu starten die in Abbildung 4.12 gezeigte Fehlermeldung und es kann keine Berechnung durchgeführt werden.

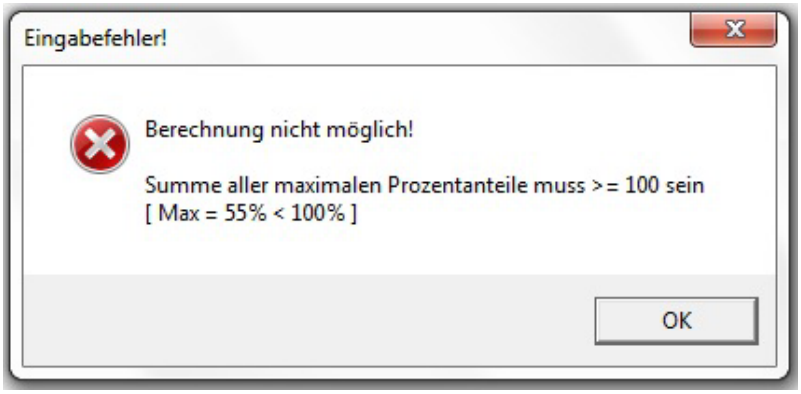


Abbildung 4.12 Eingabefehler: Summe der max. Prozentanteile muss >= 100 % sein

Zusätzlich darf die Summe der gewählten Untergrenzen maximal gleich den Wert 100 % erreichen. Werden zu hohe Werte eingegeben erscheint ebenfalls eine Fehlermeldung (siehe Abbildung 4.13) und die Berechnung wird abgebrochen.

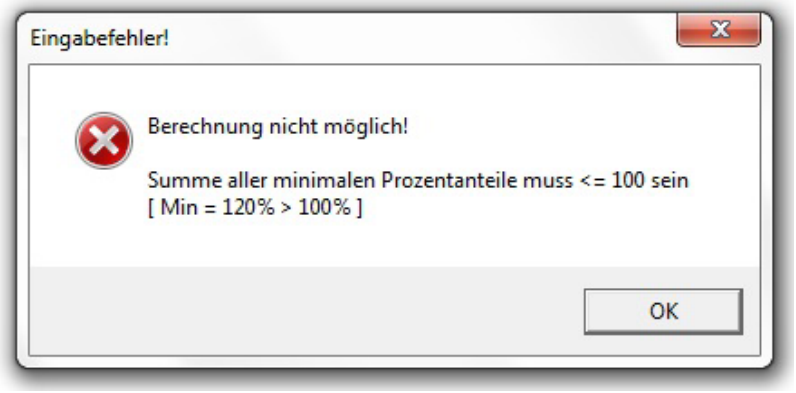


Abbildung 4.13
Eingabefehler: Summe der min. Prozentanteile muss <= 100 % sein

Stoffkombinationen deren Summe der Mengenanteile einen Wert kleiner als 100 % bzw. größer als 100 % ergeben, werden bei der Berechnung automatisch ausgeschieden und nicht berücksichtigt. Deshalb empfiehlt es sich die Unter und Obergrenze eines gewählten Stoffes von 0 % bis 100 % zu setzen. Dieser dient sozusagen als Füllstoff, der die verbleibenden Mengenanteile auf 100 % ergänzt.

4.1.10 Berechnungsergebnis

Durch das Starten der Berechnung werden eine Reihe von Tabellenblätter automatisch erstellt und eine Vielzahl von Berechnungsvorgänge durchgeführt, auf die in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird. Die Dauer der Berechnung ist abhängig von den zu untersuchenden Kombinationen und kann dementsprechend zwischen einigen Sekunden bis zu einigen Minuten erfordern.

Nach erfolgreicher Berechnung erscheint im Tabellenblatt „Eingabe“ ein Feld mit „Berechnung erfolgreich!“. Zusätzlich wird die maximal erzielbare Packungsdichte und die dafür erforderliche Mengenkombination der ausgewählten Stoffe angezeigt (siehe Abbildung 4.14).

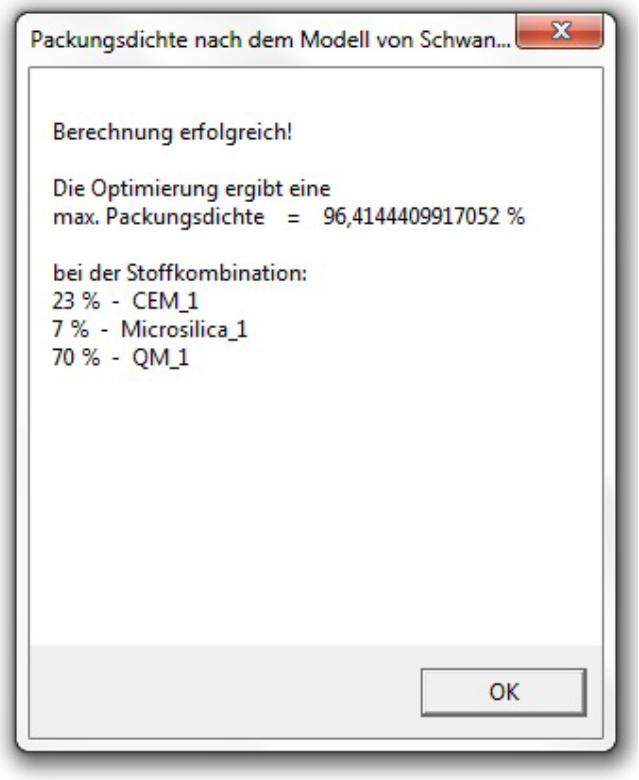


Abbildung 4.14 Maximale erzielbare Packungsdichte mit Ausgabe der Prozentanteile der gewählten Stoffe nach erfolgreicher Berechnung

Durch Drücken des OK-Buttons gelangt man wieder zurück zur Eingabemaske. Dort kann ebenfalls das Ergebnis ausgelesen werden bzw. das Tabellenblatt mit allen Parametern und Ergebnis gedruckt werden (siehe Abbildung 4.25 im Kapitel 4.3 Endergebnis).

4.1.11 Berechnung der Packungsdichte eines einzelnen Stoffes

In den vorherigen Kapiteln wurde nur die Ermittlung der maximal erreichbaren Packungsdichte einer Stoffkombination erläutert. Natürlich kann aber auch die tatsächlich mögliche Packungsdichte eines einzelnen Stoffes berechnet werden. Dazu muss lediglich in der Eingabemaske der gewünschte Stoff einzeln ausgewählt werden und die Unter- und Obergrenze von 0 – 100 % festgelegt werden. Die Schrittweite ist in diesem Fall nicht relevant und sollte auf Eins gestellt werden. Man erhält die maximale Packungsdichte des gewählten Stoffes.

4.2 Berechnungsablauf

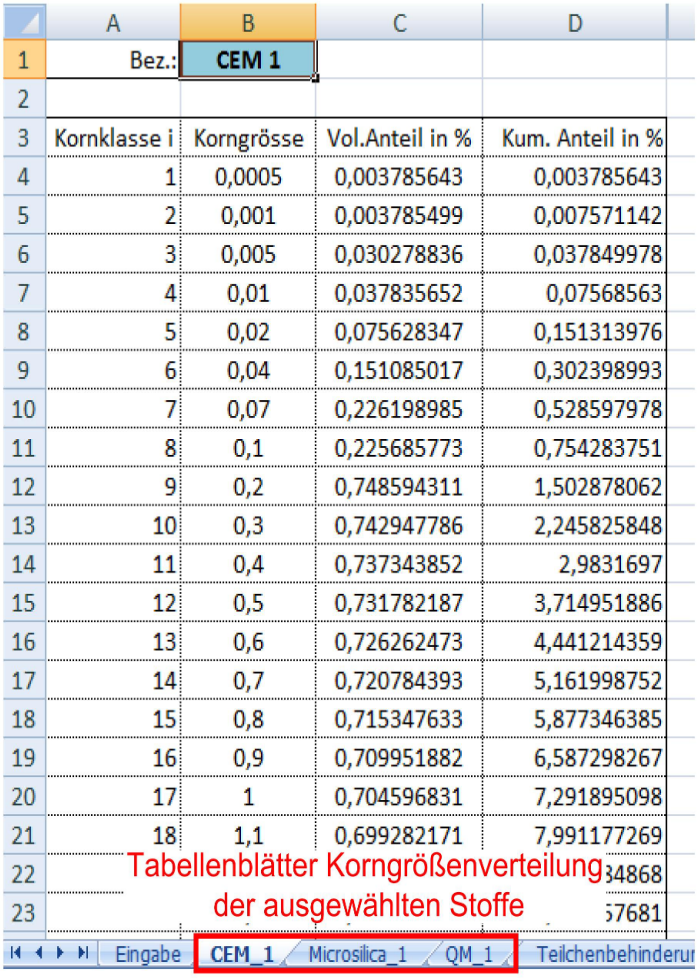
Damit die Packungsdichte bestimmt werden kann, müssen zunächst noch einige Parameter und stoffspezifische Werte in das Programm geladen werden. Zudem benötigt es einen Algorithmus zur Bestimmung aller möglichen Kombinationen für die eingegebenen Stoffe, damit für diese die Packungsdichte einzeln ermittelt werden kann, um in weiterer Folge daraus das Maximum bestimmen zu können.

4.2.1 Tabellenblätter mit Korngrößenverteilungen der ausgewählten Stoffe

Für die Packungsdichteberechnung ist die Korngrößenverteilung jedes ausgewählten Stoffes erforderlich. Das Programm bedient sich dabei quasi an einer externen Datenbank in Form von Excel-Dateien. Diese Dateien müssen zur Identifizierung den Namen des jeweiligen Stoffes tragen und im entsprechenden Ordner der zugehörigen Obergruppe gespeichert sein. Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, werden diese Stoffe dann in den einzelnen Dropdown-Menüs zur Auswahl angezeigt.

Wird nun ein bestimmter Stoff ausgewählt und die Berechnung gestartet, wird das gesamte Tabellenblatt der gleichlautenden Datei, das heißt des ausgewählten Stoffes in das Berechnungsprogramm geladen. Das Tabellenblatt enthält dabei die Korngrößenverteilung des jeweiligen Stoffes. Damit mit den Verteilungen sämtlicher in der Datenbank vorhandener Stoffe gerechnet werden kann, müssen diese die gleiche Anzahl von Kornklassen, mit gleicher zugehöriger Korngröße enthalten. Zusätzlich muss die Formatierung innerhalb des Excel-Tabellenblattes ident sein. Das heißt die Werte der Kornklasse *i* müssen in der *Zeile i* in *Spalte A* bis *D* vorhanden sein. Die Werte der Kornklasse *i+1* müssen in der *Zeile i+1* stehen usw. Dementsprechend müssen im Vorfeld die Korngrößenverteilungen aller Stoffe in dieser Form aufbereitet werden. Abbildung 4.15 zeigt einen Stoff mit den einzelnen Kornklassen und den entsprechenden erforderlichen Aufbau der Excel-Tabelle. In *Spalte A* befindet sich die Bezeichnung der Kornklasse mit fortlaufender Nummer. *Spalte B* enthält die zugehörige Korngröße in mm. Der vorhandene Volumenanteil der jeweiligen Kornklasse am Gesamtvolumen wird in

Spalte C angegeben. Dieser ist als Prozentwert in die jeweilige Zelle einzutragen. In *Spalte D* werden die einzelnen Volumenanteile fortlaufend aufsummiert eingetragen. Dieser Anteil wird als kumulativer Anteil bezeichnet und ist ebenfalls als Prozentwert abzulesen.



	A	B	C	D
1	Bez.:	CEM 1		
2				
3	Kornklasse i	Korngrösse	Vol.Anteil in %	Kum. Anteil in %
4	1	0,0005	0,003785643	0,003785643
5	2	0,001	0,003785499	0,007571142
6	3	0,005	0,030278836	0,037849978
7	4	0,01	0,037835652	0,07568563
8	5	0,02	0,075628347	0,151313976
9	6	0,04	0,151085017	0,302398993
10	7	0,07	0,226198985	0,528597978
11	8	0,1	0,225685773	0,754283751
12	9	0,2	0,748594311	1,502878062
13	10	0,3	0,742947786	2,245825848
14	11	0,4	0,737343852	2,9831697
15	12	0,5	0,731782187	3,714951886
16	13	0,6	0,726262473	4,441214359
17	14	0,7	0,720784393	5,161998752
18	15	0,8	0,715347633	5,877346385
19	16	0,9	0,709951882	6,587298267
20	17	1	0,704596831	7,291895098
21	18	1,1	0,699282171	7,991177269
22				34868
23				57681

Tabellenblätter Korngrößenverteilung der ausgewählten Stoffe

Eingabe | CEM_1 | Microsilica_1 | QM_1 | Teilchenbehinderu

Abbildung 4.15 Darstellung der Korngrößenverteilung des Zementes *CEM 1* mit dem erforderlichen Aufbau des Excel-Tabellenblattes

Der Vorteil dieser so aufbereitenden Datenbank ist, dass eine Erweiterung durch beliebige Stoffe sehr einfach möglich ist. Es muss lediglich die Datei in entsprechender Form aufbereitet werden. Das Programm erkennt den neuen Stoff dann automatisch. Außerdem werden nur jene Daten in das Programm geladen die auch wirklich zur Berechnung notwendig sind, wodurch der Berechnungsablauf zeitlich minimiert und die Dateigröße auf einem minimalen Niveau gehalten wird.

Wie in Abbildung 4.15 rot umrandet erkennbar ist, werden also im dargestelltem Beispiel die Tabellenblätter des Zementes *CEM_1*, des Microsilicas mit der Bezeichnung *Microsilica_1* und des Quarzmehls *QM_1* in das Programm geladen.

4.2.2 Tabellenblatt „Teilchenbehinderungsfaktor“

Zur Berechnung der Packungsdichte wird zusätzlich noch der Teilchenbehinderungsfaktor jeder einzelnen Kornklasse benötigt. Mit Hilfe dieses Faktors können die Auswirkungen der Kornform und die der Größenverhältnisse von Grund- und Beikorn berücksichtigt werden. Eine mögliche Vergrößerung des Gesamtvolumens der Partikelmischung durch Verdrängungsvorgänge geht dadurch in die Berechnung ein.

Zur Bestimmung dieses Faktors ist eine zusätzliche Berechnungsdatei erforderlich. Diese Datei wird „Teilchenbehinderungsfaktor.xlsx“ genannt und muss im gleichen Verzeichnis wie die Programmdatei gespeichert sein (siehe auch Abbildung 4.6 im Kapitel 4.1.4 Schritt 4: Auswahl der Stoffgruppen). Während des Berechnungsablaufes wird diese Datei geöffnet und die im Vorfeld definierten Eingabewerte für den Hohlraumanteil der Einkornschüttung k_0 und der Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 werden in die externe Excel-Datei übernommen. Dort wird zunächst die Reichweite der Teilchenbehinderung w für jede Kornklasse i jeweils als Grundkorn und als Beikorn bestimmt (siehe Abbildung 4.16). Die Teilchenbehinderung w berechnet sich dabei mit Hilfe folgender Formel:

$$w = \log(x_i/x_s)$$

w ..... Reichweite der Teilchenbehinderung

x_i ..... Beikorngröße

x_s ..... Grundkorngröße

Demnach ist dieser Wert ausschließlich von den einzelnen Kornklassen mit der zugehörigen Korngröße abhängig. Da sämtliche Stoffe auf die gleiche Anzahl und gleiche Abstufung der Kornklassen normiert werden müssen, bleibt diese Tabelle im Allgemeinen unverändert. Falls eine andere Abstufung der Kornklassen gewünscht wäre, müsste das Tabellenblatt dementsprechend angepasst werden. Die zu berechnenden Stoffe müssten allerdings ebenfalls die gleiche Korngrößenverteilung mit denselben Kornklassen aufweisen.

