

**Das Füllen der Form mit Betongemenge bei der
Formgebung und Verdichtung von Betonsteinen
in Steinformmaschinen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)**

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Steffen Mothes
(externer Doktorand)

**an der Fakultät für Bauingenieurwesen der
Bauhaus Universität Weimar**

Mentorin:
Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller

Weimar, den 7. Mai 2010

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Leiter für Forschung und Entwicklung der Firma F.C. Nüdling Betonelemente GmbH + Co. KG Fulda in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung der Bauhaus Universität Weimar und dem Institut für Fertigteiltechnik und Fertigbau Weimar e.V.

An dieser Stelle ist es mir ein besonderes Bedürfnis, allen, die zum Entstehen und Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Mein besonderer Dank gebührt meiner Mentorin Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller an deren Lehrstuhl ich externer Doktorand sein konnte. Ihre engagierte Betreuung und ihre fachliche Kompetenz haben maßgeblich zum Gelingen der vorliegenden Dissertation beigetragen.

Ebenfalls mein besonderer Dank gilt meinem Gutachter und langjährigen Förderer Herrn Doz. Dr.-Ing. habil. Helmuth Kuch. Er hat mich animiert, die aus meiner Forschungsarbeit resultierenden Ergebnisse im Rahmen einer Promotion aufzubereiten und zusammenzufassen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Victor Mechtcherine danke ich für die Unterstützung bei der Bearbeitung des Themas. Die gemeinsam an seinem Institut der Technischen Universität Dresden geführten Diskussionen haben sehr zum Gelingen der Promotion beigetragen. Außerdem danke ich ihm für die Erstellung seines Gutachtens.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. Andre Katterfeld und Prof. Dr.-Ing. Timon Rabzcuk danke ich für die Erstellung ihrer Gutachten.

Ohne die Unterstützung des Institutes für Fertigteiltechnik und Fertigbau Weimar e.V. wäre mir die Durchführung realer und numerischer Experimente im vorliegenden Umfang nicht möglich gewesen. Mein ausdrücklicher Dank gilt deshalb an dieser Stelle dem Institutsdirektor Herrn Dr.-Ing. Ulrich Palzer, der mir die Möglichkeit gegeben hat, Personal und Technik des Instituts für meine Untersuchungen zu nutzen.

Mein Dank gilt den Mitarbeitern der Mess- und Prüfstelle sowie des Technikums des Institutes für Fertigteiltechnik und Fertigbau Weimar e.V. für die Hilfe bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Verifizierungsversuche.

Vielen Dank auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. Henry Schwabe und Herrn Dipl.-Ing. Attila Höchst vom Forschungsbereich Fertigteiltechnik des Institutes für Fertigteiltechnik und Fertigbau Weimar e.V. für die Durchführung der rechnergestützten numerischen Experimente und die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Hinweise zu diesem Thema.

Bei Frau Professor Dr. rer. nat. habil. Silvia Vogel und Herrn Stefan Seeger von der Fachabteilung Operations Research und Stochastik der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Ilmenau möchte ich mich herzlich

für die Hilfe und die angenehme Zusammenarbeit bei der statistischen Auswertung der Messdaten bedanken.

Nicht versäumen zu erwähnen möchte ich, dass ich ohne die Unterstützung meines Arbeitgebers, der Firma F.C. Nüdling Betonelemente GmbH + Co. KG Fulda die Arbeit nicht erfolgreich hätte abschließen können. Mein ausdrücklicher Dank gebührt dem geschäftsführenden Gesellschafter Herrn Dipl.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Nüdling und dem Geschäftsleiter Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Klöppner.

Ein weiterer Dank gilt allen Mitarbeitern der Firma Nüdling Betonelemente GmbH + Co. KG, die mich bei den zahlreichen Untersuchungen im industriellen Routinebetrieb unterstützt haben.

Schließlich danke ich in ganz besonderem Maße meiner Familie, die mir die erforderlichen Freiräume und die erforderliche Ruhe für die langwierige Bearbeitung des Themas gegeben hat. Besonders in den schwierigen Phasen war sie mir zuverlässige Stütze und Motivation.

Weimar, den 7. Mai 2010

Steffen Mothes

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Betonsteinarten	3
1.2	Zielstellung	5
2.	Technologische und technische Grundlagen	7
2.1	Technologie der Betonsteinproduktion	7
2.2	Fomgebung und Verdichtung bei der Betonsteinproduktion	8
2.3	Steinformmaschinen	10
2.3.1	Aufbau von Steinformmaschinen	10
2.3.1.1	Fülleinrichtung	11
2.3.1.2	Verdichtungseinrichtung	17
2.3.1.3	Schal- und Entschaleinrichtung	24
2.3.2	Arbeitsweise von Steinformmaschinen	27
2.4	Füllen der Form mit Betongemenge	29
3.	Methode zur Quantifizierung und Evaluierung der Füllungsgüte	33
3.1	Datenerfassung und -verarbeitung	34
3.1.1	Aufnahme der Messdaten	34
3.1.2	Berechnung der Füllungskennzahlen	34
3.1.3	Berechnung der statistischen Kennwerte	37
3.2	Evaluierung der experimentellen Werte	39
3.2.1	Darstellung und Bewertung der Füllungsgüte	39
3.2.2	Gegenüberstellung der zyklusbezogenen Kennwerte einer Stichprobe	42
3.2.3	Vergleich von Stichproben unterschiedlicher Steinformmaschinen	43
4.	Untersuchung der Füllungsgüte im industriellen Routinebetrieb	46
4.1	Auswahl der zu untersuchenden Proben	46
4.2	Prämissen für den Start der Produktion	47
4.3	Produktion der Proben	47
4.4	Dokumentation der Produktion	48
4.5	Prüfung der Festbetonproben	50
4.6	Füllungsgüte der untersuchten Steinformmaschinen	51
4.6.1	Massenverteilungsmatrizen und zyklusbezogene Effekte	52
4.6.2	Lageparameter und Streuungsmaße	64

4.6.3	Ist-Stand-Ergebnisse zur Füllungsgüte aller untersuchten Steinformmaschinen	66
4.7	Einfluss der Füllstandsregelung auf die Füllungsgüte	69
5.	Füllungsgüte – Korrelationen und Einflussfaktoren	73
5.1	Wechselbeziehungen zwischen Steinmasse und Festbetoneigenschaften	73
5.2	Einflussfaktoren auf die Verteilung der Steinmassen	76
5.3	Nachweis von Zykluseffekten	79
6.	Analyse des Füllprozesses und erste Modellbildung	81
6.1	Einflüsse und Einflussgrößen auf den Füllprozess	81
6.1.1	Maschinentechnische Betrachtung	81
6.1.2	Technologische Betrachtung	83
6.1.2.1	Flächen-, Volumen und Massenkenngößen	83
6.1.2.2	Maschinentechnische Einflussgrößen	86
6.1.2.3	Stoffliche Einflussgrößen	86
6.2	Phänomenologische Betrachtung	87
6.3	Erste Modellbildung an hand der beobachteten Phänomene.	90
6.3.1	Zellendruckmatrix	90
6.3.2	Zellendruck-Zeit-Funktion (ZDZF)	92
6.3.3	Wechselbeziehungen zwischen Zellendruck-Zeit-Funktion und Füllmasse	94
7.	Numerische Modellierung des Füllprozesses unter Anwendung der Diskrete Elemente Methode (DEM)	95
7.1	Grundgedanke und Anwendungen	95
7.2	Grundlagen der Diskrete-Elemente-Methode	95
7.3	Simulationssoftware Particle Flow Code in 3 Dimensions (PFC3D)	97
7.4	Entwicklung und Kalibrierung des Basismodells	98
7.5	Abbildung des realen Füllsystems im numerischen Experiment	100
7.5.1	Betongemenge	100
7.5.2	Füllausrüstung	101
7.5.3	Bewegung des Füllkastens	102
7.6	Simulationsergebnisse	103

7.6.1	Animation des Füllprozesses	103
7.6.2	Füllungsgüte	105
7.6.3	Streuungszerlegung nach Variationsursache	108
7.6.4	Zellendruck-Zeit-Funktion	109
8.	Versuche zur Verifizierung des Simulationsmodells	110
8.1	Versuchseinrichtung	110
8.2	Messeinrichtung	111
8.3	Durchführung des Verifizierungsversuchs	113
8.4	Versuchsergebnisse	114
8.4.1	Füllungsgüte	114
8.4.2	Einflussfaktoren auf die Verteilung der Steinmassen	117
8.4.3	Zellendruck-Zeit-Funktion	117
9.	Gegenüberstellung der Ergebnisse aus realen und numerischen Experimenten	124
9.1	Füllungsgüte	125
9.2	Einflussfaktoren auf die Verteilung der Steinmassen	128
9.3	Zellendruck-Zeit-Funktion	129
10.	Zusammenfassung	135
11.	Schlussfolgerungen und Ausblick	144