Die gewählten Eingangsparamater k_0 und w_0 spielen erst in der weiteren Berechnung eine Rolle.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
3	Reichweite der Teilchenbehinderung w										
5	xi ... Beikorn			xs ... Grundkorn							
7	Kornklasse i			1	2	3	4	5	6	7	8
8		Korngröße [mm]		0,0005	0,001	0,005	0,01	0,02	0,04	0,07	0,1
10				w = log (xi/xs)							
11	1	0,0005		0,000	-0,301	-1,000	-1,301	-1,602	-1,903	-2,146	-2,301
12	2	0,001		0,301	0,000	-0,699	-1,000	-1,301	-1,602	-1,845	-2,000
13	3	0,005		1,000	0,699	0,000	-0,301	-0,602	-0,903	-1,146	-1,301
14	4	0,01		1,301	1,000	0,301	0,000	-0,301	-0,602	-0,845	-1,000
15	5	0,02		1,602	1,301	0,602	0,301	0,000	-0,301	-0,544	-0,699
16	6	0,04		1,903	1,602	0,903	0,602	0,301	0,000	-0,243	-0,398
17	7	0,07		2,146	1,845	1,146	0,845	0,544	0,243	0,000	-0,155
18	8	0,1		2,301	2,000	1,301	1,000	0,699	0,398	0,155	0,000
19	9	0,2		2,602	2,301	1,602	1,301	1,000	0,699	0,456	0,301
20	10	0,3		2,778	2,477	1,778	1,477	1,176	0,875	0,632	0,477
21	11	0,4		2,903	2,602	1,903	1,602	1,301	1,000	0,757	0,602
22	12	0,5		3,000	2,699	2,000	1,699	1,398	1,097	0,854	0,699
23	13	0,6		3,079	2,778	2,079	1,778	1,477	1,176	0,933	0,778
24	14	0,7		3,146	2,845	2,146	1,845	1,544	1,243	1,000	0,845

Abbildung 4.16 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Reichweite der Teilchenbehinderung“

In einem zweiten Tabellenblatt wird der Teilchenbehinderungsfaktor $a_{s,i}$ ermittelt. Hierbei erfolgt die Unterscheidung in die beiden Extremfälle wie sie in Kapitel 3.2.1.1 Ermittlung des Hohlraumgehaltes beschrieben sind. Bei Fall 1 können die feineren Beikörner vollständig in die Zwischenräume der Grundkornpackung schlupfen, wodurch der Hohlraumanteil verringert wird, aber das Gesamtvolumen der Mischung gleich bleibt.

$$Fall\ 1: \qquad w > -w_0 \rightarrow \quad a = k_0 + 1$$

Bei Fall 2 hingegen werden die groben Körner von den Feineren verdrängt, wodurch sich das Gesamtvolumen erhöht und der Hohlraumgehalt der Gesamtmischung genau dem Hohlraumgehalt der feineren Partikel entspricht.

$$Fall\ 2: \qquad w > \ w_0 \rightarrow \quad a = k_0$$

Dazwischen befinden sich Übergangsbereiche. Die Größe der beiden Extremwerte wird durch den Eingangsparameter k_0 bestimmt. Wobei der Extremwert für den Fall 1 bei k_0+1 liegt und jener für den Fall 2 bei k_0. Dazwischen gibt es einen Punkt bei dem die feineren Partikel den gesamten Hohlraum der gröberen Partikel ausfüllen. Dort kommt es zu keiner Teilchenbehinderung und der Teilchenbehinderungsfaktor $a_{s,i}$ ergibt Null. Die Steigung der sich ergebenden

Geraden dazwischen wird durch die Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 bestimmt.

$$Fall\ 3li\text{:}\quad -w_0 < w < 0 \rightarrow k_0 + 1 > a > 0$$

$$Fall\ 3re\text{:}\quad 0 < w < w_0 \rightarrow 0 < a < k_0$$

Zur Veranschaulichung der einzelnen Fälle wird zusätzlich eine Grafik im Tabellenblatt angezeigt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	k0 =	0,6	... Hohlraumanteil der Einkornschüttung						
3	w0 =	0,9	... Reichweite der Teilchenbehinderung						
4									
5	Fall 1 ...	w > -w0	a = k0 + 1	-1,5	1,6				
6	Fall 3li ...	-w0 < w < 0	k0 + 1 > a > 0	-0,9	1,6				
7	0 ...	0	0	0	0				
8	Fall 3re ...	0 < w < w0	0 < a < k0	0,9	0,6				
9	Fall 2 ...	w > w0	a = k0	1,5	0,6				
10									
11									
12									
13	**Teilchenbehinderungsfaktor für die jeweilige Kornklasse i = as,i**								
15	**xi ... Beikorn**		**xs ... Grundkorn**						
17	**Kornklasse i**		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
18		**Korngröße [mm]**	**0,0005**	**0,001**	**0,005**	**0,01**	**0,02**	**0,04**	**0,07**
20									
21	1	0,0005	0,000	0,535	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
22	2	0,001	0,201	0,000	1,243	1,600	1,600	1,600	1,600
23	3	0,005	0,600	0,466	0,000	0,535	1,070	1,600	1,600
24	4	0,01	0,600	0,600	0,201	0,000	0,535	1,070	1,502
25	5	0,02	0,600	0,600	0,401	0,201	0,000	0,535	0,967

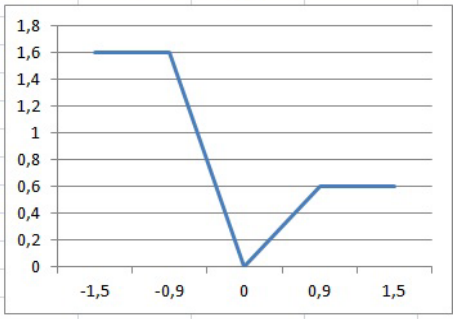


Abbildung 4.17 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Teilchenbehinderungsfaktor“ mit den einzelnen Werten für die jeweilige Kornklasse

Damit das Berechnungsprogramm mit den ermittelten Werten für die Teilchenbehinderungsfaktoren jeder einzelnen Kornklasse rechnen kann wird das gesamte Tabellenblatt in die Programmdatei geladen.

4.2.3 Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“

Das Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ wird automatisch während des Berechnungsablaufes erstellt. Es dient zur Ermittlung und Auflistung aller Kombinationen der ausgewählten Stoffe die aus den Eingabedaten rechnerisch

möglich sind. Zusätzlich werden im Tabellenblatt die Kornanteile der einzelnen Kornklassen der jeweiligen Mengenkombination ermittelt.

In *Spalte B* bis *M* werden die ausgewählten Stoffe mit dessen Stoffnamen (in *Zeile 1*) und deren definierter gewünschter Mengenbereiche (in *Zeile 2*) nochmals aufgelistet. In Abbildung 4.18 sind diese Werte zur Verdeutlichung rot markiert. Es werden natürlich nur diejenigen Stoffe aufgelistet, die in der Eingabemaske ausgewählt wurden. Falls weniger als zwölf Stoffe gewählt wurden, bleiben die restlichen Spalten leer.

	A	B	C	D
1	max.-	CEM_1	Microsilica_1	QM_1
2	Hohlraumgeh	20 - 25 %	0 - 100 %	64 - 70 %
3				
4	0,04619144	20	10	70
5	0,05229941	20	12	68
6	0,05840738	20	14	66

Abbildung 4.18 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ mit der Auflistung der ausgewählten Stoffe und deren gewählter Mengeneingrenzungen rot markiert

4.2.3.1 Berechnung der möglichen Stoffmengenkombinationen

Im nächsten Berechnungsschritt wird eine Tabelle mit allen möglichen Mengenkombinationen erstellt. Zum besseren Verständnis sind im Folgenden zu jedem Schritt Ausschnitte aus dem Quellcode des Berechnungsprogrammes dargestellt.

Ziel ist es, entsprechend den vom Benutzer vorgegebenen Grenzwerten und Schrittgrößen, alle möglichen Kombinationen der Stoffe zu ermitteln. Dafür wird zunächst eine Schleife implementiert, die für den ersten Stoff, beginnend beim vom Benutzer vorgegebenen Minimum *St1_min* alle Werte bis zum vorgegebenen Maximum *St1_max* in der gewünschten Schrittgröße *SSt1* durchläuft. Zu jedem dieser Werte *i* wird nun der Restwert *rest = 100 - i* ermittelt.

```
'Schleife vom Minimum Stoff 1 zum Maximum Stoff 1
For i = St1_min To St1_max Step SSt1
  rest = 100 - i 'so viel Prozent fehlen noch auf 100%
```

Danach wird überprüft, ob das vorgegebene Minimum des folgenden Stoffes *St2_min* unter dem errechneten Restwert *rest* liegt. Andernfalls ist diese

Kombination nicht möglich, und wird nicht weiter berechnet und auch nicht in die Tabelle eingetragen.

```
  If (St2_min <= rest) Then 'wenn Minimum von Stoff 2 <= Restwert
ist dann nächste For-Schleife
```

Ist die Bedingung *St2_min* <= *rest* erfüllt, wird für den nächsten Stoff eine Schleife von dem für diesen Stoff vorgegebenen Minium *St2_min* bis zum möglichen Maximum *St2_max_akt*, welches der kleinere Wert vom vorgegebenen Maximum *St2_max* und dem Restwert *rest* ist, durchlaufen. Der Wert *St2_max_akt* wird davor in der Ersten der beiden unten angeführten Gleichungen ermittelt. Anschließend wird wiederum zu jedem dieser Werte *j* der neue verbleibende Restwert *rest = 100 - i - j* ermittelt.

```
  St2_max_akt = WorksheetFunction.min(rest, St2_max) 'sucht
kleinsten Wert zw. Restwert und Maximum von Stoff 2
  For j = St2_min To St2_max_akt Step SSt2 'Schleife von Minimum
Stoff 2 zum kleinsten Wert zw. Restwert und Maximum von Stoff 2
    rest = 100 - i - j 'neuer Restwert = 100 - i - j
```

So wird fortgefahren, bis zum letzten Stoff.

```
    If (St3_min <= rest) Then
    St3_max_akt = WorksheetFunction.min(rest, St3_max) 'sucht
kleinsten Wert zw. Restwert und Maximum von Stoff 3

    For k = St3_min To St3_max_akt Step SSt3
      rest = 100 - i - j – k
      .
      ...
```

Die Prozentzahl des letzten Stoffes ergibt sich automatisch als Differenz von 100 minus der Summe aller Prozentgrößen der anderen Stoffe. Um eine gültige Kombination zu erhalten muss auch dieser Wert zwischen vorgegebenen Minimum *St12_min* und Maximum *St12_max*, des letzten Stoffes liegen.

```
        For s = St11_min To St11_max_akt Step SSt11
          rest = 100 - i - j - k - l - m - n - o - p - q - r - s

          If ((rest >= St12_min) And (rest <= St12max)) Then 'wenn
Restwert >= Minimum von Stoff 12 und <= Maximum von Stoff 12 dann
ist es eine gültige Kombination
```

Erst nach dieser Überprüfung werden alle in diesem Durchlauf ermittelten Prozentwerte in die Tabelle eingetragen (siehe auch Abbildung 4.19).

```
Cells(Zeile, 2) = i 'somit schreib Prozent für Stoff 1 in Zelle
If (x > 1) Then 'falls Anzahl der Stoffe größer als 1 dann
Cells(Zeile, 3) = j 'schreib Prozent von Stoff 2 in die Zelle usw.
If (x > 2) Then
Cells(Zeile, 4) = k
.
.
...
```

	A	B	C	D
1	max.-	CEM_1	Microsilica_1	QM_1
2	Hohlraumgeh	20 - 25 %	0 - 100 %	64 - 70 %
3				
4	0,04619144	20	10	70
5	0,05229941	20	12	68
6	0,05840738	20	14	66
7	0,06451534	20	16	64
8	0,04319064	21	9	70
9	0,0492986	21	11	68
10	0,05540657	21	13	66
11	0,06151454	21	15	64
12	0,04018983	22	8	70
13	0,0462978	22	10	68
14	0,05240576	22	12	66
15	0,05851373	22	14	64
16	0,03718902	23	7	70
17	0,04329699	23	9	68
18	0,04940496	23	11	66
19	0,05551293	23	13	64
20	0,03958505	24	6	70
21	0,04029619	24	8	68
22	0,04640415	24	10	66
23	0,05251212	24	12	64

mögliche Stoffmengenkombinationen in Prozent

Abbildung 4.19 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ mit der Auflistung der einzelnen Stoffmengen-kombinationen

4.2.3.2 Berechnung der Kornanteile jeder einzelnen Stoffkombination

Ab *Spalte N* werden die Kornanteile der einzelnen Kornklassen für die jeweilige Kombination berechnet. Das heißt der Kornanteil der *Kornklasse 1* des *Stoffes 1* wird mit dem errechneten Prozentanteil für den *Stoff 1* der ersten möglichen Kombination multipliziert. Weiters wird der Kornanteil der *Kornklasse 1* des *Stoffes 2* mit dem errechneten Prozentanteil für den *Stoff 2* der ersten Kombination multipliziert und hinzu addiert usw. Die unten stehende Formel zeigt das Beschriebene nochmals. Die Kornanteile der jeweiligen Stoffe werden dabei aus den ins Programm eingefügten Tabellenblättern der jeweiligen Stoffe entnommen.

$$s_k = \sum_{i=1}^{n} s_{k,i} * p_i$$

s_k ..... Kornanteil / Festraumanteil der jeweiligen Kornklasse *k*, wobei $k = \{1, 2, \dots, 105\}$

p_i ..... Prozentanteil des Stoffes *i* der jeweiligen Stoffkombination

n ..... Anzahl der ausgewählten Stoffe

Dieser Vorgang erfolgt für jeden Stoff und für jede Kornklasse, wobei die Summe aus den einzelnen Kornanteilen der Kornklassen den *Wert 1* ergeben muss.

$$\sum_{k=1}^{m} s_k = 1$$

m ..... Anzahl der Kornklassen (im vorliegenden Fall = 105)

Die Ergebnisse werden in derselben Zeile ab *Spalte N* dargestellt, in der auch die errechnete mögliche Kombination aufgelistet ist. Die Kornanteile der Kornklassen für die weiteren möglichen Kombinationen werden anhand desselben Schemas berechnet und in die entsprechenden Zeilen und Spalten eingetragen.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 4.20 einen Ausschnitt aus dem Tabellenblatt. In den *Zellen 4/B-D* stehen die errechneten Prozentanteile der ersten Mengenkombination für die ausgewählten Stoffe. In den Zeilen darunter befinden sich die weiteren möglichen Kombinationen. Die *Spalten E* bis *M* sind in diesem Beispiel leer, da lediglich drei Stoffe ausgewählt wurden. Die *Spalten E* bis *L* wurden deshalb ausgeblendet. Ab *Spalte N* sind die Werte der Kornanteile dargestellt. Wobei in *Zeile 2* die Nummer der Kornklasse und in *Zeile 3* die jeweilige zugehörige Korngröße nochmals aufgelistet sind. Darunter stehen sämtliche errechneten Kornanteile für die jeweiligen Klassen und Mengenkombinationen. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 4.20 die Kornanteile für die erste Mengenkombination, sowie die Mengenkombination selbst, rot umrandet.

	A	B	C	D	M	N	O	P	Q	R	S
1	max.-	CEM_1	Microsilica_1	QM_1		Kornanteil		Kornklassen			
2	Hohlraumgeh	20 - 25 %	0 - 100 %	64 - 70 %		1	2	3	4	5	6
3		Prozentanteile der 1.Stoffkombination				0,0005	0,001	0,005	0,01	0,02	0,04
4	0,04619144	20	10	70		0,0013466	0,00195447	0,0270939	0,0550158	0,1575887	0,4497148
5	0,05229941	20	12	68		0,00146449	0,002	berechnete Kornanteile der		0,18608131	0,53361436
6	0,05840738	20	14	66		0,00158239	0,002	jeweiligen Kornklassen		0,21457391	0,61751392
7	0,06451534	20	16	64		0,00170028	0,002			0,24306652	0,70141348
8	0,04319064	21	9	70		0,00132551	0,00187258	0,02584682	0,05064931	0,14409868	0,40927587
9	0,0492986	21	11	68		0,0014434	0,00211206	0,03017755	0,06013905	0,17259129	0,49317543
10	0,05540657	21	13	66		0,0015613	0,00235153	0,03450827	0,06962879	0,20108389	0,57707499
11	0,06151454	21	15	64		0,00167919	0,002591	0,038839	0,07911852	0,2295765	0,66097455
12	0,04018983	22	8	70		0,00130442	0,0017907	0,02398425	0,0462828	0,13060866	0,36883694
13	0,0462978	22	10	68		0,00142231	0,00203018	0,02831497	0,05577253	0,15910127	0,4527365
14	0,05240576	22	12	66		0,00154021	0,00226965	0,0326457	0,06526227	0,18759387	0,53663606
15	0,05851373	22	14	64		0,0016581	0,00250912	0,03697642	0,07475201	0,21608648	0,62053562
16	0,03718902	23	7	70		0,00128333	0,00170882	0,02212167	0,04191628	0,11711864	0,32839801
17	0,04329699	23	9	68		0,00140122	0,00194829	0,0264524	0,05140602	0,14561125	0,41229757
18	0,04940496	23	11	66		0,00151912	0,00218777	0,03078312	0,06089576	0,17410385	0,49619713
19	0,05551293	23	13	64		0,00163701	0,00242724	0,03511385	0,0703855	0,20259646	0,58009669
20	0,03958505	24	6	70		0,00126224	0,00162694	0,0202591	0,03754977	0,10362862	0,28795908
21	0,04029619	24	8	68		0,00138013	0,00186641	0,02458982	0,04703951	0,13212123	0,37185864
22	0,04640415	24	10	66		0,00149803	0,00210589	0,02892055	0,05652925	0,16061383	0,4557582
23	0,05251212	24	12	64		0,00161592	0,00234536	0,03325127	0,06601899	0,18910644	0,53965776

Abbildung 4.20 Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ mit der Berechnung der Kornanteile der einzelnen Kornklassen für die einzelnen möglichen errechneten Kombinationen

4.2.4 Tabellenblatt zur Berechnung des Hohlraumgehaltes

Im nächsten Berechnungsschritt wird ein neues Tabellenblatt zur Ermittlung des Hohlraumgehaltes erstellt. Hier erfolgt die eigentliche Berechnung der Packungsdichte.

Zunächst werden wiederum die ausgewählten Stoffe mit den in der Eingabemaske definierten Einschränkungen für die Mengenanteile aufgelistet. Dafür sind, wie in Abbildung 4.21 zu sehen ist. die *Zeilen 1* bis *13* der *Spalten A* bis *D* vorgesehen. Werden weniger als zwölf Stoffe in der Eingabemaske definiert, bleiben dementsprechend einige Zeilen leer. Diese Auflistung dient lediglich zur besseren Übersicht und hat auf die Berechnung keinen Einfluss.

4.2.4.1 Erstellen einer Matrix zur Ermittlung des maximalen Hohlraumgehaltes

Nach demselben Schema wie in Kapitel 3.2.1.2 „Einfluss der Teilchenbehinderung“ erläutert, wird nun eine Matrix zur Ermittlung des Hohlraumgehaltes der einzelnen Kornklassen s_i erstellt. Zunächst werden die einzelnen Korngrößen der Kornklassen in die *Zeile 15* mit *Spalte C* beginnend fortlaufend eingetragen. Anschließend werden dieselben Korngrößen auch in die *Spalte B* ab *Zeile 16* aufsteigend eingefügt (siehe Abbildung 4.21). Im nächsten Schritt werden die errechneten Kornanteile der *Stoffmengenkombination 1* aus dem Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ übernommen und in die *Spalte A* neben der jeweilig zugehörigen Korngröße eingetragen. Zum besseren Verständnis sind diese Werte in Abbildung 4.21 blau umrandet dargestellt.

Das Grundgerüst ist somit erstellt. Es folgt die eigentliche Berechnung. Dazu werden die einzelnen Kornanteile bzw. Festraumanteile jeder einzelnen Kornklasse s_i mit dem jeweiligen Faktor $a_{s,i}$ zur Berücksichtigung der Teilchenbehinderung multipliziert. Das Programm schreibt also in jede Zelle der Matrix eine Formel, bei der der Kornanteil aus der *Spalte A* der jeweiligen Zeile mit dem zugehörigen Teilchenbehinderungsfaktor aus dem Tabellenblatt „Teilchenbehinderungsfaktor“ multipliziert wird. In Abbildung 4.21 sind diese Werte grün umrandet dargestellt. Die Matrix ergibt sich demnach wie folgt:

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} * s_1 & \cdots & a_{s,1} * s_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,i} * s_i & \cdots & a_{s,i} * s_i \end{pmatrix}$$

$a_{s,i}$ ..... Faktor *a* zur Berücksichtigung der Teilchenbehinderung der jeweiligen Beikornklasse *i* und Grundkornklasse *s*, wobei im vorliegenden Fall $i = \{1, 2, \dots, 105\}$ und $s = \{1, 2, \dots, 105\}$ sind.

s_i ..... Kornanteil / Festraumanteil der Kornklasse *i* am Gesamtfestraum

Da die Teilchenbehinderungsfaktoren im Tabellenblatt „Teilchenbehinderungsfaktor“ in einer Matrix mit demselben Aufbau wie im Tabellenblatt „Hohlraumanteil“ aufgelistet sind, lässt sich der zugehörige Wert sehr einfach entnehmen.

An der Stelle, an der Grund- und Beikorn den gleichen Wert aufweisen, kann es natürlich zu keiner gegenseitigen Teilchenbehinderung kommen. Werden Grund- und Beikorn mit jeweils gleichem Durchmesser zusammen gemischt erhält man ein Gemisch mit nur einer Kornklasse, also quasi eine Einkornschüttung. Der verbleibende Hohlraumgehalt muss exakt dem Hohlraumanteil der Einkornschüttung entsprechen. Demnach muss in der Diagonalen der Matrix jeweils die Null stehen, wie auch in Abbildung 4.21 zu sehen ist.

$$\begin{pmatrix} 0 & \cdots & a_{s,1} * s_1 \\ \vdots & 0 & \vdots \\ a_{1,i} * s_i & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

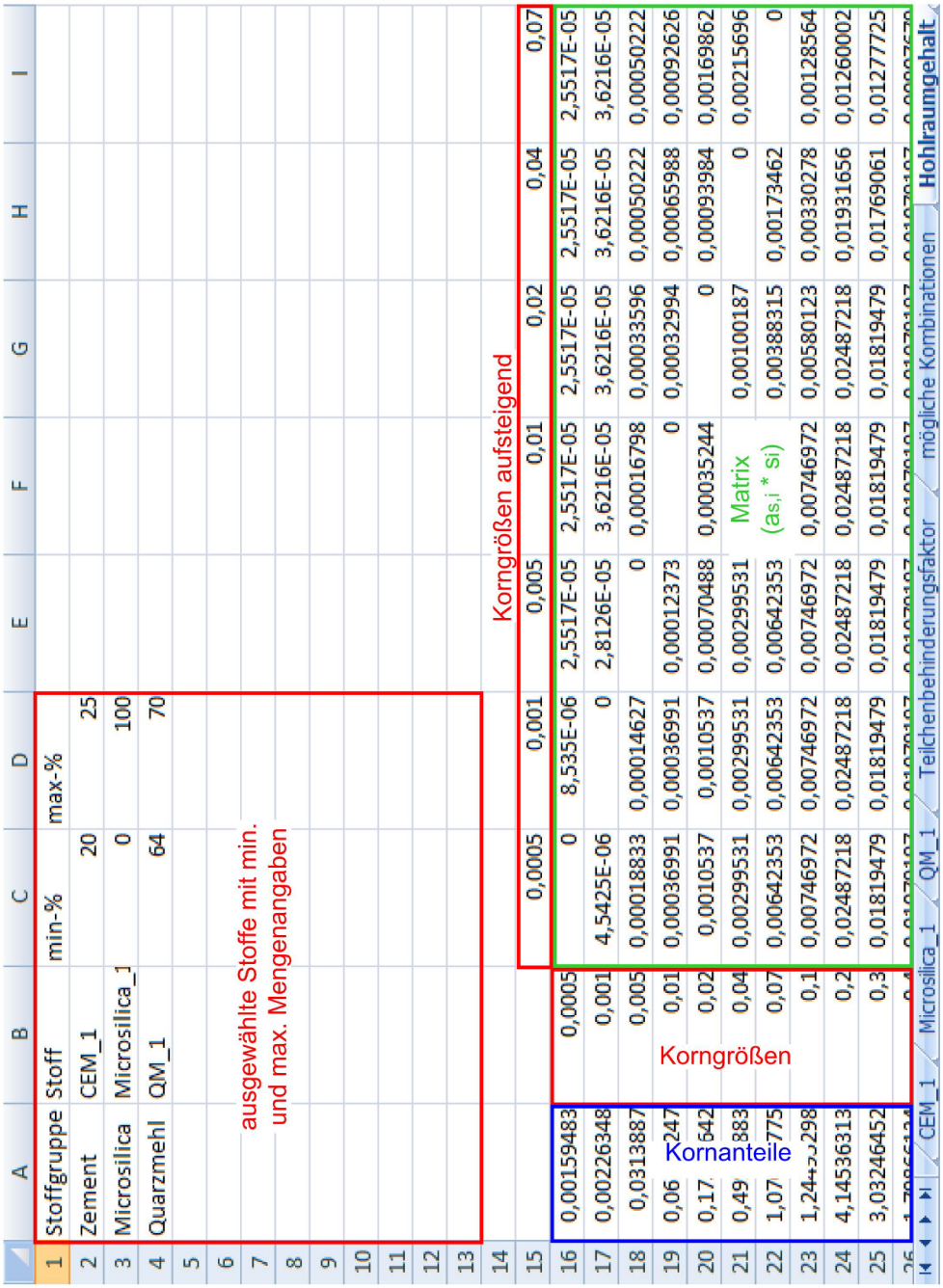


Abbildung 4.21 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Hohlraumgehalt“ mit der Auflistung der ausgewählten Stoffe und der Matrix zur Berechnung des Hohlraumgehaltes

Nun sind alle Zellen der Matrix mit Werten gefüllt. Zur Ermittlung des Hohlraumgehaltes der jeweiligen Grundkornklassen wird nur noch die Summe über alle ermittelten Werte in den jeweiligen Spalten gebildet und in die nächste freie Zelle geschrieben. Dieser Vorgang erfolgt für jede Grundkornklasse, also für jede Spalte der Matrix.

In einem letzten Schritt muss noch die soeben ermittelte Summe vom Hohlraumanteil des Grundkorns k_0 abgezogen werden. k_0 wurde in der Eingabemaske frei gewählt bzw. ist im Vorfeld aus Versuchen zu ermitteln. Die nachstehende Formel soll diesen Rechenschritt nochmals verdeutlichen. Die entsprechenden Werte werden in der nächstfreien Zeile aufgelistet.

$$h_s = k_0 - \sum_{i=1}^{m} a_{s,i} * s_i$$

h_s ..... Hohlraumanteil der Grundkornklasse

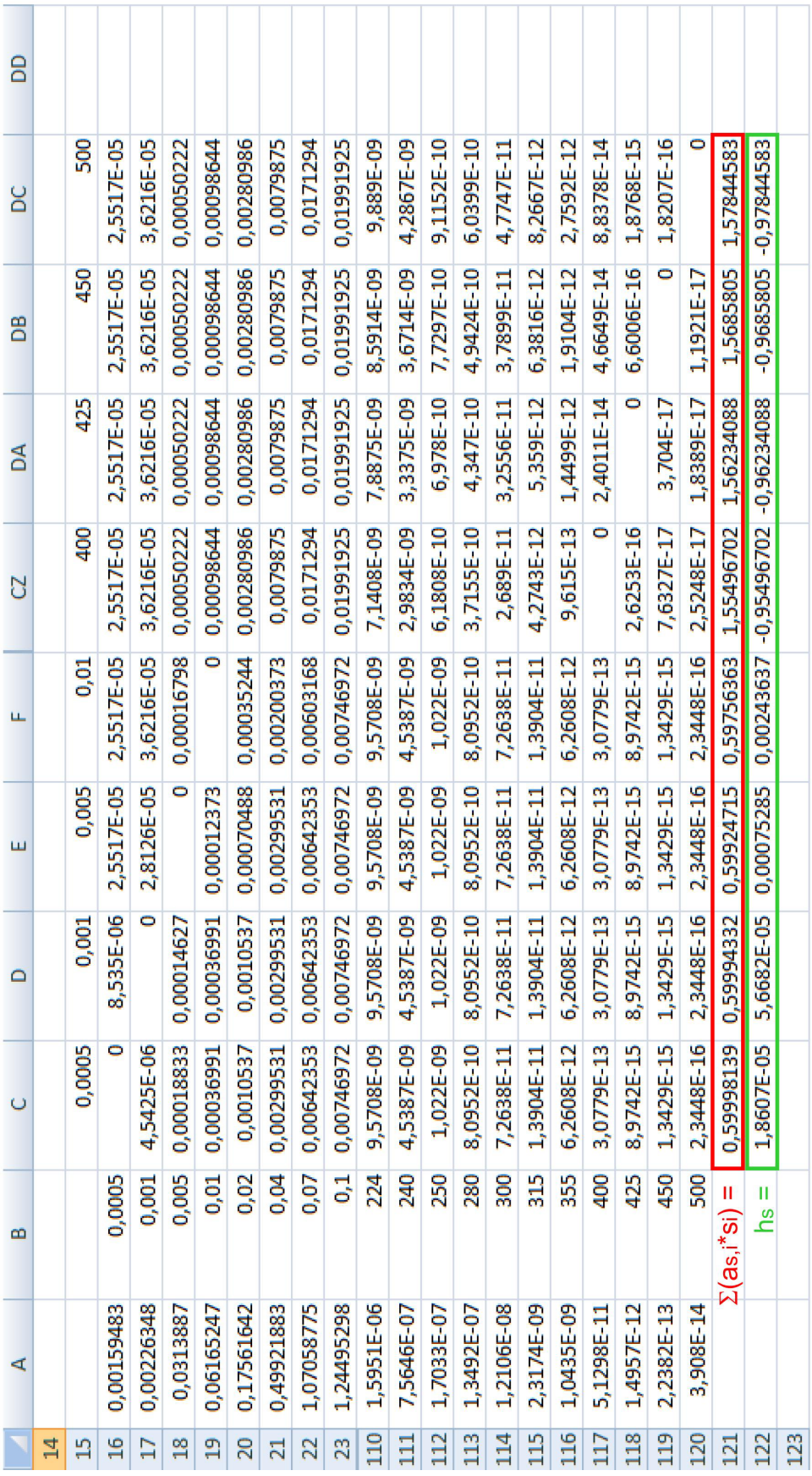
k_0 ..... Hohlraumanteil der Einkornschüttung

$a_{s,i}$ ..... Faktor *a* zur Berücksichtigung der Teilchenbehinderung der jeweiligen Kornklasse *i*

s_i ..... Festraumanteil der Kornklasse *i* am Gesamtfestraum

m ..... Anzahl der Kornklassen

Die jeweiligen Summen und die Werte für den Hohlraumgehalt der einzelnen Kornklassen h_s sind in Abbildung 4.22 dargestellt. Mit rot sind die einzelnen Summen umrandet und mit grün die Werte für die Hohlraumgehalte. Um eine übersichtliche Darstellung zu erzielen, wurden mehrere Zeilen und Spalten in der Abbildung ausgeblendet.



	A	B	C	D	E	F	CZ	DA	DB	DC	DD
14											
15			0,0005	0,001	0,005	0,01	400	425	450	500	
16	0,00159483	0,0005	0	8,535E-06	2,5517E-05	2,5517E-05	2,5517E-05	2,5517E-05	2,5517E-05	2,5517E-05	
17	0,00226348	0,001	4,5425E-06	0	2,8126E-05	3,6216E-05	3,6216E-05	3,6216E-05	3,6216E-05	3,6216E-05	
18	0,0313887	0,005	0,00018833	0,00014627	0	0,00016798	0,00050222	0,00050222	0,00050222	0,00050222	
19	0,06165247	0,01	0,00036991	0,00036991	0,00012373	0	0,00098644	0,00098644	0,00098644	0,00098644	
20	0,17561642	0,02	0,0010537	0,0010537	0,00070488	0,00035244	0,00280986	0,00280986	0,00280986	0,00280986	
21	0,49921883	0,04	0,00299531	0,00299531	0,00299531	0,00200373	0,0079875	0,0079875	0,0079875	0,0079875	
22	1,07058775	0,07	0,00642353	0,00642353	0,00642353	0,00603168	0,0171294	0,0171294	0,0171294	0,0171294	
23	1,24495298	0,1	0,00746972	0,00746972	0,00746972	0,00746972	0,01991925	0,01991925	0,01991925	0,01991925	
110	1,5951E-06	224	9,5708E-09	9,5708E-09	9,5708E-09	9,5708E-09	7,1408E-09	7,8875E-09	8,5914E-09	9,889E-09	
111	7,5646E-07	240	4,5387E-09	4,5387E-09	4,5387E-09	4,5387E-09	2,9834E-09	3,3375E-09	3,6714E-09	4,2867E-09	
112	1,7033E-07	250	1,022E-09	1,022E-09	1,022E-09	1,022E-09	6,1808E-10	6,978E-10	7,7297E-10	9,1152E-10	
113	1,3492E-07	280	8,0952E-10	8,0952E-10	8,0952E-10	8,0952E-10	3,7155E-10	4,347E-10	4,9424E-10	6,0399E-10	
114	1,2106E-08	300	7,2638E-11	7,2638E-11	7,2638E-11	7,2638E-11	2,689E-11	3,2556E-11	3,7899E-11	4,7747E-11	
115	2,3174E-09	315	1,3904E-11	1,3904E-11	1,3904E-11	1,3904E-11	4,2743E-12	5,359E-12	6,3816E-12	8,2667E-12	
116	1,0435E-09	355	6,2608E-12	6,2608E-12	6,2608E-12	6,2608E-12	9,615E-13	1,4499E-12	1,9104E-12	2,7592E-12	
117	5,1298E-11	400	3,0779E-13	3,0779E-13	3,0779E-13	3,0779E-13	0	2,4011E-14	4,6649E-14	8,8378E-14	
118	1,4957E-12	425	8,9742E-15	8,9742E-15	8,9742E-15	8,9742E-15	2,6253E-16	0	6,6006E-16	1,8768E-15	
119	2,2382E-13	450	1,3429E-15	1,3429E-15	1,3429E-15	1,3429E-15	7,6327E-17	3,704E-17	0	1,8207E-16	
120	3,908E-14	500	2,3448E-16	2,3448E-16	2,3448E-16	2,3448E-16	2,5248E-17	1,8389E-17	1,1921E-17	0	
121		Σ(as,i*si) =	0,59998139	0,59994332	0,59924715	0,59756363	1,55496702	1,56234088	1,5685805	1,57844583	
122		hs =	1,8607E-05	5,6682E-05	0,00075285	0,00243637	-0,95496702	-0,96234088	-0,9685805	-0,97844583	
123											

Abbildung 4.22 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Hohlraumgehalt“ mit der Ermittlung des Hohlraumgehaltes h_s für jede einzelne Kornklasse *i*

Maßgebend für die Berechnung der Packungsdichte *D* ist schließlich jene Kornklasse die den größten Hohlraumanteil des Grundkorns $h_{s,max}$ liefert. Demnach ermittelt das Programm in einem weiteren Rechenschritt das Maximum aus den ermittelten Hohlraumanteilen h_s. Dieser Maximalwert wird anschließend in das Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ in die *Spalte A* in die jeweilige Zeile der zugehörigen, ausgewerteten Mengenkombination geschrieben (siehe Abbildung 4.23).