Literaturverzeichnis

Anlagen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	<i>Technologisches Schema der Betonsteinproduktion</i>	S. 1
Abbildung 1.2:	<i>Moderne Steinformmaschine</i>	S. 2
Abbildung 1.3:	<i>Unterschiedliche Abwitterungen bei Betonpflastersteinen</i>	S. 3
Abbildung 1.4:	<i>Betonsteine unterschiedlichster Gestalt und Größe</i>	S. 3
Abbildung 2.1:	<i>Kreislaufanlage zur Produktion von Betonsteinen in Übersicht</i>	S. 7
Abbildung 2.2:	<i>Schematische Darstellung der 3 Prozessphasen der Formgebung und Verdichtung</i>	S. 8
Abbildung 2.3:	<i>Steinformmaschine mit Kern- und Vorsatzfülleinrichtung in Grundstellung in vereinfachter schematischer Darstellung</i>	S. 11
Abbildung 2.4:	<i>Steinformmaschine mit Kernfülleinrichtung</i>	S. 12
Abbildung 2.5:	<i>Steinformmaschine mit Kern- und Vorsatzfülleinrichtung und geteiltem Schwingtisch</i>	S. 12
Abbildung 2.6:	<i>Steinformmaschine mit Kern- und Vorsatzfülleinrichtung mit zwei Füllsilos</i>	S. 12
Abbildung 2.7:	<i>Fülltrichter mit Dosiereinrichtung über dem Füllwagen</i>	S. 13
Abbildung 2.8:	<i>Variante für die konstruktive Gestaltung des Kernfüllwagens</i>	S. 14
Abbildung 2.9:	<i>Füllwagenlauf auf dem Formunterteil</i>	S. 15
Abbildung 2.10:	<i>Füllwagenlauf am Maschinenrahmen</i>	S. 15
Abbildung 2.11:	<i>Kernfüllwagen mit hydraulisch angetriebenem Schüttelrost</i>	S. 16
Abbildung 2.12:	<i>Vorsatzfüllwagen mit Pendelrost</i>	S. 16
Abbildung 2.13:	<i>Vorsatzfüllwagen mit Gleitrost</i>	S. 16
Abbildung 2.14:	<i>Füllwagen mit pneumatisch verstellbarem Abstreifer</i>	S. 17
Abbildung 2.15:	<i>Füllwagen mit einfachem federbelastetem Abstreifen</i>	S. 17
Abbildung 2.16:	<i>Schematische Darstellung der Verdichtungseinrichtung einer Steinformmaschine mit Schockvibration während der Hauptverdichtung</i>	S. 19
Abbildung 2.17:	<i>Schematische Darstellung der Wirkungsweise des elektronisch geregelten Vier-Wellen-Erregers</i>	S. 20
Abbildung 2.18:	<i>Beschleunigung-Zeit-Funktion und Beschleunigung-Frequenz-Funktion während der 1. Füllvibration an einer Steinformmaschine mit Schockvibration – Messpunkt vertikal am Formunterteil</i>	S. 22

Abbildung 2.19:	<i>Schematische Darstellung der Verdichtungseinrichtung einer Steinformmaschine mit harmonischer Vibration während der Hauptverdichtung</i>	S. 23
Abbildung 2.20:	<i>Beschleunigung-Zeit-Funktion und Beschleunigung-Frequenz-Funktion während der 1. Füllvibration an einer Steinformmaschine mit harmonischer Vibration – Messpunkt vertikal am Formunterteil</i>	S. 24
Abbildung 2.21:	<i>Formunterteil mit Formstempel zur Herstellung von Rechtecksteinen</i>	S. 25
Abbildung 2.22:	<i>Formunterteil mit Formstempel zur Herstellung von Einfasssteinen</i>	S. 25
Abbildung 2.23:	<i>Formeinsatz mit inhomogener, asymmetrischer Struktur (Mischbelegung)</i>	S. 26
Abbildung 2.24:	<i>Formeinsatz mit homogener Struktur</i>	S. 26
Abbildung 2.25:	<i>Fertigung mit einem profilierten Ziehblech</i>	S. 27
Abbildung 2.26:	<i>Ablaufschema der Formgebung und Verdichtung mit einer Füllstufe</i>	S. 28
Abbildung 2.27:	<i>Ablaufschema der Formgebung und Verdichtung mit zwei Füllstufen</i>	S. 29
Abbildung 2.28:	<i>Überblick der unterschiedlichen Füllaufgaben bei der Produktion von Betonsteinen</i>	S. 32
Abbildung 3.1:	<i>Schema im Register "Messwerte" zur Eingabe der Steinmassen $m_1 \dots m_{48}$ des ersten Zyklus Z_1</i>	S. 35
Abbildung 3.2:	<i>Schema im Register "Nutzervorgaben" zur Definition der Auswertemodi</i>	S. 36
Abbildung 3.3:	<i>Schema zur Anzeige der Massenverteilung innerhalb einer gefertigten Einheit im Register "Zyklus4"</i>	S. 37
Abbildung 3.4:	<i>Schema zur Anzeige der berechneten durchschnittlichen Massenverteilung im Register "Mittelwerte"</i>	S. 38
Abbildung 3.5:	<i>Histogramm mit Sollwertmarke zur Darstellung der Massenverteilung der Stichprobe 6K im Register "Auswertung"</i>	S. 42
Abbildung 3.6:	<i>Diagramme zur Darstellung und zum Vergleich der zyklusbezogenen Füllungskennzahlen und der zyklusbezogenen Füllungsgüte innerhalb der Stichprobe 6K im Register "Auswertung"</i>	S. 43
Abbildung 3.7:	<i>Gegenüberstellung der Häufigkeitspolygone dreier unterschiedlicher Stichproben im Ergebnis der Kernbetonfüllung</i>	S. 44
Abbildung 3.8:	<i>Häufigkeitsdichte mit minimaler Streuung und optimaler Lage zum Sollwert</i>	S. 45

Abbildung 4.1:	<i>Proben aus Vorsatz- und Kernbeton</i>	S. 48
Abbildung 4.2:	<i>Proben aus Kernbeton</i>	S. 48
Abbildung 4.3:	<i>Startbild einer vergleichenden Videosequenz von vier Steinformmaschinen</i>	S. 49
Abbildung 4.4:	<i>Aktions-Zeit-Diagramm der Füllwagen und der Vibrationen während der Füllung</i>	S. 49
Abbildung 4.5:	<i>$a(t)$-Funktion für die Füllung und Verdichtung innerhalb eines Fertigungszyklus – aufgenommen am Flansch des Formunterteils</i>	S. 49
Abbildung 4.6:	<i>Maßstäbliche Gegenüberstellung der Füllwagen und Formunterteile von fünf untersuchten Steinformmaschinen in Grundstellung</i>	S. 50
Abbildung 4.7:	<i>Massenverteilungsmatrizen der zehn aufeinanderfolgend gefertigten Einheiten im Ergebnis der ersten Füllstufe (Datensatz 2K)</i>	S. 53
Abbildung 4.8:	<i>Massenverteilungsmatrizen der zehn aufeinanderfolgend gefertigten Einheiten im Ergebnis beider Füllstufen (Datensatz 2K+V)</i>	S. 54
Abbildung 4.9:	<i>Massenverteilungsmatrizen für zehn Einheiten im Ergebnis der zweiten Füllstufe (errechneter Datensatz 2V)</i>	S. 55
Abbildung 4.10:	<i>Massenverteilungsmatrizen "Mittelwerte" für alle Datensätze der Steinformmaschine 2</i>	S. 56
Abbildung 4.11:	<i>Entwicklung der Zyklusmassen ($n_z=10$) innerhalb der Datensätze 2K und 2K+V</i>	S. 57
Abbildung 4.12:	<i>Entwicklung der zyklusbezogenen Streuung ($n_{Pz}=48$) innerhalb der Datensätze 2K und 2K+V</i>	S. 57
Abbildung 4.13:	<i>Entwicklung der Zyklusmassen ($n_z=10$) innerhalb des Datensatzes 2V</i>	S. 58
Abbildung 4.14:	<i>Entwicklung der zyklusbezogenen Streuung ($n_{Pz}=48$) innerhalb der Datensatzes 2V</i>	S. 58
Abbildung 4.15:	<i>Massenverteilungsmatrizen der zehn aufeinanderfolgend gefertigten Einheiten aus Kernbeton des Datensatzes 9K</i>	S. 59
Abbildung 4.16:	<i>Massenverteilungsmatrizen der zehn aufeinanderfolgend gefertigten Einheiten aus Kern- und Vorsatzbeton des Datensatzes 9K+V</i>	S. 60
Abbildung 4.17:	<i>Massenverteilungsmatrizen für zehn Einheiten im Ergebnis der zweiten Füllstufe (errechneter Datensatz 9V)</i>	S. 61
Abbildung 4.18:	<i>Massenverteilungsmatrizen "Mittelwerte" für alle Datensätze der Steinformmaschine 9</i>	S. 62