Damit schließlich die maximale Packungsdichte aus allen möglichen Stoffmengenkombinationen ermittelt werden kann, muss dieser Vorgang nun noch für alle Kombinationen wiederholt werden. Da das Tabellenblatt „Hohlraumgehalt“ mit der zur Berechnung erforderlichen Matrix bereits erstellt wurde, kann dieses verwendet werden. In der Matrix selbst sind die notwendigen Formeln bereits eingetragen. Dadurch ist es ausreichend, lediglich die Werte der Kornanteile für die jeweilige Korngruppe in die *Spalte A* zu übernehmen. Das heißt die Kornanteile der *Mengenkombination 1* werden durch die Kornanteile der *Mengenkombination 2* aus dem Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ überschrieben. Die Hohlraumanteile h_s werden automatisch ermittelt. Als einziger Rechenschritt bleibt nur die Ermittlung von $h_{s,max}$ für die *Mengenkombination 2*. Dieser Maximalwert wird wiederum in das Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ in die *Spalte A* in die jeweilige Zeile der zugehörigen *Mengenkombination 2* geschrieben (siehe Abbildung 4.23).

Der Vorgang wird nun für sämtliche Stoffmengenkombinationen wiederholt. Man erhält schließlich für alle möglichen Kombinationen den maximalen Hohlraumgehalt, welcher für die Berechnung der Packungsdichte maßgebend ist.

4.2.4.2 Vor- und Nachteile des gewählten Berechnungsverfahrens

Durch dieses Berechnungsverfahren können die Ergebnisse der Berechnungen der einzelnen Mengenkombinationen leider nur bedingt nachgeprüft werden, da diese immer wieder von der nächstmöglichen Kombination überschrieben werden. Lediglich die letzte Mengenkombination in der Liste kann kontrolliert werden. Will

man auch von allen anderen Kombinationen die Berechnungsergebnisse überprüfen, müsste zusätzlich im Quelltext des Programmes eine STOP-Funktion nach jeder einzelnen Kombination eingefügt werden. Aus Gründen einer besseren Bedienbarkeit wurde allerdings bewusst darauf verzichtet. Diese Funktion könnte aber ohne viel Mühe nachträglich eingefügt werden.

Der Vorteil der gewählten Berechnungsmethode ist, dass der Berechnungsaufwand deutlich verringert wird. Es muss nicht jeder einzelne Wert der Matrix, für jede einzelne Mengenkombination, berechnet und in die jeweilige Zelle geschrieben werden. Außerdem müsste für jede Mengenkombination ein eigenes Tabellenblatt erstellt werden. Man erhält somit schnell 30, 40 oder noch mehr Tabellenblätter. Um die Berechnungszeit in einem vernünftigen Bereich zu halten und zusätzlich eine sinnvolle Übersichtlichkeit zu schaffen, wurde auf die Erstellung einzelner Tabellenblätter für jede einzelne Mengenkombination verzichtet.

4.2.5 Liste der maximalen Hohlraumgehalte der einzelnen Stoffmengenkombinationen

Nach dem vollständigen Ablauf der im vorhergegangen Kapitel beschriebenen Berechnungsschritte, erhält man eine Liste mit den maximalen Hohlraumgehalten für jede einzelne Mengenkombination. Diese Liste ist im Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ in der *Spalte A*, sowie in weiterer Folge im Tabellenblatt „Packungsdichte“ in der *Spalte B*, jeweils in der dazugehörigen Zeile in der auch die entsprechende Kombination aufgelistet ist, zu sehen (siehe auch Abbildung 4.23).

	A	B	C	D
1	max.-	CEM_1	Microsilica_1	QM_1
2	Hohlraumgeh	20 - 25 %	0 - 100 %	64 - 70 %
3				
4	0,04619144	20	10	70
5	0,05229941	20	12	68
6	0,05840738	20	14	66
7	0,06451534	20	16	64
8	0,04319064	21	9	70
9	0,0492986	21	11	68
10	0,05540657	21	13	66
11	0,06151454	21	15	64
12	0,04018983	22	8	70
13	0,0462978	22	10	68
14	0,05240576	22	12	66
15	0,05851373	22	14	64
16	0,03718902	23	7	70
17	0,04329699	23	9	68
18	0,04940496	23	11	66
19	0,05551293	23	13	64
20	0,03958505	24	6	70
21	0,04029619	24	8	68
22	0,04640415	24	10	66
23	0,05251212	24	12	64

maximaler Hohlraumgehalt der einzelnen Stoffmengengemische

Abbildung 4.23 Liste mit den maximalen Hohlraumgehalten für jede einzelne Mengenkombination im Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“

Als letzter Schritt bleibt die Ermittlung des minimalen Wertes aus dieser Liste. Im oben angeführten Beispiel wäre das die *Stoffmengenkombination 13* in der *Zeile 16*, mit dem minimal erreichbaren Hohlraumgehalt $h_{s,min}$ = *0,03718902*, bei einer Zusammensetzung von 23 % Zement *CEM_1*, 7 % *Microsilica_1* und 70 % Quarzmehl *QM_1*. Zur besseren Übersicht hinterlegt das Programm den minimalen Wert des Hohlraumgehaltes im Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ automatisch mit der Farbe Grün.

Daraus kann mit Hilfe der nachfolgend angeführten Formel die Packungsdichte berechnet werden:

$$D = \frac{1}{1 + \min(h_{s,i,max})} \quad \rightarrow \quad D = \frac{1}{1 + 0{,}03718902} = 0{,}96414441$$

D ..... Packungsdichte

min($h_{s,i,max}$) ... minimal möglicher Hohlraumanteil aus allen berechneten Stoffmengenkombinationen

Im vorliegenden Fall ist also die maximale Packungsdichte gleich 96,414 % bei einer Stoffmengenkombination von 23 % Zement *CEM_1*, 7 % *Microsilica_1* und 70 % Quarzmehl *QM_1*.

4.2.6 Erstellen des Tabellenblattes „Packungsdichte“

Zusammenfassend wird noch ein neues Tabellenblatt mit dem Namen „Packungsdichte“ erstellt, in dem sämtliche Stoffmengenkombinationen nochmals aufgelistet werden. In *Spalte B* steht abermals der maximale Hohlraumgehalt für die jeweilige Kombination. Zusätzlich wird in *Spalte A* für jedes ermittelte Stoffgemisch der theoretisch erzielbare Wert der Packungsdichte ausgegeben. Der minimale Wert des Hohlraumgehaltes aus dieser Liste und die maximale Packungsdichte werden in gewohnter Weise grün hinterlegt dargestellt.

Abbildung 4.24 zeigt das Beschriebene nochmals deutlich.

	A	B	C	D	E	F
1	max.	max.-	CEM_1	Microsilica_1	QM_1	
2	Packungsdicl	Hohlraumge	20 - 25 %	0 - 100 %	64 - 70 %	
3						
4	95,5848003	0,04619144	20	10	70	
5	95,0299878	0,05229941	20	12	68	
6	94,4815789	0,05840738	20	14	66	
7	93,9394633	0,06451534	20	16	64	
8	95,8597562	0,04319064	21	9	70	
9	95,3017565	0,0492986	21	11	68	
10	94,7502155	0,05540657	21	13	66	
11	94,2050217	0,06151454	21	15	64	
12	96,1362985	0,04018983	22	8	70	
13	95,5750841	0,0462978	22	10	68	
14	95,0203841	0,05240576	22	12	66	
15	94,4720857	0,05851373	22	14	64	
16	96,414441	0,03718902	23	7	70	
17	95,849984	0,04329699	23	9	68	
18	95,2920978	0,04940496	23	11	66	
19	94,7406683	0,05551293	23	13	64	
20	96,1922256	0,03958505	24	6	70	
21	96,1264699	0,04029619	24	8	68	
22	95,5653699	0,04640415	24	10	66	
23	95,0107824	0,05251212	24	12	64	
24	95,1316782	0,05117456	25	5	70	
25	96,4045555	0,03729538	25	7	68	

Abbildung 4.24 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Packungsdichte“ mit dem minimal erreichbaren Hohlraumgehalt und der maximalen Packungsdichte grün hinterlegt dargestellt

4.3 Endergebnis

Wie schon in Kapitel 4.1.10 Berechnungsergebnis vorweg genommen, springt das Programm zum Schluss der Berechnung wieder zur Eingabemaske zurück. Es erscheint das in Kapitel 4.1.10 Berechnungsergebnis in Abbildung 4.14 gezeigt Fenster mit dem Hinweis, dass die Berechnung erfolgreich war. Zusätzlich wird die maximal mögliche Packungsdichte angezeigt. Darunter steht jene Stoffkombination, mit der dieser Wert theoretisch erreicht werden kann.

Durch Klicken auf den OK-Button ist die Berechnung vollständig abgeschlossen. Man befindet sich wieder im Tabellenblatt „Eingabe“. Dort wird das Ergebnis nochmals in der *Spalte M* angezeigt. In der *Zelle 6/M* kann die maximal erreichbare Packungsdichte nachgelesen werden. Zur Verdeutlichung wurde

dieser Wert bzw. diese Zelle grün hinterlegt. Jeweils in den Zeilen neben den ausgewählten Stoffen sind die zugehörigen errechneten Prozentwerte ersichtlich. Abbildung 4.25 zeigt einen vollständigen Ausdruck des Eingabeblattes inklusive ausgewerteter Ergebnisse.

Nun kann das Ergebnis gespeichert werden, oder das Eingabeblatt mit den ermittelten Ergebnissen ausgedruckt werden. Beim Speichern ist darauf zu achten, der Datei einen neuen Namen zu geben. Damit wird sichergestellt, dass die Originaldatei keinen Schaden nimmt. Alternativ kann durch Drücken auf den „Daten neu laden“ – Button direkt eine neue Berechnung gestartet werden. Dabei werden alle Ergebnisse gelöscht. Die Eingabedaten können erneut eingegeben werden.

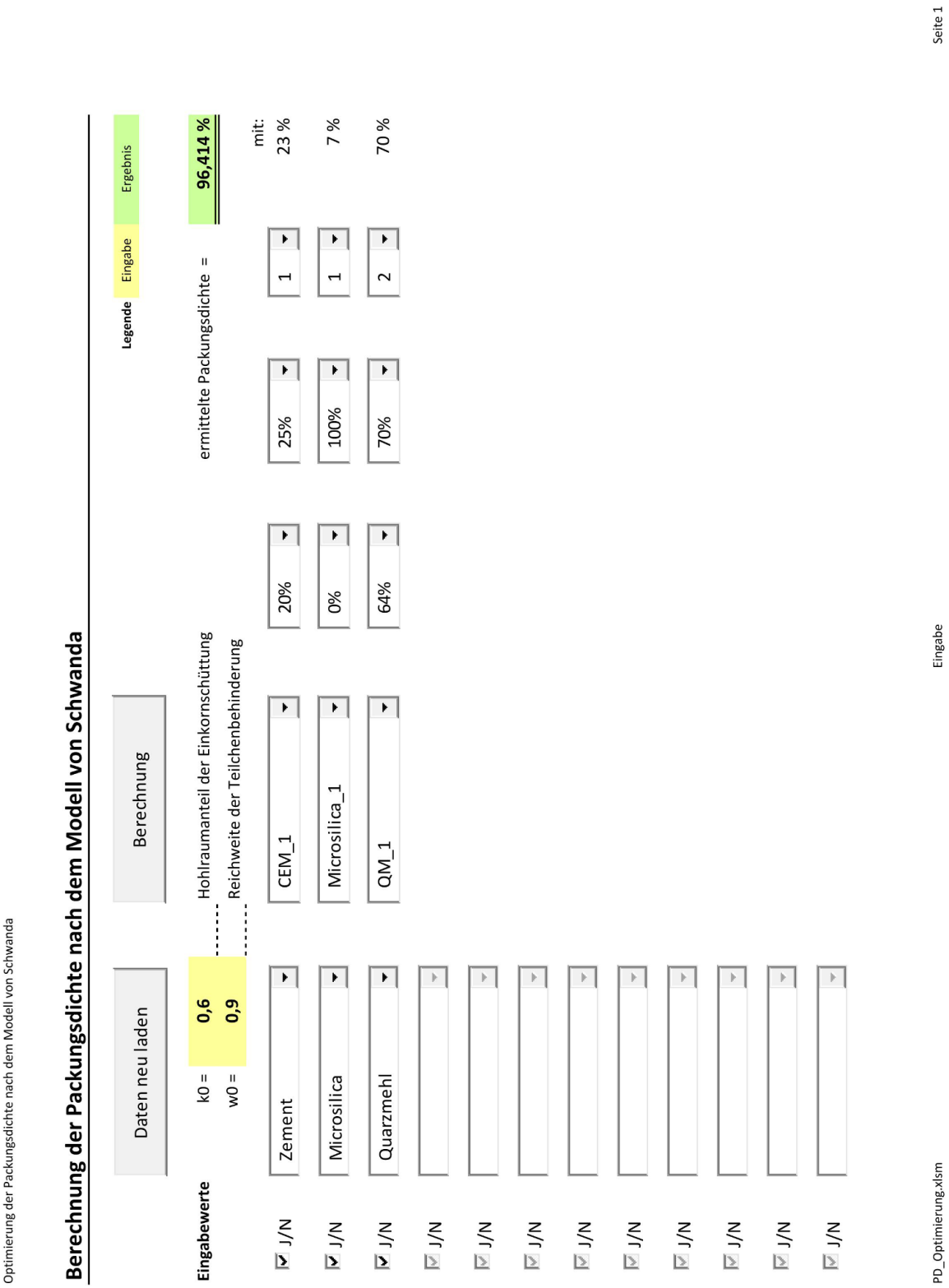


Abbildung 4.25 Ausgabeblatt mit sämtlichen Eingabewerten und Ergebnissen.

5 Ausgewertete Beispiele und Analyse

Im Kapitel 4 „Entwicklung eines EDV-Programmes zur Optimierung der Packungsdichte“ wurde im Zuge der Programmbeschreibung anhand eines Beispiels eine Packungsdichte von über 96 % ermittelt. Dieser Wert erscheint unrealistisch groß, da er sich nahe der theoretisch maximal möglichen Packungsdichte von 100 % bewegt. Es stellt sich demnach die Frage, aufgrund welcher Faktoren ein derart hoher Wert erreicht wird.

Bei genauer Betrachtung der Eingangsparameter Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 und Hohlraumanteil der Einkornschüttung k_0 erkennt man, dass beide Werte für die Berechnung des Beispiels nicht näher angepasst wurden, sondern auf den Standardwerten belassen wurden. Wobei als Standard die Werte 0,9 für w_0 und 0,6 für k_0 aus dem Kapitel 3.2.1.2 „Einfluss der Teilchenbehinderung“ herangezogen wurden. In den folgenden Kapiteln wird der Einfluss der Eingangsparameter genauer betrachtet.

5.1 Einfluss der Reichweite der Teilchenbehinderung w_0

Die Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 ist jener Bereich, in dem sich Grund- und Beikorn aufgrund ihrer Größenverhältnisse zueinander gegenseitig beeinflussen. Sie ist abhängig vom Verhältnis zwischen Grundkorngröße x_s und der Grenzkorngröße x_w, ab welcher keine Teilchenbehinderung mehr stattfindet. Zusätzlich wird auch die Kornform durch diesen Faktor berücksichtigt.

Reschke geht bei seinen Untersuchungen davon aus, dass sich fast alle Körner gegenseitig beeinflussen[167]. Demnach wären die Bereichsgrenzen zum einen die Kornklasse mit dem größten Korndurchmesser x_{max} und zum anderen jene Kornklasse mit dem kleinsten Durchmesser x_{min} der Kornverteilung der zu berechnenden Stoffe im Berechnungsprogramm. Daraus ergibt sich die nachstehende Formel:

[167] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.58

$$w = \log\left(\frac{x_s}{x_w}\right) = \log\left(\frac{x_{max}}{x_{min}}\right) = \log\left(\frac{500}{0{,}0005}\right) = 6$$

w ..... Reichweite der Teilchenbehinderung

x_s ..... Grundkorngröße

x_w ..... Grenzkorngröße

x_{max} ..... maximaler Korndurchmesser der jeweiligen Kornverteilung

x_{min} ..... minimaler Korndurchmesser der jeweiligen Kornverteilung

Das heißt, bei der Annahme einer Reichweite der Teilchenbehinderung von $w = 6$, wird das größte Teilchen mit einem Korndurchmesser von 500 mm in einem Korngemisch, auch noch vom kleinsten Teilchen mit 0,5 µm Korndurchmesser beeinflusst.

Im Beispiel der Programmbeschreibung wurde für die Berechnung ein Wert von 0,9 für die Reichweite der Teilchenbehinderung angenommen. Dieser Wert scheint offensichtlich zu gering zu sein, da die berechnete maximale Packungsdichte von rund 96,4 % unerreichbar hoch erscheint (siehe Abbildung 5.1).

Berechnung der Packungsdichte nach dem Modell von Schwanda

	Daten neu laden		Berechnung				Legende	Eingabe / Ergebnis
Eingabewerte	k0 =	0,6	Hohlraumanteil der Einkornschüttung			ermittelte Packungsdichte =		96,414 %
	w0 =	0,9	Reichweite der Teilchenbehinderung					
								mit:
J/N	Zement		CEM_1	20%	25%	1		23 %
J/N	Microsilica		Microsilica_1	0%	100%	1		7 %
J/N	Quarzmehl		QM_1	64%	70%	2		70 %

Abbildung 5.1 Ermittelte Packungsdichte bei einer Reichweite der Teilchenbehinderung von $w_0 = 0{,}9$ und einem Hohlraumanteil der Einkornschüttung $k_0 = 0{,}6$

Eine weitere Berechnung mit der von *Reschke* vorgeschlagene Reichweite der Teilchenbehinderung von $w = 6$, bei der sich alle Teilchen gegenseitig beeinflussen, ergibt einen Wert von 66,8 % für die maximale Packungsdichte. Bei dieser Berechnung wurden alle übrigen Parameter unverändert gelassen. Auch die Zusammensetzung der Komponenten wurde beibehalten (siehe Abbildung 5.2).

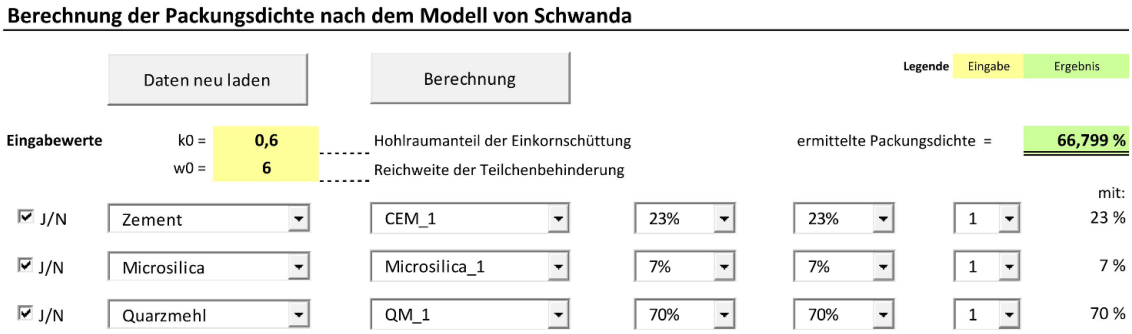


Abbildung 5.2 Ermittelte Packungsdichte bei einer Reichweite der Teilchenbehinderung von *w = 6*

Vergleicht man die beiden Werte ergibt sich ein Unterschied von fast 30 %!

Dieser Umstand kann dadurch begründet werden, dass bei der ersten Berechnung sich die Körner nur vereinzelt gegenseitig beeinflussen. Dadurch kommt es zu einer fast idealen Verteilung der Körner untereinander, wodurch nur geringe Hohlräume entstehen. Dementsprechend ist die Packungsdichte sehr hoch. Beim zweiten Beispiel hingegen haben die Körner jeder einzelnen Korngruppe Einfluss auf die Körner aller anderen Korngruppen. Dadurch ergeben sich ein großer Hohlraumanteil und eine geringe Packungsdichte. Es ist sicherlich fragwürdig, ob eine solche Beeinflussung bei einem derart großen Unterschied der Korngrößen von 1:1.000.000 wirklich noch stattfinden kann. Zur Feststellung wie weit die Beeinflussung in Wirklichkeit vorhanden ist, bedarf es einer Vielzahl von Versuchen. Dieser Punkt sollte in weiteren Untersuchungen noch abgeklärt werden.

Zusätzlich fällt auf, dass bei einer Änderung des Eingangsparameters w_0, sich die maximal mögliche Packungsdichte bei einer anderen Mengenzusammensetzung der ausgewählten Stoffe ergibt. Der Maximalwert wird bei einem Zementanteil von 20 %, einer Menge von Microsilica von 16 % und einem Anteil an Quarzmehl von 64 % erreicht (siehe Abbildung 5.3). Im Vergleich dazu ergeben sich die Werte aus der ersten Berechnung mit $w_0 = 0{,}9$ zu 23 % Zement, 7 % Microsilica und 70 % Quarzmehl. Dieser Umstand kann dadurch erklärt werden, dass sich Teilchen mit einem großen Unterschied des Korndurchmessers zueinander, bei einem w_0 von 0,9, nicht mehr gegenseitig beeinflussen. Dadurch ergeben sich andere, bessere Mengenkonstellationen.

Berechnung der Packungsdichte nach dem Modell von Schwanda

	Daten neu laden		Berechnung			Legende	Eingabe	Ergebnis
Eingabewerte	k0 =	0,6	Hohlraumanteil der Einkornschüttung		ermittelte Packungsdichte =		67,824 %	
	w0 =	6	Reichweite der Teilchenbehinderung					
								mit:
J/N	Zement		CEM_1	20%	25%	1		20 %
J/N	Microsilica		Microsilica_1	0%	100%	1		16 %
J/N	Quarzmehl		QM_1	64%	70%	2		64 %

Abbildung 5.3 Maximale Packungsdichte bei unterschiedlicher Zusammensetzung der ausgewählten Stoffe

Anhand dieser einfachen Beispiele zeigt sich die enorme Wichtigkeit der richtigen Wahl des Eingabeparameters w_0. Abbildung 5.4 veranschaulicht die Veränderung der Packungsdichte D in Abhängigkeit der Reichweite der Teilchenbehinderung w_0. Für die Berechnungen wurden alle anderen einzugebende Parameter unverändert belassen. Lediglich w_0 wurde jeweils um den Wert 0,5 schrittweise erhöht.

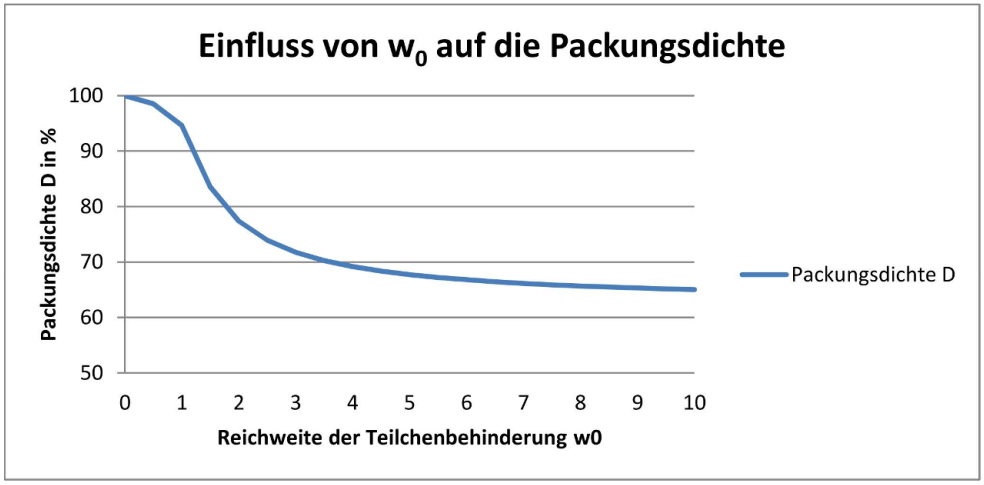


Abbildung 5.4 Erreichbare Packungsdichte D in Abhängigkeit der Reichweite der Teilchenbehinderung w_0

Die Grafik zeigt einen logarithmischen Zusammenhang der beiden Faktoren.

Bei einer großen Reichweite der Teilchenbehinderung kommt es selbst bei sehr weit auseinanderliegenden Korngrößen zweier Kornklassen zu Verdrängungsprozessen. Dadurch wird die Packungsdichte verringert. Ab Werten für w_0 kleiner als 3 steigt die Packungsdichte stark an. Das heißt, immer mehr kleinere Teilchen können die Hohlräume zwischen den größeren Teilchen

ausfüllen, ohne dass dabei eine Verdrängung stattfindet. Lässt man die Reichweite der Teilchenbehinderung gegen Null gehen, nimmt auch die Zahl der sich gegenseitig beeinflussenden Kornklassen ab. Die Hohlräume einer Kornfraktion können durch die Teilchen der anderen Kornfraktionen vollständig ausgefüllt werden. Theoretisch könnte dadurch eine Packungsdichte von 100% erreicht werden.

5.2 Einfluss des Hohlraumanteils der Einkornschüttung k_0

Der Parameter *k* gibt den Hohlraumanteil der einzelnen Kornklassen bzw. einer Einkornschüttung im Verhältnis zu ihrem Feststoffgehalt an. Wie schon in Kapitel 3.2.1.2 „Einfluss der Teilchenbehinderung“ beschrieben berechnet sich dieser Wert nach folgender Formel:

$$k_0 = \frac{\varepsilon}{D * 100} = \frac{\varepsilon}{100 - \varepsilon}$$

k_0 ..... Hohlraumanteil der Einkornschüttung

ε ..... Hohlraumgehalt [Vol.-%]

D ..... Packungsdichte

Beim verwendeten Rechenmodell von *Schwanda* wird davon ausgegangen, dass jede Kornklasse vereinfachend als Einkornschüttung betrachtet werden kann. Werden entsprechend viele und eng aneinander liegende Kornklassen gewählt, wird es durch diese Vereinfachung zu keinem wesentlichen Fehler kommen.

Nun kann über Versuche der Hohlraumanteil der Einkornschüttung für jede einzelne Kornklasse leicht ermittelt werden. Der Mittelwert über alle verwendeten Kornklassen ergibt schlussendlich einen sinnvollen Wert für den Eingangsparameter k_0.

Eine einfache Untersuchung der Veränderung der errechneten Packungsdichte aufgrund unterschiedlicher Werte für k_0 ergibt das in Abbildung 5.5 gezeigte Bild.

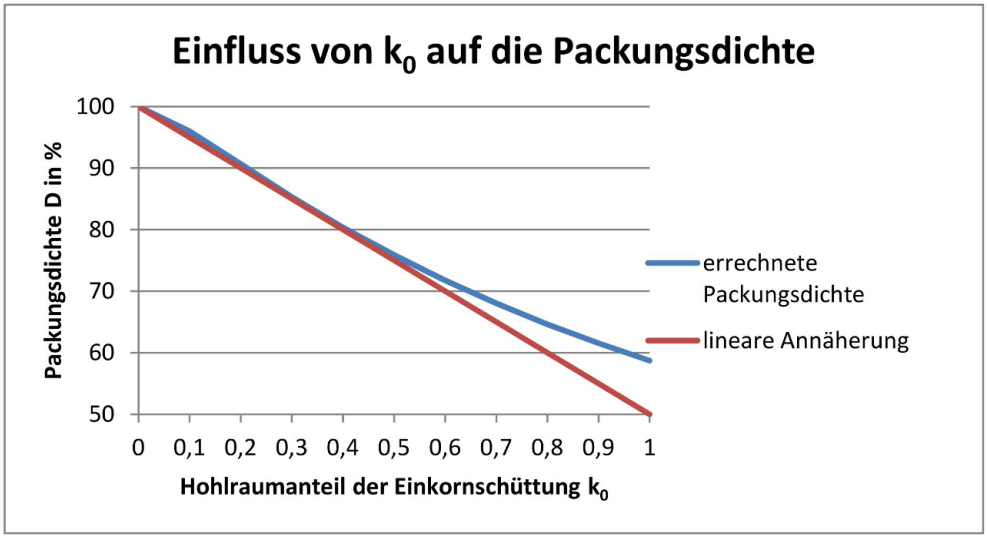


Abbildung 5.5 Einfluss des Hohlraumanteils der Einkornschüttung k_0 auf die Packungsdichte *D*

Zwischen den Werten 0,0 bis 0,35 ist eine lineare Abnahme der Packungsdichte zu erkennen. Erst ab einem höheren Hohlraumanteil der Einkornschüttung entfernt sich der Verlauf von der Geraden. Der geradlinige Verlauf im Bereich von niedrigen k_0 Werten kann folgendermaßen erklärt werden. Durch den sehr geringen vorhandenen Hohlraumanteil einer einzelnen Kornklasse gibt es für die Körner einer anderen Kornklasse kaum die Möglichkeit diesen Hohlraum auszufüllen. Das heißt, es besteht nur ein sehr geringes Potential für eine Verringerung des Hohlraumanteils durch Beimengung einer zweiten Kornklasse. Die Packungsdichte wird hauptsächlich vom Hohlraumanteil der Einkornschüttung bestimmt. Ab Werten von k_0 größer als 0,35 können viel mehr Teilchen in die Zwischenräume eindringen, wodurch die Packungsdichte verringert werden kann. Die Abweichung von der Geraden wird größer.

Grundsätzlich sind Werte unter 0,35 nur theoretischer Natur. Geht man von einer monodispersen Kugelpackung aus, müsste der Wert für k_0 in Abhängigkeit der geometrischen Anordnung der Kugeln zwischen 0,35 und 0,91 liegen, da lt. *Schüßler* bzw. *Reschke* eine maximale Packungsdichte zwischen 52,36 % bei einer kubischen Kugelpackung bzw. 74,05 % für das rhombische System erreicht werden kann. [168] [169] Da beide Systeme Idealisierungen darstellen, ist damit zu

[168] Vgl. *Schüßler K.H.*, *Mcedlov-Petrosjan O.P.*, Der Baustoff Beton – Grundlagen der Strukturbildung und der Technologie, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1990, S.141-161

rechnen, dass die tatsächliche Packungsdichte zwischen diesen Werten liegt. Durch eine Reihe von Versuchen hat McGeary zudem festgestellt, dass die maximale Packungsdichte einer monodispersen Kugelpackung 62,5 % beträgt. [170] [171] Daraus ergibt sich für k_0:

$$k_0 = \frac{\varepsilon}{D * 100} = \frac{37{,}5}{62{,}5} = 0{,}6$$

Das heißt, die in der Programmbeschreibung getroffene Wahl für $k_0 = 0{,}6$, kann als sinnvoll betrachtet werden.

5.3 Korngemische aus drei verschiedenen Quarzmehlen

Anhand einer weiteren Versuchsreihe werden drei unterschiedliche Quarzmehle *QM3600*, *QM10000*, *QM16900* betrachtet. In Abbildung 5.6 ist die jeweilige Sieblinie der einzelnen Quarzmehle dargestellt. Alle drei Stoffe zeigen eine sehr weitgestufte Kornzusammensetzung mit feiner Körnung.

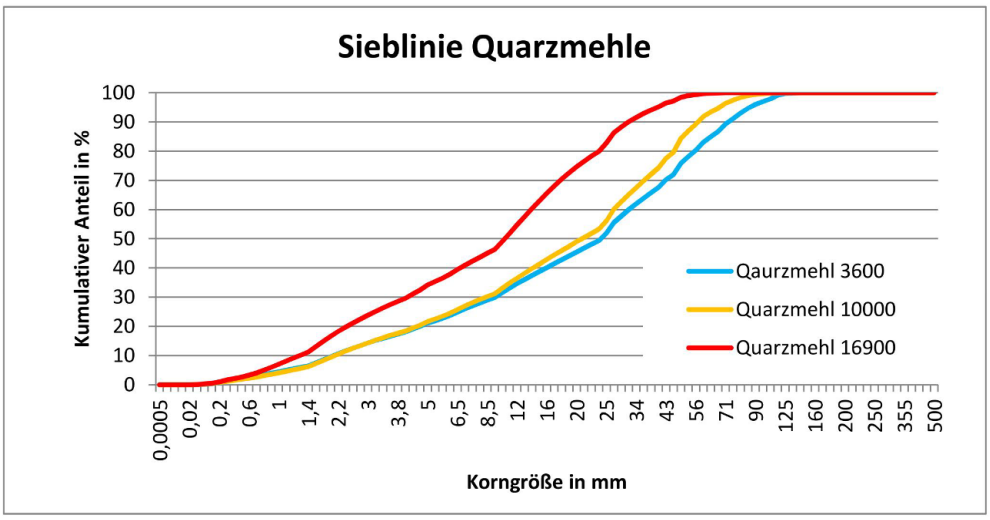


Abbildung 5.6 Sieblinien der Quarzmehle *QM3600* (blau), *QM10000* (orange), *QM16900* (rot)

[169] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.43

[170] Vgl. *McGeary R.K.*, Mechanical Packing of Spherical Particles, Journal of the American Ceramic Society 44/1962 Nr.10, S.513-522

[171] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000, S.43

Die beiden Quarzmehle *QM3600* und *QM10000* unterscheiden sich nur sehr geringfügig voneinander. Das Quarzmehl *QM16900* fällt durch einen etwas höheren Siebdurchgang im Bereich zwischen den Korndurchmessern 0,7 bis 8,5 mm auf. Der größte Siebdurchgang ist beim Quarzmehl *QM16900* im Bereich zwischen 8,5 und 25 mm zu verzeichnen. Bei den beiden anderen Quarzmehlen kann ein ähnlicher Durchgang erst ab Korngrößen von 25 bis 56 mm festgestellt werden.