Abbildung 4.19:	Entwicklung der Zyklusmassen ($n_Z=10$) innerhalb der Datensätze $9K$ und $9K+V$	S. 63
Abbildung 4.20:	Entwicklung der zyklusbezogenen Streuung ($n_{PZ}=48$) innerhalb der Datensätze $9K$ und $9K+V$	S. 63
Abbildung 4.21:	Entwicklung der Zyklusmassen ($n_Z=10$) des errechneten Datensatzes $9V$	S. 64
Abbildung 4.22:	Entwicklung der zyklusbezogenen Streuung ($n_{PZ}=48$) innerhalb des Datensatzes $9V$	S. 64
Abbildung 4.23:	Vergleich der Häufigkeitspolygone aller Stichproben aus Kernbeton	S. 66
Abbildung 4.24:	Vergleich der Häufigkeitspolygone aller Stichproben aus Kern- und Vorsatzbeton	S. 68
Abbildung 4.25:	Vergleich der Häufigkeitspolygone aller Stichproben aus Vorsatzbeton (rechnerisch ermittelt)	S. 69
Abbildung 4.26:	Lasergestützte Füllstandsmessung und -regelung im Kernfüllwagen der Steinformmaschine 9	S. 70
Abbildung 4.27:	Vergleich der Zyklusmassen vor ($K9$) und nach ($K9.1$) der Modifikation der Füllstandsregelung im Kernfüllwagen	S. 70
Abbildung 4.28:	Vergleich der zyklusbezogenen Streuung vor ($K9$) und nach ($K9.1$) der Modifikation der Füllstandsregelung im Kernfüllwagen	S. 70
Abbildung 4.29:	Vergleich der Häufigkeitspolygone vor ($K9$) und nach ($K9.1$) der Modifikation der Füllstandsregelung im Kernfüllwagen – Ergebnis Füllstufe 1	S. 71
Abbildung 4.30:	Vergleich der Häufigkeitspolygone vor ($9K$) und nach ($9.1K$) der Modifikation der Füllstandsregelung im Kernfüllwagen - Ergebnis Füllstufen 1 und 2	S. 71
Abbildung 5.1:	Scatterplot-Matrix der Stichprobe $10K+V$ mit $n=48$	S. 75
Abbildung 5.2:	Streuungszerlegung zur Berechnung der Variationsursache	S. 77
Abbildung 5.3:	Streuungszerlegung nach berechneter Variationsursache für die Mittelwerte über alle untersuchten Datensätze im Ergebnis der ersten Füllstufe	S. 78
Abbildung 5.4:	Streuungszerlegung nach berechneter Variationsursache für die Mittelwerte über alle untersuchten Datensätze im Ergebnis beider Füllstufen	S. 78
Abbildung 5.5:	Streuungszerlegung nach berechneter Variationsursache für den Datensatz $9K$ nach der Modifikation der Füllstandregelung am Kernfüllwagen	S. 79

Abbildung 5.6:	<i>Streuungszerlegung nach berechneter Variationsursache für den Datensatz 9.1 K nach der Modifikation der Füllstandregelung am Kernfüllwagen</i>	S. 80
Abbildung 6.1:	<i>Wirkungsbereiche der Kenngrößenklassen während der Füllung</i>	S. 82
Abbildung 6.2:	<i>Beispiele unterschiedlicher Transportmassenkennzahlen bei gleicher Füllaufgabe</i>	S. 84
Abbildung 6.3:	<i>Darstellung der Bewegungsbahn eines Gemengeagglomerates beim Eintritt in den leeren zu füllenden Raum</i>	S. 87
Abbildung 6.4:	<i>Wechselwirkung zwischen Füllkasten, Formsteg und Betongemenge während des Überfahrens des zu füllenden Raumes</i>	S. 88
Abbildung 6.5:	<i>Großflächiger Füllraum ohne Barriere – Füllwagen auf der Rückfahrt in die Grundstellung</i>	S. 88
Abbildung 6.6:	<i>Füllraum mit einer Barriere – Füllwagen auf der Rückfahrt in die Grundstellung</i>	S. 89
Abbildung 6.7:	<i>Konvektionsmuster im Ergebnis vertikaler Vibration im Rahmen einer zweidimensionalen Molekulardynamiksimulation</i>	S. 90
Abbildung 6.8:	<i>Darstellung der Füllhöhe im Transportraum in Abhängigkeit von der erreichten Position des Füllkastens</i>	S. 92
Abbildung 6.9:	<i>Darstellung der Zellendruck-Zeit-Funktion für die Zeilenzellen 1,4 und 6 des Modells</i>	S. 93
Abbildung 7.1:	<i>Berechnungszyklus in einem DEM-Programm</i>	S. 96
Abbildung 7.2:	<i>Mechanische Modelle für die Beschreibung der Deformationseigenschaften</i>	S. 97
Abbildung 7.3:	<i>Beispiel eines Kontaktmodells für die DEM mit Federn, Dämpfer und Reibelement</i>	S. 97
Abbildung 7.4:	<i>Darstellung des Deformationsverhaltens von kugelförmigen Partikeln im PFC3D</i>	S. 98
Abbildung 7.5:	<i>Versuchseinrichtung zur Kalibrierung des Fließverhaltens von Betongemenge während des Füllens</i>	S. 99
Abbildung 7.6:	<i>Detail der Versuchseinrichtung mit transparentem Füllkasten</i>	S. 100
Abbildung 7.7:	<i>Teilung der Gemengematrix in Körngerüst und imaginären masselosen Mörtel</i>	S. 101
Abbildung 7.8:	<i>Gewählte Systemmaße der Füllausrüstung für das numerische Experiment</i>	S. 102
Abbildung 7.9	<i>Bewegungsfunktion des Füllkastens für das numerische Experiment</i>	S. 102

Abbildung 7.10:	<i>Massenverteilungsmatrizen im Ergebnis des numerischen Experimentes nach der Diskrete-Elemente-Methode (DEM)</i>	S. 106
Abbildung 7.11:	<i>Mittelwertmatrize im Ergebnis des numerischen Experimentes nach der Diskrete-Elemente-Methode (DEM)</i>	S. 107
Abbildung 7.12:	<i>Histogramm mit Mittelwertmarke zur Darstellung der Massenverteilung im Ergebnis des numerischen Experimentes</i>	S. 108
Abbildung 7.13:	<i>Streuungszerlegung nach berechneter Variationsursache für die Massenverteilung im Ergebnis des numerischen Experimentes</i>	S. 109
Abbildung 7.14:	<i>Diagramm zur Darstellung der Wechselbeziehung zwischen der erreichten Masse m_i und der Druckfunktion $(pt)_i$ in einer Zelle</i>	S. 109
Abbildung 8.1:	<i>Versuchstand "Betonsteinfertiger" im Technikum des IFF Weimar e.V</i>	S. 110
Abbildung 8.2:	<i>Systemmaße der Füllausrüstung für das reale Experiment (Bemaßung in mm)</i>	S. 111
Abbildung 8.3:	<i>Drucksensor aus Biegeplatte mit Dehnmessstreifen zur Messung der ZDZF am Boden der Formzelle</i>	S. 112
Abbildung 8.4:	<i>Messkette zur Aufnahme der Zellen-Druck-Zeitfunktion während der Füllung im realen Experiment</i>	S. 112
Abbildung 8.5:	<i>Position der Drucksensoren innerhalb der zu fertigenden Einheit</i>	S. 113
Abbildung 8.6:	<i>Massenverteilungsmatrizen im Ergebnis des realen Experimentes am Versuchstand "Steinfertiger" des IFF Weimar e.V.</i>	S. 115
Abbildung 8.7:	<i>Histogramm mit Mittelwertmarke zur Darstellung der Massenverteilung im Ergebnis des realen Experimentes</i>	S. 116
Abbildung 8.8:	<i>Streuungszerlegung nach berechneter Variationsursache für die Massenverteilung im Ergebnis des numerischen Experimentes</i>	S. 117
Abbildung 8.9:	<i>Zellendruck-Zeit-Funktionen während des ersten Füllzyklus der Verifizierungsversuche</i>	S. 118
Abbildung 8.10:	<i>Massenverteilungsmatrix mit ZDZF Marken im Ergebnis des ersten Füllzyklus des Verifizierungsversuches</i>	S. 119
Abbildung 8.11:	<i>Zellendruck-Zeit-Funktionen in der Zelle 3 während des ersten Füllzyklus der Verifizierungsversuche</i>	S. 120
Abbildung 8.12:	<i>Diagramm zur Darstellung der Wechselbeziehung zwischen der erreichten Masse m_i und dem Produkt aus mittlerem Druck und Überdeckungszeit</i>	S. 120
Abbildung 8.13:	<i>Diagramm zur Darstellung der Wechselbeziehung zwischen der Steinmasse m_i, dem mittleren Überdeckungsdruck \bar{p}_U und der Überdeckungszeit t_U in einer Zelle</i>	S. 123
Abbildung 9.1:	<i>Gegenüberstellung der Häufigkeitspolygone aus dem numerischen und dem realen Experiment</i>	S. 127

Abbildung 9.2:	<i>Gegenüberstellung der Häufigkeitspolygone aus den Experimenten und dem industriellen Routinebetrieb</i>	S. 127
Abbildung 9.3:	<i>Gegenüberstellung der Mittelwertmatrizen mit Kennzeichnung der Zellen zur Aufnahme der Druck-Zeit-Funktionen</i>	S. 129
Abbildung 9.4:	<i>Druck-Zeit-Funktionen in acht ausgewählten Zellen während des ersten Füllzyklus der Simulation</i>	S. 130
Abbildung 9.5:	<i>Druck-Zeit-Funktionen in sechs ausgewählten Zellen während des ersten Füllzyklus des Verifizierungsversuches</i>	S. 130
Abbildung 9.6:	<i>Momentaufnahme der Animation – Füllkasten direkt vor dem vorderen Umkehrpunkt</i>	S. 131
Abbildung 9.7:	<i>Füllwagenrückwand überfährt in der Vorwärtsbewegung die hintere Zeile der Form – schematische Darstellung</i>	S. 131
Abbildung 9.8:	<i>Füllwagenvorderwand überfährt in der Rückwärtsbewegung eine Zeile im Zentrum der Form – schematische Darstellung</i>	S. 132
Abbildung 9.9:	<i>Schematische Darstellung zur Erzeugung der temporären Kompression in einer Formzelle – numerisches Experiment</i>	S. 133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	<i>Übersicht der empirischen Kennwerte des Datensatzes K6</i>	S. 41
Tabelle 3.2:	<i>Berechnungstabelle zur Ermittlung der Wertepaare $h_j(f_j)$ des Datensatzes K6</i>	S. 41
Tabelle 4.1:	<i>Stichprobenbezogene empirische Kennwerte der Massenverteilungen an den Steinformmaschinen 2 und 9</i>	S. 65
Tabelle 4.2:	<i>Statistische Kenngrößen im Ergebnis der ersten Füllstufe</i>	S. 67
Tabelle 4.3:	<i>Statistische Kenngrößen im Ergebnis beider Füllstufen</i>	S. 68
Tabelle 4.4:	<i>Statistische Kenngrößen im Ergebnis der zweiten Füllstufe</i>	S. 69
Tabelle 4.5:	<i>Vergleich der statistischen Kenngrößen vor (9) und nach (9.1) der Modifikation der Füllstandsregelung für den Kernfüllwagen</i>	S. 72
Tabelle 5.1:	<i>Matrix zur Beschreibung der Korrelation zwischen den Merkmalen der Stichprobe 10K+V mit $n=48$</i>	S. 74
Tabelle 5.2:	<i>Korrelationsmatrix für die Merkmale lagerfeuchte Masse, Rohdichte und Druckfestigkeit der Stichprobe 10K+V mit $n=480$</i>	S. 76
Tabelle 5.3:	<i>Streuungszerlegung zur Ermittlung der Abweichungsquadrate</i>	S. 77
Tabelle 6.1:	<i>Flächenverhältnisse zwischen der Grundfläche des Füllkastens (Transportraum) und der Grundfläche des Füllraumes</i>	S. 85
Tabelle 6.2:	<i>Schema zur idealisierten Beschreibung der ersten Füllstufe</i>	S. 91
Tabelle 7.1:	<i>Übersicht ausgewählter Simulationsparameter</i>	S. 103
Tabelle 7.2:	<i>Übersicht ausgewählter Momentaufnahmen der Animation</i>	S. 104
Tabelle 7.3:	<i>Übersicht der empirischen Kennwerte der Massenverteilung im Ergebnis des numerischen Experimentes</i>	S. 108
Tabelle 8.1:	<i>Gemengerezeptur für die Verifizierungsversuche</i>	S. 113
Tabelle 8.2:	<i>Übersicht der Versuchsparameter</i>	S. 114
Tabelle 8.3:	<i>Übersicht der empirischen Kennwerte der Massenverteilung im Ergebnis des realen Experimentes</i>	S. 116
Tabelle 9.1:	<i>Gegenüberstellung der drei unterschiedlichen Abstraktionsebenen</i>	S. 116

Tabelle 9.2:	<i>Übersicht der empirischen statistischen Kennwerte im Ergebnis des numerischen Experimentes, des realen Experimentes und des industriellen Routinebetriebes</i>	S. 126
Tabelle 9.3:	<i>Übersicht der Rangfolge der Variationsursachen im Ergebnis des numerischen Experimentes, des realen Experimentes und des industriellen Routinebetriebes</i>	S. 128

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1:** *Ausgewählte Beispiele unterschiedlicher frisch entschalter Betonsteine*
- Anlage 2.1:** *Ausgewählte Beispiele unterschiedlicher konstruktiver Lösungen zur Gestaltung des Kernfüllwagens*
- Anlage 2.2:** *Ausgewählte Beispiele unterschiedlicher konstruktiver Lösungen zur Gestaltung des Vorsatzfüllwagens*
- Anlage 2.3:** *Schematische Darstellung der Bewegungsfunktionen von Schwingtisch und Unterlagsbrett bei Systemen mit Schockvibration*
- Anlage 2.4:** *Schematische Darstellung der Arbeitsstufen während der Formgebung und Verdichtung an Steinformmaschinen bei der Herstellung von Betonpflastersteinen*
- Anlage 3:** *Schemata der Messdatenauswertung*
- Anlage 4.1:** *Ergebnisse aller untersuchten Steinformmaschinen stichprobenbezogen in Übersicht*
- Anlage 4.2:** *Ergebnisse aller untersuchten Steinformmaschinen zyklenbezogen in Übersicht*
- Anlage 5:** *Übersicht der Ergebnisse der Streuungserlegung*
- Anlage 6:** *Zellendruckschema in Abhängigkeit von der geradlinigen Bewegung des Füllwagens*
- Anlage 7.1:** *Ausgewählte Momentaufnahmen aus der Simulation des Füllprozesses im PFC3D*
- Anlage 7.2:** *Ausgewählte Zellendruck-Zeit-Funktionen innerhalb eines Zyklus erzeugt aus der Simulation des Füllprozesses im PFC3D*
- Anlage 8:** *Ausgewählte Zellendruck-Zeit-Funktionen innerhalb eines Zyklus – erzeugt im Verifizierungsversuch*

Abkürzungen

<i>A/D</i>	Analog – Digitalwandler
<i>AM</i>	Arithmetisches Mittel
<i>ANOVA</i>	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
<i>BDB</i>	Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.V.
<i>BGB</i>	Bund Güteschutz Beton- und Stahlbetonfertigteile e.V.
<i>CAD</i>	Computer Aided Design
<i>DEM</i>	Diskrete Elemente Methode
<i>DF</i>	Dünnformat
<i>DIN-EN</i>	Deutsche Industrienorm – Euronorm
<i>DMC</i>	Digital Measurement Computer
<i>DMS</i>	Dehnmessstreifen
<i>DZF</i>	Druck-Zeit-Funktion
<i>FA</i>	Flugasche
<i>FFT</i>	Fast-Fourier-Transformation
<i>GM</i>	Gesteinsmehl
<i>IBZ</i>	Internationale Bibliographie der Zeitschriftenliteratur
<i>ICONDA</i>	International Construction Database
<i>IFF</i>	Institut für Fertigteiltechnik und Fertigbau Weimar e.V.
<i>iR</i>	Industrielle Routine
“K“	Kernbetonfüllung (Füllstufe 1)
“K+V“	Kern- und Vorsatzbetonfüllung (Füllstufe 1 und 2)
“V“	Vorsatzbetonfüllung (Füllstufe 2)
<i>MD</i>	Molekulardynamik
<i>nE</i>	Numerisches Experiment
<i>MVM</i>	Massenverteilungsmatrix
<i>PC</i>	Personalcomputer
<i>PFC3D</i>	Particle Flow Code in 3 Dimensions
<i>rE</i>	Reales Experiment
<i>SFM</i>	Steinformmaschine
<i>SPS</i>	speicherprogrammierbare Steuerung
<i>SQE</i>	Erklärte Variation
<i>SQR</i>	Restvariation
<i>SQT</i>	Totale Variation
<i>RSWB</i>	Datenbank Raumordnung, Städtebau, Wohnungswesen, Bauwesen

Z	Zyklus
ZDM	Zellen-Druckmatrix
$ZDZF$	Zellendruck-Zeit-Funktion
Ze	Zelle der Form

Variablen und Symbole

a	Beschleunigung
\tilde{a}	Effektivwert der Beschleunigung
\vec{a}_i	Beschleunigungsvektor
a_{FK}	Beschleunigung des Füllwagens
A_{FR}	Oberfläche des Füllraumes
A_{TR}	Grundfläche des Transportraumes
A_{Ze}	Grundfläche der zu füllenden Zelle
A_{ZDZF}	Produkt aus Überdeckungszeit und Überdeckungsdruck
b	Breite der für die statistischen Auswertungen gebildeten Klassen
b_{TR}	Breite des Transportraumes
b_{FR}	Breite des Füllraumes
c	Konstante im Regressionsmodell
d_{Kugel}	Durchmesser der Kugeln zur Abbildung des Betongemenges in der Simulation
d_{max}	Größter Korndurchmesser
f	Frequenz
f_i	Füllungskennzahl
f_j	Füllungskennzahlklasse
f_{soll}	Sollwert der Füllungskennzahl
f_{max}	Größter Wert der Füllungskennzahlen
f_{min}	Kleinster Wert der Füllungskennzahlen
f_{mittel}	Arithmetisches Mittel der Füllungskennzahlen
\bar{f}	Arithmetisches Mittel der Füllungskennzahlen – stichprobenbezogen
\bar{f}_{Ze}	Arithmetisches Mittel der Füllungskennzahlen – zellenbezogen
\bar{f}_Z	Arithmetisches Mittel der Füllungskennzahlen – zyklusbezogen
$f_{0,5}$	Medianwert der Füllungskennzahlen
$f_{0,05}$	Unterer 5 %-Quantilwert der Füllungskennzahlen

F_{Err}	Erregerkraft
\vec{F}_i	Kraftvektor
F_F	Federrückstellkraft
F_H	Horizontale Kraftkomponente
F_N	Normalkraft
F_R	Haftreibungskraft
F_V	Vertikale Kraftkomponente
F_W	Widerstandskraft
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe
Δh	Setzmaß im Füllraum
h_j	Relative Häufigkeit der für die statistischen Auswertungen gebildeten Klassen
h_{FR}	Höhe des Füllraumes
h_{TR}	Höhe des Transportraumes
J	Trägheitsmoment
k	Anzahl der für die statistischen Auswertungen innerhalb einer Stichprobe gebildeten Klassen
l_{FR}	Länge des Füllraumes
l_{TR}	Länge des Transportraumes
\dot{m}_G	Massenstrom des einfließenden Gemenges
m_u	Unwuchtmasse
m_{FR}	Masse des in den Füllraum eingebrachten Betongemenges
m_{FK}	Masse des Frischbetonkörpers
m_{TR}	Gemengemasse im Transportraum
m_{VR}	Masse des Betongemenges im Füllraum
\hat{m}	Geschätzte Masse im Regressionsmodell
m_i	Eingefüllte Gemengemasse
m_{soll}	Einzufüllende Gemengemasse
m_{ref}	Referenzmasse zur Berechnung der Füllungskennzahl
m_{max}	Größte eingefüllte Gemengemasse – stichprobenbezogen
m_{min}	Kleinste eingefüllte Gemengemasse – stichprobenbezogen
\bar{m}	Arithmetisches Mittel der eingefüllten Gemengemassen – stichprobenbezogen
\bar{m}_{Ze}	Arithmetisches Mittel der eingefüllten Gemengemassen – zellenbezogen
m_{Zsoll}	Die je Zyklus in den Füllraum einzubringende Gemengemasse