Aus den Sieblinien der drei Stoffe kann geschlossen werden, dass aufgrund der sehr ähnlichen Kornzusammensetzung der Quarzmehle *QM3600* und *QM10000*, eine Mischung aus diesen beiden Stoffen nur eine geringfügige Verbesserung der Packungsdichte mit sich bringt. Fügt man jedoch eines der beiden Quarzmehle mit dem Quarzmehl *QM16900* zusammen, lässt das ein höheres Potential zur Verbesserung der Packungsdichte vermuten.

Zur Überprüfung dieser These betrachtet man zunächst die erreichbare Packungsdichte der drei Quarzmehle alleine. Dafür wird jeder Stoff einzeln in das Berechnungsprogramm eingegeben und berechnet. Als Eingangsparameter wurde in allen drei Fällen der Wert 0,9 für den Hohlraumanteil der Einkornschüttung k_0 und der Wert 2 für die Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 angenommen. Abbildung 5.7 zeigt die maximal mögliche Packungsdichte für das Quarzmehl *QM3600*. Sie errechnet sich zu 63,977 %.

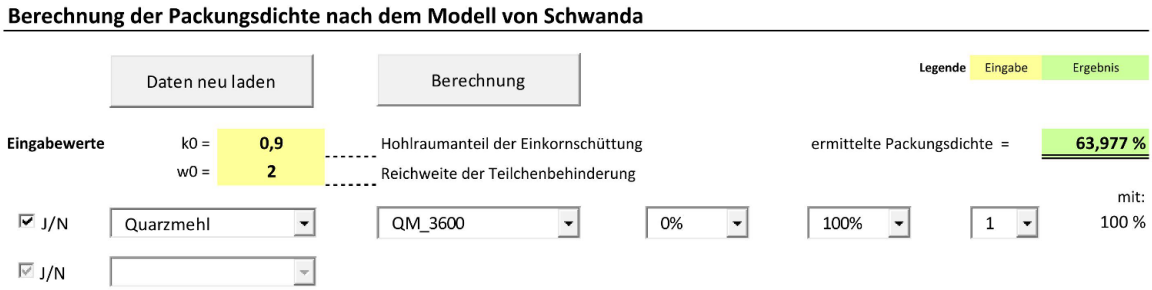


Abbildung 5.7 Errechnete maximale Packungsdichte von Quarzmehl *QM3600*

Eine weitere Berechnung ergibt 63,125 % als maximale Packungsdichte für das Quarzmehl *QM10000* (siehe Abbildung 5.8).

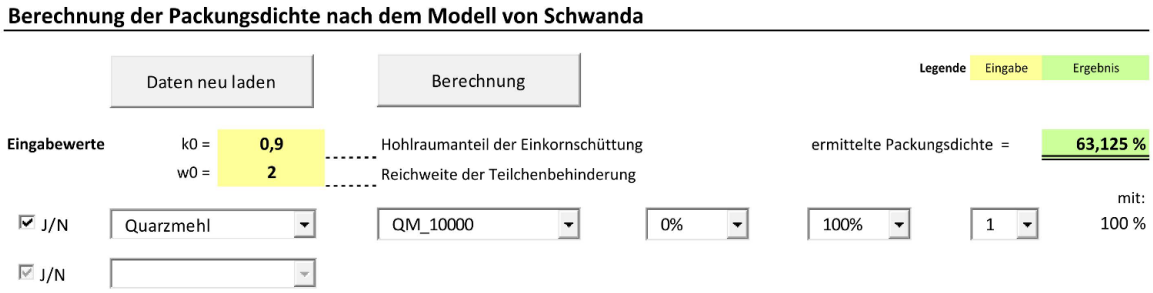


Abbildung 5.8 Errechnete maximale Packungsdichte von Quarzmehl *QM10000*

Beim Quarzmehl *QM16900* erhält man den geringsten Wert, 62,443 % (siehe Abbildung 5.9).

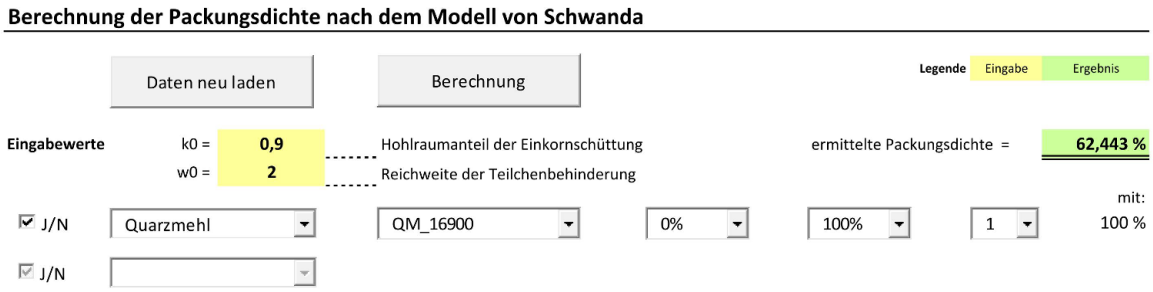


Abbildung 5.9 Errechnete maximale Packungsdichte von Quarzmehl *QM16900*

Die Packungsdichten unterscheiden sich demnach nur unwesentlich voneinander. Es ergibt sich ein Unterschied von rund 1,5 %. Nun stellt sich die Frage, ob durch eine Mischung dieser drei Quarzmehle eine höhere Dichte erreicht werden kann.

Dazu werden in das Berechnungsprogramm alle drei Quarzmehle eingegeben. Die Eingangsparameter werden unverändert bei $w_0 = 2$ und $k_0 = 0{,}9$ belassen. Um eine Aussage über das optimale Mischungsverhältnis zu erhalten, werden die minimalen und maximalen Mengenverhältnisse für alle drei Stoffe von 0 bis 100 % eingestellt. Als Schrittweite erscheint ein Wert von Fünf sinnvoll. Ein geringerer Wert würde eine erhebliche Anzahl von zusätzlichen Kombinationen erzeugen, wodurch eine enorme Rechenzeit benötigt würde. Die Eingabe ergibt das in Abbildung 5.10 dargestellt Ergebnis.

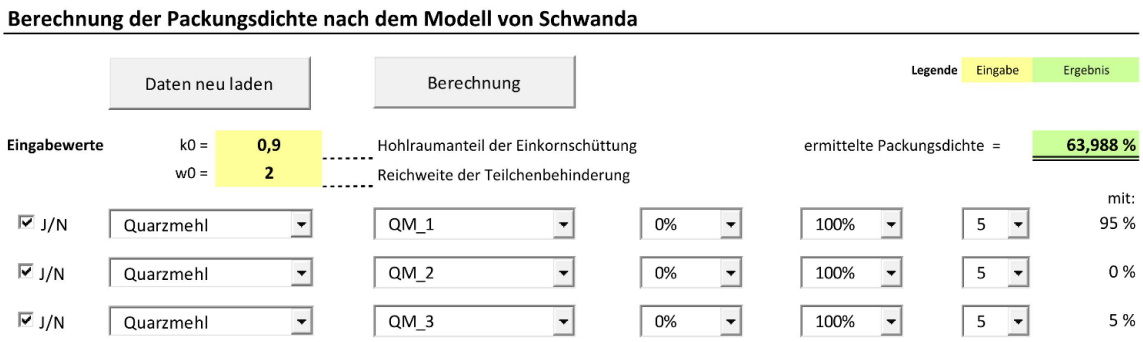


Abbildung 5.10 Optimale Mengenkombination bei einer Mischung aus drei verschiedenen Quarzmehlen (*QM3600*, *QM10000*, *QM16900*).

Anders als vermutet ergibt sich beinahe kein Unterschied durch die Mischung aus den drei Quarzmehlen. Der maximale Wert für die Packungsdichte wird bei einem Mischungsverhältnis von 95 % *QM3600*, 0 % *QM10000* und 5 % *QM16900* erreicht und beträgt 63,988 %. Auf Grund der Mengenverhältnisse, wonach fast ausschließlich das Quarzmehl *QM3600* zum Einsatz kommt, kann auch im Siebliniendiagramm kein Unterschied zwischen der Sieblinie von *QM3600* und jener der Mischung erkannt werden. In Abbildung 5.11 ist die Sieblinie mit der optimalen Packungsdichte grün dargestellt.

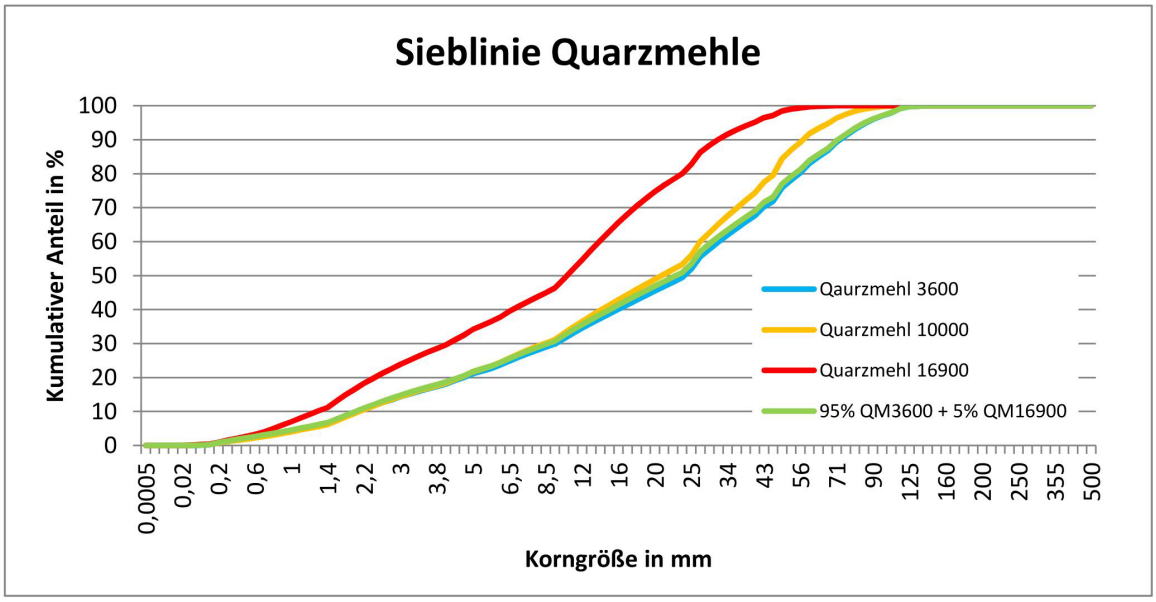


Abbildung 5.11 Sieblinien von *QM3600* (blau), *QM10000* (orange), *QM16900* (rot), sowie der Mischung von 95 % *QM3600* und 5 % *QM16900* (grün).

5.4 Gemisch aus Zement, Microsilica und Quarzmehl

Ein weiteres Beispiel mit einem Gemisch aus Zement, Microsilica und Quarzmehl mit einem Siebliniendiagramm der drei Stoffe entsprechend Abbildung 5.12 soll ebenfalls untersucht werden. Während das Microsilica ein sehr enggestuftes und sehr feines Korngemisch darstellt, sind der Zement und das Quarzmehl weitgestuft und etwas gröber. Die enggestufte Struktur des Microsilicas lässt eine niedrigere maximale Packungsdichte als bei den beiden anderen Stoffen vermuten. Der Zement ist etwas feiner als das Quarzmehl. Der größte Siebdurchgang lässt sich im Bereich zwischen 10 und 15 mm feststellen. Im Vergleich dazu weist das Quarzmehl die größte Steigung im Diagramm zwischen 25 und 60 mm auf. Aufgrund der ähnlichen Sieblinien kann über die erreichbare Packungsdichte nur bedingt eine Aussage getroffen werden.

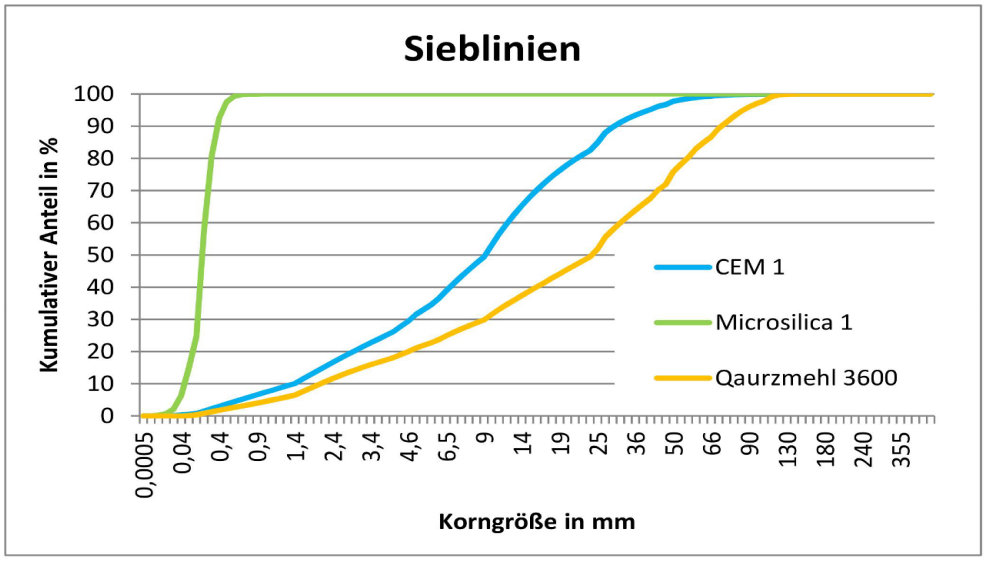


Abbildung 5.12 Sieblinien von Zement *CEM 1* (blau), *Microsilica 1* (grün) und *QM3600* (orange).

Um die Vermutungen über die erreichbaren Werte der Packungsdichte zu überprüfen, wird zunächst wiederum jeweils eine Berechnung für die Einzelstoffe in gewohnter Vorgangsweise durchgeführt. Abbildung 5.13 zeigt die maximal mögliche Packungsdichte für den Zement *CEM 1* inklusive aller Eingangsparameter. Sie errechnet sich zu 61,823 %.

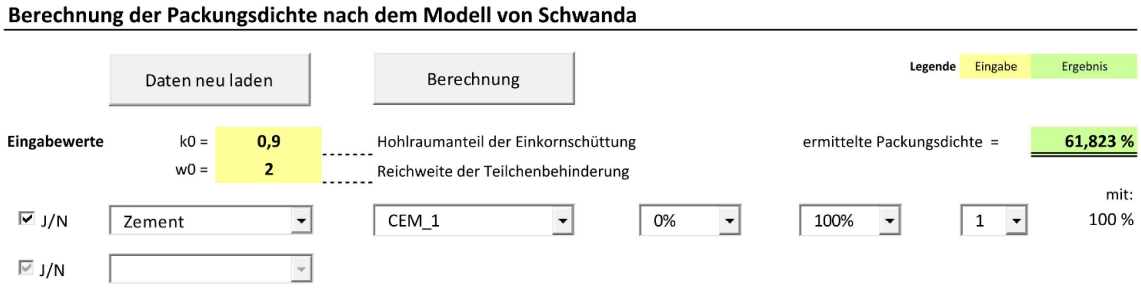


Abbildung 5.13 Errechnete maximale Packungsdichte von Zement *CEM 1*.

Für das Microsilica ergibt sich wie vermutet der geringste Wert. Er beträgt lediglich 57,623 % (siehe Abbildung 5.14). Im Vergleich zum Quarzmehl *QM3600*, welches in Abbildung 5.7 im Kapitel 5.3 „Korngemische aus drei verschiedenen Quarzmehlen“ dargestellt ist, ergibt sich ein Unterschied bei der erreichbaren Packungsdichte von über 6 %.

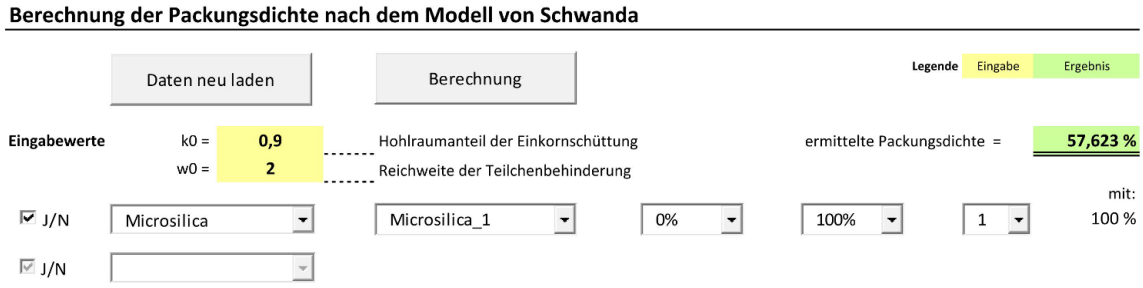


Abbildung 5.14 Errechnete maximale Packungsdichte von *Microsilica_1*.

Aufgrund der sehr feinen Struktur des Microsilicas kann davon ausgegangen werden, dass durch eine gezielte Beimengung dieses Stoffes, eine verbesserte Packungsdichte erreicht werden kann. Zur Überprüfung dieser Annahme wird eine neue Berechnung mit allen drei Stoffen durchgeführt. Die möglichen Mengenanteile werden wiederum jeweils von 0 bis 100 % eingestellt. Die Werte für k_0 und w_0 bleiben unverändert bei 0,9 bzw. 2,0.

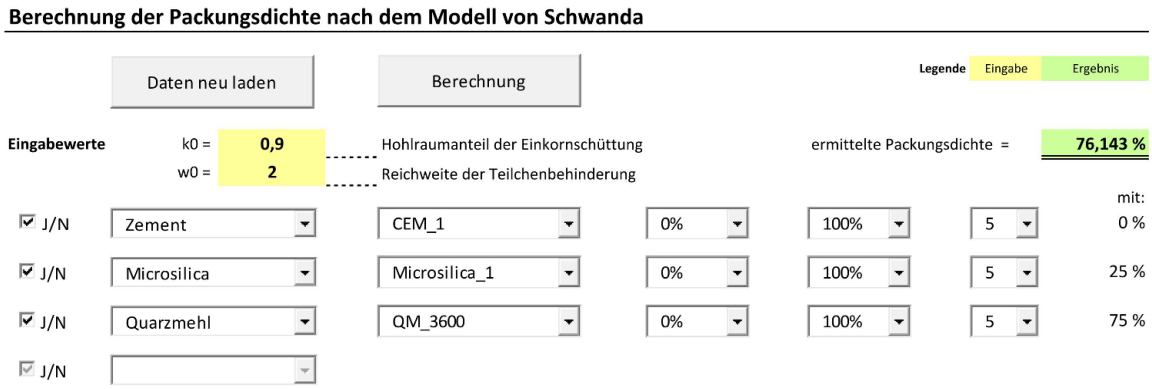


Abbildung 5.15 Optimale Mengenkombination bei einer Mischung aus Zement *CEM 1*, *Microsilica 1* und Quarzmehl *QM3600*.

Wie vermutet kann die maximale Packungsdichte durch die Wahl eines optimalen Mischungsverhältnisses deutlich gesteigert werden. Bei einem Verhältnis von 25 % *Microsilica 1* und 75 % Quarzmehl *QM3600* erhält man einen Wert von 76,143 %. Das ist eine Differenz von 18,52 % gegenüber dem Microsilica als Einzelstoff. Auch im Verhältnis zum Quarzmehl alleine kann eine Steigerung von über 12 % erreicht werden. Grund dafür dürfte der Umstand sein, dass die feinen Teilchen des Microsilicas in die Zwischenräume der Quarzmehlpartikel eindringen können und somit den verbleibenden Hohlraumgehalt vermindern. Allerdings kann ein zu hoher Prozentsatz des Microsilicas auch zu einer Verschlechterung führen. Sobald es zu einer Verdrängung der Quarzmehlteilchen kommt, wird die eigene maximale Packungsdichte des Microsilicas maßgebend und der Wert für die erreichbare Dichte der Mischung sinkt. Ein Auszug aus dem Tabellenblatt „Packungsdichte“ des Berechnungsprogrammes zeigt diesen Umstand (siehe Abbildung 5.16). Ab einem optimalen Gehalt an Microsilica von 25 % nimmt der Wert für die Packungsdichte kontinuierlich ab.

max. Packungsdichte	max.- Hohlraumgehalt	CEM_1 0 - 100 %	Microsilica_1 0 - 100 %	QM_3600 0 - 100 %
63,97698761	0,563062028	0	0	100
66,63255919	0,500767811	0	5	95
69,31576728	0,442673203	0	10	90
71,90074193	0,390806232	0	15	85
74,25703907	0,346673679	0	20	80
76,14261941	0,313324926	0	25	75
75,99999026	0,315789642	0	30	70
74,55578416	0,341277557	0	35	65
73,03565573	0,369194252	0	40	60
71,44327385	0,399711892	0	45	55
69,91884713	0,430229532	0	50	50
68,45811645	0,460747172	0	55	45
67,05717133	0,491264812	0	60	40
65,71241498	0,521782452	0	65	35
64,42053344	0,552300092	0	70	30
63,17846835	0,582817732	0	75	25
61,98339274	0,613335372	0	80	20
60,83268957	0,643853012	0	85	15
59,72393261	0,674370652	0	90	10
58,65486932	0,704888292	0	95	5
57,62340564	0,735405933	0	100	0

Abbildung 5.16 Auszug aus dem Tabellenblatt „Packungsdichte“.

Für die Herstellung eines ultrahochfesten Betons stellt das oben dargestellt Mischungsverhältnis natürlich keinen sinnvollen Wert dar, da der Zementanteil gänzlich fehlt. Aus der Tabelle „Packungsdichte“ kann aber ein entsprechendes Mischungsverhältnis gesucht werden, dass über einen brauchbaren Zementanteil verfügt und dennoch eine hohe Packungsdichte erreicht. Zum Beispiel kann bei einem Anteil von 25 % Zement *CEM 1*, 30 % *Microsilica 1* und 45 % Quarzmehl *QM3600* eine Packungsdichte von 74,5 % erreicht werden. Bei gleichem Zementanteil und nur 5 % Microsilica, sowie 70 % Quarzmehl, wird hingegen nur ein Wert von 66 % erreicht. Somit zeigt sich das Steigerungspotential durch die Wahl des richtigen Mischungsverhältnisses sehr deutlich.

Auch im Siebliniendiagramm ist der Unterschied der beiden Mischungen zu erkennen. Abbildung 5.17 zeigt, dass sich die Mischung mit nur 5 % Microsilica kaum von der Sieblinie des Quarzmehles *QM3600* unterscheidet. Demnach ist auch die Packungsdichte mit erreichbaren 66 % nur geringfügig höher als die 64 % des Quarzmehles alleine. Die Mischung mit 30 % Microsilica weist hingegen

einen deutlich höheren Feinanteil auf. Erst ab einem kumulativen Anteil von 30 % ist eine ähnlich Entwicklung der Kurven zu erkennen.

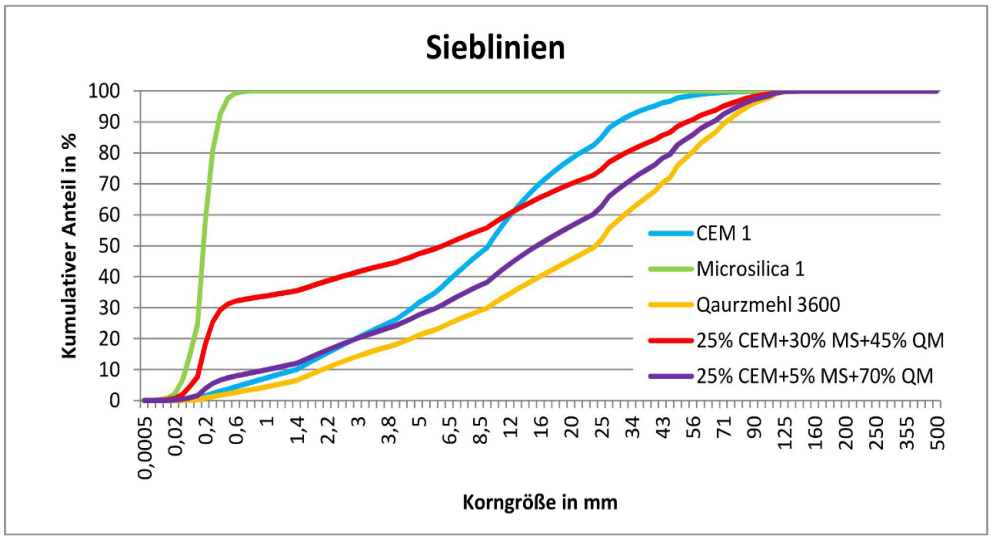


Abbildung 5.17 Sieblinien von *CEM 1* (blau), *Microsilica 1* (grün), Quarzmehl *QM3600* (orange), sowie einer Mischung von 25 % *CEM 1*, 30 % *Microsilica 1* und 45 % Quarzmehl *QM3600* (rot) und einer Mischung von 25 % *CEM 1*, 5 % *Microsilica 1* und 70 % Quarzmehl *QM3600* (violett).

5.5 Fazit und Ergebnis

Mit Hilfe des Berechnungsprogrammes kann sehr rasch eine Abschätzung über das optimale Mischungsverhältnis von unterschiedlichen Stoffen getroffen werden. Die Beispiele zeigen, dass es aufgrund der Wahl des Mengenverhältnisses der einzelnen Stoffe, zu großen Differenzen hinsichtlich der erzielbaren maximalen Packungsdichte kommen kann. Vor allem Stoffe mit sehr unterschiedlichen Sieblinienverläufen eignen sich gut für die Herstellung eines optimalen Gemisches in Hinblick auf den minimalen Hohlraumgehalt. Insbesondere die feine Struktur von Microsilica wirkt sich sehr positiv auf das Endergebnis aus. Hingegen führt eine Mischung aus zwei Stoffen mit sehr ähnlicher Kornverteilung zu keiner wesentlichen Verbesserung der Packungsdichte. Diese Ergebnisse decken sich auch mit den Erkenntnissen von *Reschke*[172].

Aus den Beispielen geht jedoch auch hervor, dass die Wahl der Eingangsparameter eine sehr große Auswirkung auf die Höhe der Packungsdichte hat. Diese sollten im Vorfeld für die Einzelstoffe durch Versuche genauestens

[172] Vgl. *Reschke Thorsten*, Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000

bestimmt werden um eine sinnvolle Wahl treffen zu können. Demnach kann für Einzelstoffe mit Hilfe des Berechnungsprogrammes eine relativ genaue Aussage über die erzielbare Packungsdichte getroffen werden. Für ein Stoffgemisch hingegen stellt sich die Bestimmung bedeutend schwieriger dar. Der Hohlraumanteil der Einkornschüttung eines Stoffgemisches, sowie die Reichweite der Teilchenbehinderung können lediglich aus den Werten der Einzelstoffe abgeschätzt werden. Erst nach der Ermittlung des optimalen Mischungsverhältnisses und nach der Herstellung dieses Gemisches, können die beiden Parameter durch Versuche bestimmt werden. Durch die neu ermittelten Werte kann es allerdings zu einer Veränderung des optimalen Mischungsverhältnisses kommen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Packungsdichte ist definiert durch das Verhältnis des Feststoffvolumens zum Gesamtvolumen einer Partikelschüttung, wobei das Gesamtvolumen aus dem Feststoffvolumen und dem Hohlraumgehalt besteht.

Die Höhe der Packungsdichte ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Sie wird beispielsweise erheblich durch die Kornverteilung der einzelnen Partikel bestimmt. Insbesondere die Feinstoffpartikel haben einen sehr starken Einfluss auf den Hohlraumgehalt. Im Allgemeinen gilt, je unterschiedlicher die Kornverteilung, desto geringer wird der Hohlraumgehalt der Partikelschüttung.

Weitere beeinflussende Faktoren sind die Kornform und die Oberflächenrauhigkeit. Eine raue und nicht exakt kugelförmige Oberfläche lässt feinere Partikel nicht mehr in die Zwischenräume der groben Partikel eindringen. Die groben Körner werden auseinander gedrängt. Dieser Effekt wird als Teilchenbehinderung bezeichnet.

Die übliche Mischungsberechnung nach *Fuller* und *Thompsen* berücksichtigt die genannten Faktoren nicht. Für eine Optimierung der Packungsdichte im Feinteilbereich ist diese Methode demnach nicht geeignet. Ein besser geeignetes Verfahren bildet das Modell von *Schwanda*. Hierbei werden diese Einflüsse anhand zweier Eingangsparameter berücksichtigt. Sowohl die Kornform und die Oberflächenrauigkeit werden durch den Hohlraumgehalt des Einkornstapels, als auch durch die Reichweite der Teilchenbehinderung abgebildet. Mit Hilfe des Rechenmodells von *Schwanda* kann der Hohlraumgehalt sowohl für stetig als auch für unstetig verteilte Korngemische berechnetet werden. Die Art des Kornes und die Kornverteilung müssen allerdings bekannt sein.

Dem im Zuge dieser Arbeit entwickelten Programm lag der Ansatz von *Schwanda* zugrunde. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens war es, dass die Berechnung mit Hilfe eines üblichen Tabellenkalkulationsprogrammes erfolgen konnte. Allerdings lag die Schwierigkeit bei der Entwicklung des Programmes vor allem daran, dass die Berechnung nicht nur für einen einzelnen Stoff funktionieren sollte, sondern auch für beliebig viele Stoffe in unterschiedlichster Kombination miteinander. Das heißt, es musste jede einzelne Mengenkombination berechnet werden, um daraus

die optimale Packungsdichte herauszufinden. Als Nachteil des Verfahrens stellte sich heraus, dass die beiden Eingabeparameter Hohlraumgehalt der Einkornschüttung k_0 und Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 bei der Berechnung für alle Kornklassen als konstant angenommen werden müssen. Somit konnte die unterschiedliche Kornform der einzelnen Kornfraktionen eines Partikelgemisches nicht berücksichtigt werden. Dadurch ist mit einem gewissen Fehler gegenüber einer wirklichkeitsnahen Partikelsimulation zu rechnen.

Die mit Hilfe des Programmes durchgeführten Berechnungen konnten die Erkenntnisse von *Reschke* bestätigen, dass sich mehrere Stoffe mit sehr unterschiedlichen Sieblinienverläufen sehr gut für die Herstellung eines optimalen Gemisches in Hinblick auf den minimalen Hohlraumgehalt eignen. Eine Mischung aus zwei Stoffen mit sehr ähnlicher Kornverteilung hingegen führte zu keiner wesentlichen Verbesserung der Packungsdichte.

Das entwickelte Berechnungsprogramm ermöglicht eine rasche und einfache Bestimmung der erreichbaren Packungsdichte sowohl von Einzelstoffen, als auch von Korngemischen. Durch eine gezielte Mengenauswahl der Einzelstoffe kann die Kornzusammensetzung derart verändert werden, dass ein möglichst geringer Hohlraum zwischen den einzelnen Partikeln bestehen bleibt. Das Berechnungsprogramm soll dabei als Hilfestellung dienen, diese optimale Zusammensetzung ohne aufwendige Versuchsreihen zu finden. Es können sowohl Feinstoffsieblinien als auch Zuschlagsstoffsieblinien optimiert werden, wodurch sich der gesamte Kornaufbau eines Betons gezielt zusammensetzen lässt.

Die in dieser Arbeit behandelten Beispiele zeigten das erhebliche Potential der Optimierung der Kornzusammensetzung in Hinblick auf die Maximierung der Packungsdichte. Durch Versuchsreihen gilt es in weiterer Folge abzuklären, in wie weit diese Optimierung Auswirkung auf die Festigkeitsentwicklung und die rheologischen Eigenschaften des Betons hat.

Die Richtigkeit der Ergebnisse für die Packungsdichte ist in erster Linie von den beiden Eingangsparametern Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 und Hohlraumanteil der Einkornschüttung k_0 abhängig. Für Einzelstoffe können diese Werte leicht durch Versuche ermittelt, oder anhand von Herstellerangaben

entnommen werden. Für Korngemische mit unbekannter Zusammensetzung bedarf es allerdings Erfahrungswerte bzw. einer guten Abschätzung. Es wird demnach eine größere Versuchsreihe benötigt, mit dem Ziel, eventuelle Abhängigkeiten und Zusammenhänge zu erkennen, um daraus Schlüsse für die Wahl der Eingangswerte zu erzielen.

Das Berechnungsprogramm bietet die Möglichkeit eine große Datenbank mit unterschiedlichen Stoffen zu erstellen. Darin können Zemente, Zuschlagsstoffe, Quarzmehle, Microsilica, Sande und dergleichen enthalten sein. Die Anzahl der Stoffe und Kategorien ist dabei unbegrenzt. Daraus lassen sich beliebige Korngemische erstellen und deren Packungsdichten ermitteln. Derzeit können maximal zwölf Stoffe für eine Berechnung kombiniert werden.