\vec{M}_i	Momentenvektor
n	Probenzahl je Stichprobe
n_{PZ}	Probenzahl je Zyklus
n_Z	Zyklenzahl je Stichprobe
n_{Ze}	Probenzahl je Zellenposition
n_j	Besetzungszahl der für die statistischen Auswertungen gebildeten Klassen
n_{Kugel}	Anzahl der Kugeln zur Abbildung des Betongemenges in der Simulation
p	Druck
\bar{p}	Mittlerer Druck
Δp	Druckdifferenz
$p_{\bar{U}}$	Überdeckungsdruck der Gemengeschüttung
$\bar{p}_{\bar{U}}$	Mittlerer Überdeckungsdruck der Gemengeschüttung
r_u	Abstand zwischen Drehpunkt und Massenschwerpunkt der Unwuchtmasse
R	Spannweite der Merkmale einer Stichprobe
s	Standardabweichung
$s_{\bar{U}}$	Überfahrweg des Füllwagens
s_{FK}	Fahrweg des Füllwagens
s_{PFK}	Pendelweg des Füllwagens
t	Zeit
t_A	Zeitpunkt zum Beginn des Füllens
t_E	Zeitpunkt zum Ende des Füllens
t_G	Einfließzeit des Gemengestromes
$t_{\bar{U}}$	Überdeckungszeit des Füllwagens
v_G	Einfließgeschwindigkeit des Gemengestromes
v_{TR}	Geschwindigkeit des Füllwagens
V	Empirischer Variationskoeffizient – stichprobenbezogen
V_{FR}	Volumen des Füllraumes
V_{FK}	Volumen des Frischbetonkörpers
V_{STR}	Schüttvolumen des Betongemenges im Transportraum
V_{TR}	Volumen des Transportraumes
V_{VR}	Volumen des Verdichtungsraumes
V_{Zi}	Empirischer Variationskoeffizient – zyklusbezogen
x	Merkmal I einer Grundgesamtheit
y	Merkmal II einer Grundgesamtheit

Griechische Buchstaben

$\vec{\alpha}_i$	Winkelbeschleunigungsvektor
α	Exponent zur Beschreibung des Einflusses der Überdeckungszeit
β	Exponent zur Beschreibung des Einflusses des Überdeckungsdruckes
Ω	Erregerkreisfrequenz
ρ	Empirischer Variationskoeffizient
ρ_{FR}	Rohdichte im Füllraum
ρ_{FK}	Rohdichte des Frischbetonkörpers
ρ_G	Dichte des Gemengestromes
ρ_{Kugel}	Dichte der Kugeln zur Abbildung des Betongemenges in der Simulation
ρ_{VR}	Rohdichte im Verdichtungsraum

1. Einleitung

Die Produktion von Betonsteinen mit Steinformmaschinen hat sich weltweit zu einem wesentlichen Bestandteil der industriellen Vorfertigung im Bauwesen entwickelt. Deutschland gilt global als Marktführer in der Herstellung von Maschinen und Ausrüstungen für die Betonsteinproduktion. Von zehn weltweit neu in Betrieb zu nehmenden Produktionsanlagen werden sieben von deutschen Herstellern geliefert [1]. Die Fachpresse berichtet regelmäßig über den Bau neuer, immer leistungsfähigerer Betonsteinwerke [2],[3],[4]. Die Abbildung 1.1 beschreibt das technologische Schema der Betonsteinproduktion.

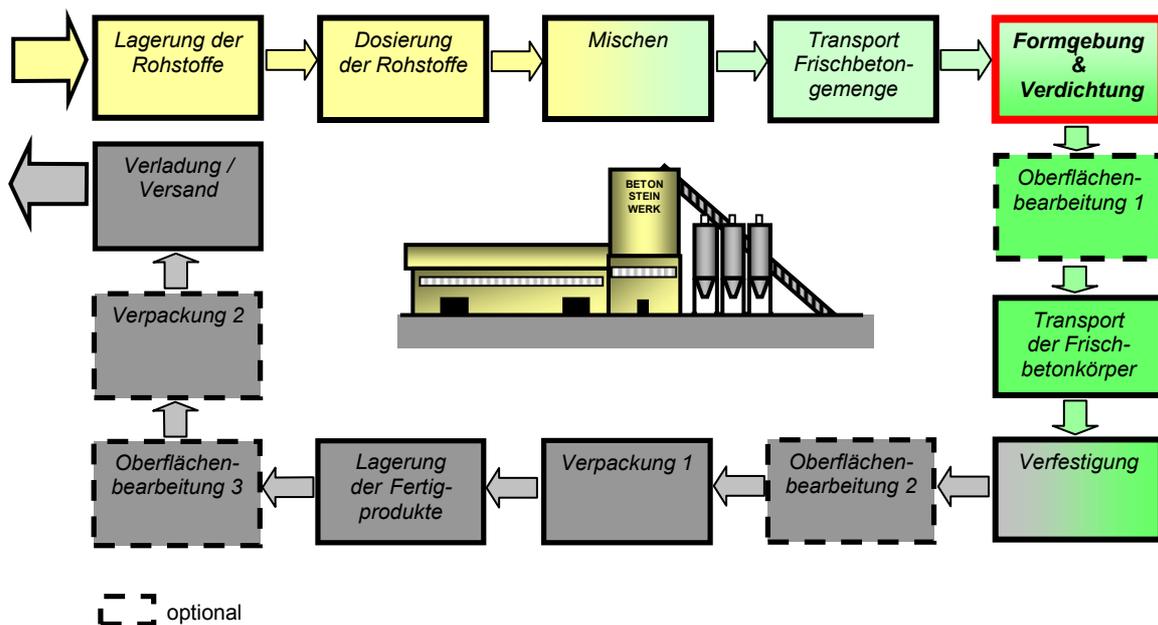


Abbildung 1.1: Technologisches Schema der Betonsteinproduktion

Der Rückblick auf die Entwicklung der Produktionstechnik zur Herstellung von Betonsteinen umfasst einen relativ kurzen Zeitraum. In den dreißiger Jahren des vergangenen Jahrhunderts begann man in Deutschland, mit einfachen Schalungen und Verdichtungshilfen manuell kleinformatige Elemente herzustellen. Damals stand die Fertigung einfacher, kompakter Betonkörper im Vordergrund. Mit der Entwicklung von mechanisierten Steinformeinrichtungen in den fünfziger Jahren erreichte die Herstellung eine neue Dimension bezüglich Qualität und Quantität. Die Verknüpfung von Mechanisierung und Automatisierung in den siebziger Jahren und die Integration der Steinformmaschinen in geschlossene Fertigungskreisläufe stellte einen weiteren markanten Punkt in der Entwicklung der Produktionstechnik dar, dies sowohl bezüglich der Produktivität der Fertigung als auch bezüglich der Qualität und des Designs der Produkte.

In der Gegenwart sind Steinformmaschinen komplexe, automatisierte technische Ausrüstungen zur Formgebung und Verdichtung steifer Betongemenge. Sie vereinen die Realisierung der drei Prozessphasen

- Füllen der Form mit Betongemenge,
- Verdichten des Betongemenges und
- Entschalen der erzeugten Frischbetonkörper

in einer kompakten Einheit. Die Abbildung 1.2 zeigt eine moderne Steinformmaschine in Seitenansicht.



Abbildung 1.2: Moderne Steinformmaschine (Quelle: www.hessgroup.com)

Steinformmaschinen stellen in ihrem Aufbau komplizierte dynamische Mehrmassensysteme dar, die sehr unterschiedlich auf maschinentechnische und/oder stoffliche Veränderungen reagieren [5]. Trotz des weltweit verbreiteten Einsatzes von Steinformmaschinen gibt es gegenwärtig immer noch Defizite bezüglich der Grundlagen zur maschinentechnischen Auslegung sowie auch bezüglich der Modellierung und Projektierung des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses. Sowohl in Publikationen als auch im täglichen Sprachgebrauch der Baustoffindustrie ermangelt es einer einheitlichen Terminologie zur Anlagen- und Prozessbeschreibung. Dies führt in der Kommunikation häufig zu Missverständnissen. Auch nach langjähriger praktischer Erfahrung mit Steinformmaschinen wird der Formgebungs- und Verdichtungsprozess bei der Herstellung von Betonsteinen nicht ausreichend stabil beherrscht. Für die Anlagenbediener kann sich je nach Produktionsaufgabe insbesondere die Einstellung des Füllens der Form als äußerst schwierig erweisen.

In Anbetracht der Vielfalt der Stellgrößen an der Steinformmaschine stoßen die Bediener häufig an die Grenzen ihrer Kompetenz. Es mangelt an theoretisch fundierten Vorgaben und an Trainingsprogrammen. Infolgedessen entstehen Defizite in der Qualität der Produkte. Vergleichsweise hohe Ausschuss- und Reklamationsquoten belasten die wirtschaftlichen Ergebnisse der Hersteller und das Image der Produkte. Die Abbildung 1.3 zeigt Betonpflastersteine als Straßenbelag mit unterschiedlichen Abwitterungen an der Steinoberfläche. Ein solches Schadensbild stellt einen typischen Qualitätsmangel infolge inhomogener Füllung der Form dar.