Die Packungsdichte von Einzelstoffen lässt sich leicht mit Hilfe von Herstellerangaben für die beiden Eingangswerte relativ exakt ermitteln. Ein zukünftiges Ziel wäre, für beliebige Korngemische genaue Ergebnisse für die Packungsdichte zu erzielen, auch ohne dass eine nachträgliche Anpassung der Eingangsparameter notwendig ist. Aus den Ergebnissen der Berechnung sollen in weiterer Folge Voraussagen über die Festigkeitsentwicklung getroffen werden. Daraus lassen sich optimale Mischungsverhältnisse ableiten, die zum Erreichen der gewünschten Festigkeit führen.

Die genaue Ermittlung des optimalen Mischungsverhältnisses ist vor allem für die Herstellung von ultrahochfesten Beton von Bedeutung. Dieser weist eine hohe Festigkeit aber auch ein sehr sprödes Bruchverhalten auf, weshalb zur Verringerung der Sprödbruchgefahr, aber auch zur Verbesserung des Verhaltens bei thermischer Beanspruchung, Fasern beigemengt werden. In wie weit diese Fasern die Packungsdichte beeinflussen, ist ein weiterer Aspekt den es noch zu erörtern gilt. Es kann angenommen werden, dass die Fasern durch ihre längliche, plattige Struktur das Erreichen der dichtesten Packung wesentlich behindern. Diesbezüglich sollte eine Versuchsreihe durchgeführt werden, um den Einfluss vorab abschätzen zu können. Dieser Einflussfaktor könnte in der Tabelle über die beiden Eingangsparameter Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 und Hohlraumanteil der Einkornschüttung k_0 Berücksichtigung finden, oder über einen zusätzlichen Parameter, der von Menge und Form der Fasern abhängig ist, in die Berechnung mit einfließen.

Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Mikrogefüge eines erhärteten Zementsteines mit verzahnten Calciumsilikathydratfasern und plättchenförmigem Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) unter dem Rasterelektronenmikroskop 6

Abbildung 2.2 Zusammensetzung des Zementsteines in Abhängigkeit des W/Z-Wertes bei vollständiger Hydratation des Zementes 7

Abbildung 2.3 Druckfestigkeitsentwicklung von Betonen mit gleichem W/F-Wert aber unterschiedlichem Anteil an Silicastaub 10

Abbildung 2.4 a) Bild l.o. Wasser-Zement-Suspension an der Übergangszone zum Gesteinskorn vor der Hydratation; Bild m.o. Bildung von CSH-Phasen, große $Ca(OH)_2$ und Ettringit Bereiche am Übergang zum Gesteinskorn; Bild r.o. Übergangsbereich unter dem Elektronenmikroskop. b) Bild l.u. Hohlräume durch Microsilica gefüllt; Bild m.u. kleinere $Ca(OH)_2$ Bereiche; Bild r.u. verbesserter Verbund zw. Zementstein und Zuschlagstoff unter dem Elektronenmikroskop 11

Abbildung 2.5 Druckfestigkeitsentwicklung und puzzolanisches Reaktionsverhalten von Mörtelmischungen bei Ersatz von 33 Vol.-% des Zementes durch Flugasche bzw. Inertmaterial (Quarzmehl) 13

Abbildung 2.6 Hydratationswärmeentwicklung von Mörteln aus Zementen mit unterschiedlichem Hüttensandgehalt. 17

Abbildung 2.7 Druckfestigkeitsentwicklung von Mörteln aus Zementen gleicher Festigkeitsklasse mit unterschiedlichem Hüttensandgehalt 18

Abbildung 2.8 Vergleich der Porengrößenverteilung von Portlandzement und Hochofenzement mit 50 % Hüttensandanteil 19

Abbildung 2.9 Druckfestigkeit bei abnehmenden Zementgehalt aber konstantem Verhältnis von Wasser zu Feinteilen 21

Abbildung 2.10 Einflussgrößen der Feinstoffe auf die Kornpackung und den Wasser-Feststoff-Wert 23

Abbildung 2.11 Schematische Darstellung des Beugungswinkels in Abhängigkeit des Korndurchmessers 26

Abbildung 2.12 a) Bildaufnahme eines Kornes einer suspendierten Probe, b) Bestimmung der Konvexität eines Partikels, c) Berechnung des Rundungsgrades eines Kornes 27

Abbildung 2.13 Typische im Beton enthaltene Feststoffe und deren Kornverteilungen 29

Abbildung 2.14 Überblick über mögliche Methoden zur Kornformbeschreibung 33

Abbildung 2.15 Charakterisierung von Sandkörner anhand der Kornform und Oberflächenrauigkeit 33

Abbildung 2.16 Elektronenmikroskopaufnahmen einiger ausgewählter Feinstoffe bei einer rund 2000-fachen Vergrößerung 37

Abbildung 2.17 Zusammenhang zwischen experimentell ermittelten Hohlraumgehalten und der mittleren Feinheit von Feinstoffen, ε_{STAV}…Hohlraumgehalt mittels Stampfvolumeter ermittelt, ε_{Hg}…mittels Quecksilberdruckporosimetrie, ε_{WA}…mittels Wasseranspruch 40

Abbildung 2.18 Zusammenhang zwischen dem Partikeldurchmesser, der Gewichtskraft und den interpartikulären Kräften 41

Abbildung 2.19 *Van der Waals'sche Anziehungskräfte* und elektrostatische Abstoßungskräfte in Abhängigkeit des Partikelabstandes 42

Abbildung 3.1 Schematische Darstellung der optimalen Packungsdichte unter der Annahme kugelförmiger Partikel 46

Abbildung 3.2 Tragstruktur und wirkende Kräfte im Korngerüst 47

Abbildung 3.3 Abhängigkeit der Anzahl der Komponenten *n* einer Mehrkomponentenmischung auf die Packungsdichte *D* bei unterschiedlichen Ausgangspackungsdichten D_0 48

Abbildung 3.4 Optimale Mengenanteile $S_{i,opt}$ der einzelnen Komponenten X_i einer Achtkomponentenmischung bei unterschiedlichen Ausgangspackungsdichten D_0 50

Abbildung 3.5 Packungsdichte eines Korngemisches aus zwei Quarzmehlen in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis der beiden Stoffe 51

Abbildung 3.6 Fall 1: Grobes Grundkorn + feines Beikorn mit einem Volumenanteil ≤ dem vorhanden Hohlraumanteil aus der Grundkornpackung 55

Abbildung 3.7 Fall 2: Feines Grundkorn + grobes Beikorn; Volumenanteil der feinen Partikel > dem Hohlraumanteil des groben Beikorns 56

Abbildung 3.8 Diagramm der Funktion $a_{s,i}$ des Hohlraumgehaltes der Einkornschüttung k_0 und der Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 59

Abbildung 4.1 Übersicht des Tabellenblattes *Eingabe* aus dem entwickelten Excel-Programm „*PD-Optimierung*“ 64

Abbildung 4.2 Schritt 1: Button „*Daten neu laden*“ drücken 65

Abbildung 4.3 Schritt 2: Eingabe von k_0 und w_0 66

Abbildung 4.4 Schritt 3: Kontrollkästchen zur Auswahl der Anzahl der zu kombinierenden Stoffe 66

Abbildung 4.5 Schritt 4: Auswahl der Stoffgruppe 67

Abbildung 4.6 Ordnerstruktur im Windows Explorer 67

Abbildung 4.7 Schritt 5: Auswahl der gewünschten Stoffe 68

Abbildung 4.8 Schritt 6: Festlegung der Unter- und Obergrenzen für die einzelnen Stoffe 69

Abbildung 4.9 Schritt 7: Festlegung der Schrittweite für die einzelnen Stoffe 70

Abbildung 4.10 Starten der Berechnung durch drücken des Berechnungs-Buttons 70

Abbildung 4.11 Abfrage ob die Berechnung gestartet werden soll 71

Abbildung 4.12 Eingabefehler: Summe der max. Prozentanteile muss >= 100 % sein 71

Abbildung 4.13 Eingabefehler: Summe der min. Prozentanteile muss <= 100 % sein 72

Abbildung 4.14 Maximale erzielbare Packungsdichte mit Ausgabe der Prozentanteile der gewählten Stoffe nach erfolgreicher Berechnung 73

Abbildung 4.15 Darstellung der Korngrößenverteilung des Zementes *CEM 1* mit dem erforderlichen Aufbau des Excel-Tabellenblattes 75

Abbildung 4.16 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Reichweite der Teilchenbehinderung“ 77

Abbildung 4.17 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Teilchenbehinderungsfaktor“ mit den einzelnen Werten für die jeweilige Kornklasse 78

Abbildung 4.18 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ mit der Auflistung der ausgewählten Stoffe und deren gewählter Mengeneingrenzungen rot markiert 79

Abbildung 4.19 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ mit der Auflistung der einzelnen Stoffmengen-kombinationen 82

Abbildung 4.20 Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ mit der Berechnung der Kornanteile der einzelnen Kornklassen für die einzelnen möglichen errechneten Kombinationen 84

Abbildung 4.21 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Hohlraumgehalt“ mit der Auflistung der ausgewählten Stoffe und der Matrix zur Berechnung des Hohlraumgehaltes 87

Abbildung 4.22 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Hohlraumgehalt“ mit der Ermittlung des Hohlraumgehaltes h_s für jede einzelne Kornklasse *i* 89

Abbildung 4.23 Liste mit den maximalen Hohlraumgehalten für jede einzelne Mengenkombination im Tabellenblatt „mögliche Kombinationen“ 92

Abbildung 4.24 Ausschnitt aus dem Tabellenblatt „Packungsdichte“ mit dem minimal erreichbaren Hohlraumgehalt und der maximalen Packungsdichte grün hinterlegt dargestellt 94

Abbildung 4.25 Ausgabeblatt mit sämtlichen Eingabewerten und Ergebnissen 96

Abbildung 5.1 Ermittelte Packungsdichte bei einer Reichweite der Teilchenbehinderung von $w_0 = 0,9$ und einem Hohlraumanteil der Einkornschüttung $k_0 = 0,6$ 98

Abbildung 5.2 Ermittelte Packungsdichte bei einer Reichweite der Teilchenbehinderung von $w = 6$ 99

Abbildung 5.3 Maximale Packungsdichte bei unterschiedlicher Zusammensetzung der ausgewählten Stoffe 100

Abbildung 5.4 Erreichbare Packungsdichte *D* in Abhängigkeit der Reichweite der Teilchenbehinderung w_0 100

Abbildung 5.5 Einfluss des Hohlraumanteils der Einkornschüttung k_0 auf die Packungsdichte *D* 102

Abbildung 5.6 Sieblinien der Quarzmehle *QM3600* (blau), *QM10000* (orange), *QM16900* (rot) 103

Abbildung 5.7 Errechnete maximale Packungsdichte von Quarzmehl *QM3600* 104

Abbildung 5.8 Errechnete maximale Packungsdichte von Quarzmehl *QM10000* 105

Abbildung 5.9 Errechnete maximale Packungsdichte von Quarzmehl *QM16900* 105

Abbildung 5.10 Optimale Mengenkombination bei einer Mischung aus drei verschiedenen Quarzmehlen (*QM3600*, *QM10000*, *QM16900*) 106

Abbildung 5.11 Sieblinien von *QM3600* (blau), *QM10000* (orange), *QM16900* (rot), sowie der Mischung von 95 % *QM3600* und 5 % *QM16900* (grün). 106

Abbildung 5.12 Sieblinien von Zement *CEM 1* (blau), *Microsilica 1* (grün) und *QM3600* (orange). 107

Abbildung 5.13 Errechnete maximale Packungsdichte von Zement *CEM 1*. 108

Abbildung 5.14 Errechnete maximale Packungsdichte von *Microsilica_1*. 108

Abbildung 5.15 Optimale Mengenkombination bei einer Mischung aus Zement *CEM 1*, *Microsilica 1* und Quarzmehl *QM3600*. 109

Abbildung 5.16 Auszug aus dem Tabellenblatt „Packungsdichte“. 110

Abbildung 5.17 Sieblinien von *CEM 1* (blau), *Microsilica 1* (grün), Quarzmehl *QM3600* (orange), sowie einer Mischung von 25 % *CEM 1*, 30 % *Microsilica 1* und 45 % Quarzmehl *QM3600* (rot) und einer Mischung von 25 % *CEM 1*, 5 % *Microsilica 1* und 70 % Quarzmehl *QM3600* (violett)..... 111

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Üblich verwendete Verteilungsfunktionen einzelner Feinstoffe 30

Tabelle 2.2 Kornformfaktoren und visuelle Beurteilung der Kornform anhand von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen ausgewählter Feinstoffe 39

Tabelle 3.1 Beispielhafte Berechnung des Hohlraumanteils $h_{s,max}$ bei gewähltem $k_0 = 0,6$ und $w_0 = 0,9$ 61

Literaturverzeichnis

Berg, W. v. (2001). Flugasche als Betonzusatzstoff. Verband Deutscher Betoningenieure Heft 87/01.

Bergmeister, Fingerloos, & Wörner. (2013). Beton - Kalender 2013, Lebensdauer und Instandsetzung Brandschutz. Kap. Grundlagen zur Herstellung ultrahochfester Betone.

Bosold, D., & Pickhardt, R. (2014). B1 - Zemente und ihre Herstellung. Zement-Merkblätter der Informationsplattform der deutschen Zement- und Betonindustrie, 04/14.

Fehling, Schmidt, Teichmann, Bunje, Bornemann, & Middendorf. (2005). Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 1 Universität Kassel.

Fischböck, E., & Nischer, P. (2009). Kornzusammensetzung des Mehlkorns, Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis. Fachzeitschrift zement + beton, Ausgabe 5_09.

Friede, B., & Fidjestøl, P. (2011). Microsilica – Ein Staub macht Karriere (Microsilica – A dust makes career). Nachrichten aus der Chemie 10/11, 59(10).

Friembichler, Spaun, & Steigenberger. (2012). Zementerzeugung in Österreich. Broschüre der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie VÖZ, 09/12.

Geisenhanslüke, C. (2005). Modellierung und Berechnung hochdichter Feinstkornpackungen für Beton. Universität Kassel, 45. Forschungskolloquium des DAfStb.

Hermann, K. (1995). Zusatzstoffe: Teil 4, Silicastaub. Zeitschrift Cementbulletin Band 63 (1995) Heft 7.

Huß, A. (2010). Mischungsentwurf und Fließeigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) vom Mehlkorntyp unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung. Dissertation an der Universität Stuttgart.

Kindermann, C. (2013). Entstaubtes Quarzmehl von Euroquarz als Zuschlag, Füllstoff und mehr für die Herstellung bauchemischer Produkte. Produktinformation Euroquarz GmbH.

Koch, A. (2006). Deformation von Fassadenplatten aus Marmor - Schadenskartierung und gesteinstechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden. Universitätsverlag Göttingen.

McGeary, R. (1962). Mechanical Packing of Spherical Particles. Journal of the American Ceramic Society 44/62 Nr.10.

ÖNORM EN197-1, Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Ausgabe 2004-09-01.

Palm, S. (2009). Optimierung der Raumausfüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen. Dissertation an der Technischen Universität Clausthal.

Reschetilowski, W. (2015). Einführung in die heterogene Katalyse. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Reschke, T. (2000). Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/00.

Schmidt, M., & Fehling, E. (2007). Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 7.

Schmidt, M., & Geisenhanslüke, C. (2005). Optimierung der Zusammensetzung des Feinstkorns von Ultra-Hochleistungs- und von selbstverdichtendem Beton. beton 36.

Schneider, M., & Meng, B. (2000). Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand. Fachzeitschrift Beton-Information, 01/00 .

Schüßler, K., & Mcedlov-Petrosjan, O. (1990). Der Baustoff Beton - Grundlagen der Strukturbildung und der Technologie. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.

Schwanda, F. (1959). Der Hohlraumgehalt von Korngemischen – Ein Vergleich rechnerisch gewonnener Werte mit versuchsmäßig ermittelten. beton 9 Heft 12/59.

Schwanda, F. (1959). Der Hohlraumgehalt von Korngemischen. beton 9 Heft 1/59.

Slowik, & Schmidt. (2010). Kapillare Schwindrissbildung in Beton. Forschungsbericht zu Ursachen und Auswirkungen sowie zur Vermeidung von Frühschwindrissen, Kap. 3.2.

Stangl, A. (2011). Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton. Diplomarbeit an der TU-Wien.

Stark, J., & Wicht, B. (2013). Dauerhaftigkeit von Beton. 2.Auflage.

Stark, U., & Müller, A. (2004). Effektive Methoden zur Messung der Korngröße und Kornform. Bauhaus-Universität Weimar.

Szpiro, G. (2011). Die Keplersche Vermutung – Wie Mathematiker ein 400 Jahre altes Rätsel lösten, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Teichmann, T. (2008). Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein. Universität Kassel: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 12/08.

Thienel, C. (2010). Baustoff aus Recyclaten und Nebenprodukten - Silikastaub. Skriptum zur Vorlesung Sonderbetone und Baustoffkreislauf, Institutes für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München.