Abbildung 1.3: *Unterschiedliche Abwitterungen bei Betonpflastersteinen*

1.1 Betonsteinarten

Betonsteine sind kleinformatige Elemente, die von Hand oder mittels Montagehilfen zu Bausystemen zusammengefügt werden. In der Gegenwart ist insbesondere in Deutschland eine nur noch schwierig zu überschauende Produktvielfalt anzutreffen. Am Markt werden unterschiedliche Produkte nach Größe und/oder Gestalt der Elemente und/oder nach Art der verwendeten Betone angeboten. Die Abbildung 1.4 zeigt ausgewählte Beispiele unterschiedlichster, auf Steinformmaschinen gefertigter Produkte.



Abbildung 1.4: *Betonsteine unterschiedlichster Gestalt und Größe*

Die Betonsteine werden in ihrer Größe einerseits durch den zur Verfügung stehenden Fertigungsraum innerhalb der Steinformmaschine und andererseits durch die zu verarbeitende und später zu transportierende Betonmasse limitiert. Länge und Breite der Einzelelemente betragen im Regelfall ≥ 50 mm und ≤ 1000 mm. Für die Fertigungshöhe gilt ≤ 500 mm. Fertigungshöhen über 500 mm bilden bisher eine Ausnahme [6]. Die zu verarbeitende und zu transportierende Betonmasse bleibt im Regelfall auf maximal ca. 500 kg pro Fertigungseinheit begrenzt.

Nach Art der Verwendung der Betonsteine kann im Wesentlichen zwischen vier Gruppen differenziert werden:

- Betonsteine für den Mauerwerksbau
(Mauer- und Deckensteine, Schalsteine sowie Kaminmantelsteine) aus haufwerksporigen oder gefügedichten Betonen mit leichten und/oder normalen Gesteinskörnungen;
- Betonsteine zur Verkehrsflächenbefestigung und -gestaltung
(Pflastersteine, Pflasterplatten, Gwegplatten, Bord- und Rinnsteine) meist aus gefügedichten Betonen mit normalen Gesteinskörnungen, selten aus haufwerksporigen Betonen mit normalen Gesteinskörnungen;
- Betonsteine zur Böschungsbefestigung und/oder Grundstückseinfriedung
(Blocksteine, Minipalisaden und Pflanzkübel) meist aus gefügedichten oder haufwerksporigen Betonen mit normalen Gesteinskörnungen;
- Betonsteine für Sonderanwendungen
(Schallabsorptionselemente, Fundamentsteine etc.) aus haufwerksporigen oder gefügedichten Betonen mit leichten und/oder normalen Gesteinskörnungen.

So mannigfaltig die Betonsteine sind, so different sind die Anforderungen an ihre Gebrauchswerteigenschaften. Stehen beispielsweise bei Mauersteinen Forderungen aus Bauwerksstatik und Raumklima im Vordergrund, so sind es bei Pflaster- und Bordsteinen Forderungen nach Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen und klimatischen Beanspruchungen. Die zu gewährleistenden Erzeugniseigenschaften und die in der werkseigenen Produktionskontrolle anzuwendenden Prüfverfahren werden in Deutschland für Betonsteine vorwiegend durch DIN - EN Produktstandards beschrieben. Anforderungen und Prüfverfahren für nicht standardisierte Produkte werden durch Richtlinien des BDB bzw. BGB oder durch Sonderzulassungen des Deutschen Institutes für Bautechnik fixiert. Eine Übersicht der Erzeugnisse und der Regelwerke wird ausführlich und anschaulich in [7] gegeben.

Auf Grund der Vielfalt der herzustellenden Betonsteine können die Anforderungen an die Prozessgestaltung während der gesamten Formgebung und Verdichtung äußerst unterschiedlich sein. Die Bildübersicht in der Anlage 1.1 zeigt Beispiele differenter, frisch entschalteter Produkte. Mit der unterschiedlichen Anzahl, Größe, und/oder Gestalt der zu fertigenden Betonsteine ergeben sich insbesondere für die Füllung der Form mit Betongemenge diverse Aufgabenstellungen.

1.2 Zielstellung

Im Vorfeld der Untersuchungen wurde eine umfangreiche Literatur- und Produktrecherche unter Verwendung deutscher und englischer Suchworte durchgeführt [8].

Folgende Datenbanken wurden dabei für die Suche genutzt:

- Bestandskatalog Bibliothek der Bauhaus-Universität Weimar;
- RSWB - Raumordnung, Städtebau, Wohnungswesen, Bauwesen;
- IBZ - Internationale Bibliographie der Zeitschriftenliteratur;
- Datenbank ICONDA
- Internet.

Treffer wurden ausschließlich in Prospekten und Präsentationen der Hersteller von Maschinen und Anlagen zur Produktion von Beton, Betonfertigteilen und Betonwaren erzielt. Die Füllung der Form mit Betongemenge wird in diesen Quellen unter Verwendung unterschiedlicher Deskriptoren zwar erwähnt, jedoch nicht einmal ansatzweise beschrieben. Treffer in Fachbüchern, Fachzeitschriften oder in anderen wissenschaftlichen Publikationen wurden nicht erzielt.

Die industrielle Praxis wird von subjektivem Expertenwissen dominiert. Dieses Wissen ist zumeist in den Erfahrungen und Beobachtungen der Konstrukteure bzw. Anlagenbediener begründet [9]. Weiterentwicklungen der Fülltechnik basieren folgerichtig vor allem auf Empirie in den Betonsteinwerken. Neue Prozessaufgaben werden dort bisher fast ausschließlich durch Feldversuche, basierend auf der "Try and Error" Methode realisiert bzw. analysiert.

Die bisher publizierten Bemühungen, den Formgebungs- und Verdichtungsprozess wissenschaftlich zu durchdringen, stellen ausschließlich Überlegungen und Modelle zur Deskription der Verdichtung in den Mittelpunkt [5],[9],[10]. In den Aufsätzen wird der Prozess auf die Verdichtung des bereits in den zu füllenden Raum eingebrachten Betongemenges reduziert. Das vorausgehende Füllen der Form mit Betongemenge und die komplexe Betrachtung aller drei Teilprozesse Füllen, Verdichten und Entschalen bleiben bisher quasi unberücksichtigt. Die während der Füllung wirkenden Mechanismen können als nahezu unbekannt betrachtet werden. Die Ergebnisse der Literatur- und Produktrecherche bestätigen dies.

Die industrielle Praxis zeigt, dass moderne Steinformmaschinen bei qualifizierter Prozessführung durchaus in der Lage sein können, steife Betongemenge in wenigen Sekunden gut zu komprimieren. Schwierig hingegen erweist es sich, die Befüllung der Form bzw. der Formzellen mit Betongemenge ausreichend homogen zu gestalten. Das stetig wachsende Spektrum unterschiedlichster zu realisierender Produktgeometrien schafft eine Vielzahl differenter Aufgaben. Das aus ökonomischen Zwängen motivierte Bestreben der Industrie immer mehr Mengeneinheiten pro Fertigungszyklus zu generieren, lässt den Teilprozess Füllen dabei zusätzlich stetig an Bedeutung und an Anspruch gewinnen.

Die ungleichmäßige Verteilung des Betongemenges im zu füllenden Raum erweist sich als das primäre Problem bei der Gestaltung des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses. Differente Masseverteilungen innerhalb der Fertigungseinheit sowie Masseunterschiede von Fertigungszyklus zu Fertigungszyklus sind die Folge einer unzulänglichen Füllung. Schwankungen in Steinhöhe, Steindichte, und Steinoptik sowie Störungen in den Folgeprozessen stehen im Ergebnis.

Eine vollständige technologische Analyse und Beschreibung der Arbeitsgänge des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses respektive der Füllung an Steinformmaschinen wurde bisher nicht publiziert. Methoden zur expliziten Quantifizierung und Evaluierung der erreichten Füllungsgüte sind ebenfalls nicht bekannt. Die Zielstellung der Arbeit besteht deshalb darin, den technischen Herstellungsprozess – ausgehend von einer Analyse des Füllvorganges – besser zu verstehen und damit steuern zu können. Dieses Ziel soll mit den im Folgenden beschriebenen Schritten erreicht werden:

- Den *ersten Schritt* und damit wesentliche Voraussetzung zur wissenschaftlichen Aufarbeitung des Themas bilden Beschreibung, begriffliche Definitionen und die technologische Strukturierung des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses an Steinformmaschinen.
- Im *zweiten Schritt* wird eine Methode zur Quantifizierung und Evaluierung der Güte des erreichten Prozessergebnisses entwickelt.
- Im *dritten Schritt* steht die systematische Anwendung der neuen Methode zur Beurteilung der im industriellen Routinebetrieb tatsächlich erreichbaren Füllungsgüten.
- Resultierend aus den Beobachtungen in der industriellen Produktion wird der Füllprozess im *vierten Schritt* zur Ableitung kausaler Zusammenhänge zwischen Füllungsgüte, Füllaufgabe und Füllausrüstung analysiert und modelliert.
- Im *fünften Schritt* werden moderne Methoden der numerischen Simulation als Werkzeug zur Analyse des Füllprozesses erschlossen, kalibriert und verifiziert. Die Ergebnisse dienen zur erstmaligen Ableitung grundsätzlicher Kausalitäten.
- Im *sechsten Schritt* der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf die nächsten, primär zu untersuchenden Aufgaben für die weitere Erforschung des Füllprozesses gegeben.

Mit der vorliegenden Arbeit soll eine Grundlage für die wissenschaftliche Aufarbeitung des Themas "Füllung der Form mit Betongemenge" als erste Prozessphase der Formgebung und Verdichtung bei der Betonsteinproduktion geschaffen werden.

2. Technologische und technische Grundlagen

2.1 Technologie der Betonsteinproduktion

Die Technologie der industriellen Betonsteinproduktion wird in der Gegenwart von vollautomatischen Fertigungskreisläufen bestimmt. Das Layout in der Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die Maschinen und Ausrüstungen einer einfachen Kreislaufanlage ohne zusätzliche Nachbearbeitungsstationen. Im Zentrum der Anlage steht die Steinformmaschine (1). Sie realisiert die Formgebung und Verdichtung.

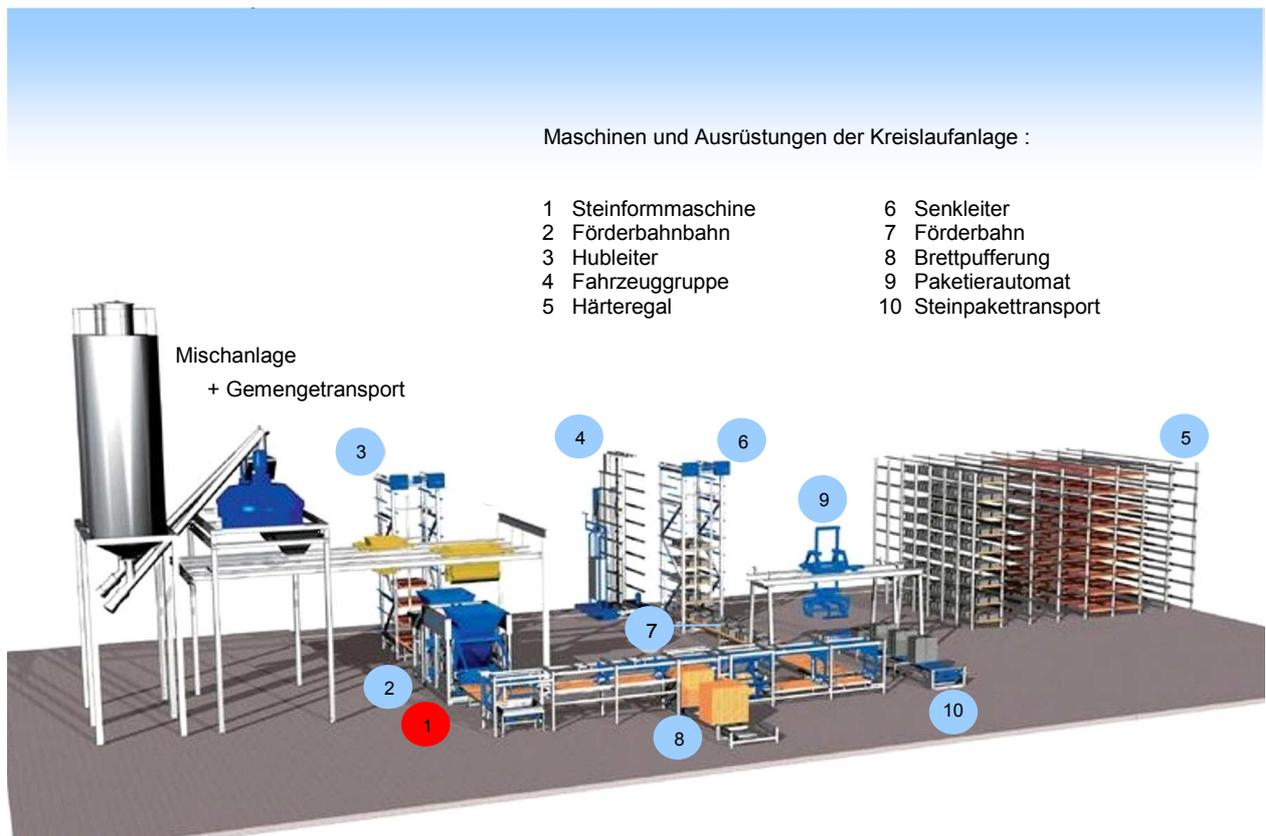


Abbildung 2.1: Kreislaufanlage zur Produktion von Betonsteinen in Übersicht
(Quelle: www.zenith.de)

Die Produktion von Betonsteinen beginnt mit der Herstellung des Betongemenges. Im gezeigten Beispiel verfügt die Mischanlage über zwei Mischer. Je nach der Art der herzustellenden Betonsteine können so parallel unterschiedliche Gemenge hergestellt werden. Mittels Kübelbahnen werden die Gemenge zur Kreislaufanlage transportiert und in die Fülltrichter der Steinformmaschine (1) übergeben.

Die Steinformmaschine generiert mit jedem Fertigungszyklus eine Einheit geformter und verdichteter Frischbetonkörper. Mit dem Abschluss der Formgebung und Verdichtung verlässt die gefertigte, frisch entschaltete Einheit auf einer Fertigungsunterlage die Steinformmaschine. Als Fertigungsunterlagen werden so genannte Unterlagsbretter genutzt. Ausgehend von dem Kreislauf, den die Unterlagsbretter mit den fortwährend frisch gefertigten Betonkörpern in der Produktion beschreiben, hat sich die Bezeichnung "Kreislaufanlage" im industriellen Sprachgebrauch für Steinfertigungslinien dieser Art etabliert. Innerhalb des Kreislaufes erfüllen die Unterlagsbretter multifunktionale Aufgaben. Während der Formgebung und Verdichtung sind sie zunächst Bestandteil der Schalung und stellen innerhalb der Steinformmaschine (1) ein

Während des Füllens steigen mit dem Einfließen des Betongemenges die Masse und damit die Dichte im auszufüllenden Raum V_{FR} (Füllraum) an. Die Luft wird in dieser Phase weitestgehend aus dem Raum verdrängt. Mit der Verdichtung wird das eingefüllte Gemenge unter Vibration und Druck komprimiert. Die Packungsdichte des zu generierenden Frischbetonkörpers wird erhöht und die noch im Gefüge vorhandenen Luftporen werden auf ein Minimum reduziert. Die Höhe der Frischbetonsäule sinkt um das Maß Δh ab. Mit der Entschalung des erzeugten Frischbetonkörpers werden direkt im Anschluss an die Verdichtung zunächst die Seitenschalung (Formeinsatz) und unmittelbar darauf folgend die Kopfschalung (Druckplatte) gelöst. Das Entschalen bleibt ohne signifikanten Einfluss auf die Masse oder Rohdichte des Frischbetonkörpers.

Füllen der Form mit Betongemenge

Das Füllen der Form mit Betongemenge ist die erste Phase des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses. Das Ziel der Füllung ist es,

- eine der angestrebten Steinrohichte entsprechende Masse des zu verarbeitenden Betongemenges in den durch die Form vorgegebenen Füllraum einzubringen und
- die Massen- und Gemengeanteile dabei im Füllraum möglichst homogen zu verteilen.

Die Realisierung dieser Zielstellung bildet eine wesentliche Voraussetzung für das Gelingen des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses. Gleichzeitig teilt die durch die Form bestimmte Parzellierung des Füllraumes das eingebrachte Frischbetongemenge in diskrete Massen. Die Parzellierung wird durch die Anzahl und Anordnung der pro Fertigungseinheit herzustellenden Betonkörper bestimmt.

Verdichten des Betongemenges

Das Verdichten des bereits in den Füllraum eingebrachten Betongemenges ist die zweite Phase des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses. Das Ziel des Verdichtens ist es,

- die der angestrebten Rohdichte adäquate Packungsdichte im Frischbetonkörper zu erzeugen.

Die Komprimierung des in den Füllraum eingebrachten Betongemenges stellt einen komplexen Teilprozess dar. Ausschließlich den mit der Verdichtung verbundenen Fragestellungen wurden bisher wissenschaftliche Aufmerksamkeit gewidmet. Dementsprechend hoch ist die Zahl der Publikationen zu diesem Thema. Meist wird der Formgebungs- und Verdichtungsprozess dabei auf das Verdichten des bereits in die Form eingebrachten Betongemenges (Phase 2 in der Abbildung 2.2) fokussiert. Die Einflussgrößen und Wirkungsmechanismen während der Verdichtung an Steinformmaschinen werden ausführlich und anschaulich in [9] beschrieben.

Entschalen der Frischbetonkörper

Das Entschalen der erzeugten Frischbetonkörper ist die 3. Phase des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses. Das Entschalen hat das Ziel,

- die zur Ausformung der angestrebten Geometrie notwendigen Schalungselemente vom erzeugten Frischbetonkörper zu trennen.

Die durch das Entschalen an der Oberfläche und im Querschnitt wirkenden vakuum-, reibungs- und adhäsionsverursachten Spannungen sollen weder die Struktur noch die Geometrie des Frischbetonkörpers verändern.

Der Entschalvorgang stellt ebenfalls einen eigenständigen Teilprozess der Formgebung und Verdichtung dar. Schäden und Qualitätsmängel an den Frischbetonkörpern werden häufig erst durch die während des Entschalens wirkenden Spannungen verursacht. Eine wissenschaftliche Aufarbeitung dieses Teilprozesses steht noch aus.

2.3 Steinformmaschinen (SFM)

Steinformmaschinen sind Vollautomaten. Innerhalb eines Fertigungszyklus

- füllen sie die Form mit Betongemenge,
- verdichten das Betongemenge und
- entschalen die hergestellten Frischbetonkörper.

Anschließend übergeben sie die gefertigte Einheit an ein Transportsystem und schalen den zu füllenden Raum erneut für den nächst folgenden Zyklus.

Der Begriff Steinformmaschine wurde erstmals mit der Erarbeitung der neuen Norm DIN EN 12629-2 [11] eingeführt. In der Industrie werden Automaten dieser Art meist noch als Brettfertiger bezeichnet. Ausgehend von der Verwendung von Brettern als Fertigungsunterlagen wurde dieser Begriff im industriellen Alltag des deutschsprachigen Raumes geprägt. Linguistisch betrachtet, ist er missverständlich und suggeriert die Herstellung von Brettern. Bei der Verfassung der neuen Norm fand er daher keine Anwendung. Um die Terminologie der vorliegenden Arbeit normkonform zu gestalten, werden die Begriffe Brettfertiger und Steinformmaschine gleichgesetzt.

Die DIN EN 12629-2 bildet einen bemerkenswerten Versuch, die Terminologie im industriellen Sprachgebrauch neu zu ordnen. Die Zielstellung der Verfasser, die Bezeichnungen aller Baugruppen bzw. Elemente einheitlich zu definieren, war nicht zuletzt sicherheitstechnischen und damit auch juristischen Notwendigkeiten geschuldet. Die Norm definiert wesentliche Begriffe, die den strukturellen Aufbau einer Steinformmaschine beschreiben. Wichtige Differenzierungen in Aufbau und Wirkungsweise, die die Qualität des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses nachhaltig bestimmen, bleiben jedoch unberücksichtigt. Im Folgenden werden Aufbau und Wirkungsweise von stationären Steinformmaschinen beschrieben und systematisiert.

2.3.1 Aufbau von Steinformmaschinen

Die Steinformmaschine besteht im Wesentlichen aus

- peripher angeordneten Elementen zur Bevorratung und zur Füllung des Betongemenges sowie aus
- zentral angeordneten Elementen zur Schalung bzw. zur Verdichtung der zu erzeugenden Frischbetonkörper.

Durch die Aktionen der Elemente beziehungsweise durch die Interaktion zwischen ihnen wird das schüttgutähnliche steife Betongemenge in das Stückgut Betonstein transformiert. Die Abbildung 2.3 zeigt in einer schematischen Darstellung den strukturellen Aufbau einer Steinformmaschine in Seitenansicht.

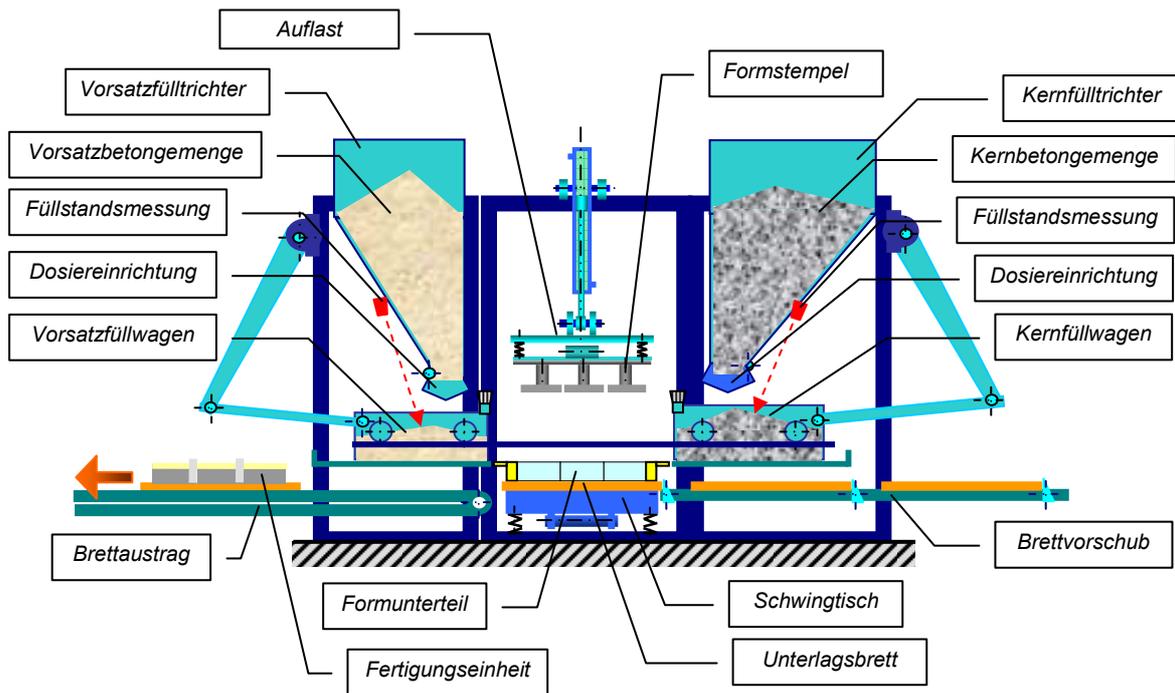


Abbildung 2.3: Steinformmaschine mit Kern- und Vorsatzfülleinrichtung in Grundstellung in vereinfachter schematischer Darstellung

Die Elemente zur Bevorratung und Füllung des Betongemenges werden nachstehend unter dem Begriff "Fülleinrichtung" zusammengefasst.

Die Elemente zur Verdichtung des Betongemenges werden nachstehend unter dem Begriff "Verdichtungseinrichtung" zusammengefasst.

Die Elemente zur Schalung beziehungsweise Entschalung des erzeugten Frischbetonkörpers werden nachstehend unter dem Begriff "Schal- und Entschal-einrichtung" zusammengefasst.

2.3.1.1 Fülleinrichtung

Die Fülleinrichtung besteht aus

- dem Fülltrichter mit Dosiereinrichtung und
- dem Füllwagen mit Antriebssystem.

In der Basisausstattung besitzen Steinformmaschinen eine Kernfülleinrichtung. Mit dieser einfach konfigurierten Maschine können nur so genannte "einschichtige" Betonsteine hergestellt werden. Einen typischen Anwendungsfall für eine so konfigurierte Maschine (Abbildung 2.4) stellt die Produktion von Wandbausteinen dar.

Um eine weitere Füllstufe realisieren zu können, werden Steinformmaschinen mit einer zweiten Fülleinrichtung, einer so genannten Vorsatzfülleinrichtung, ausgestattet. Diese wird, wie in den Abbildungen 2.3, 2.5 und 2.6 gezeigt, als verschiebbare Einheit auf der gegenüberliegenden Seite der Kernfülleinrichtung am Maschinenrahmen angekoppelt. Damit wird es möglich, innerhalb eines Fertigungszyklus aufeinander folgend zwei unterschiedliche Betongemenge in den zu befüllenden Raum der Form einzubringen. Ein typischer Anwendungsfall für eine so konfigurierte Steinformmaschine ist die

Produktion von Pflastersteinen aus Kern- und Vorsatzbeton. Solche Produkte werden im industriellen Sprachgebrauch als "zweischichtig" bezeichnet.

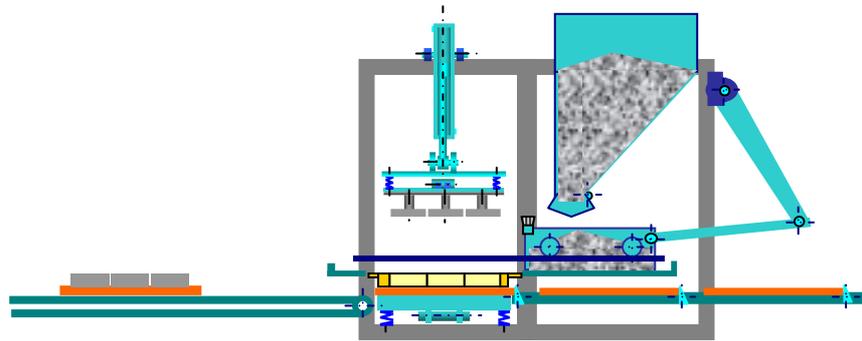


Abbildung 2.4: Steinformmaschine mit Kernfülleinrichtung

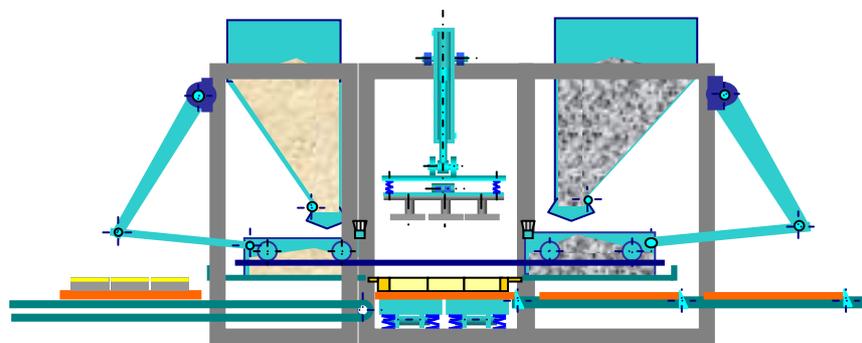


Abbildung 2.5: Steinformmaschine mit Kern- und Vorsatzfülleinrichtung und geteiltem Schwingtisch

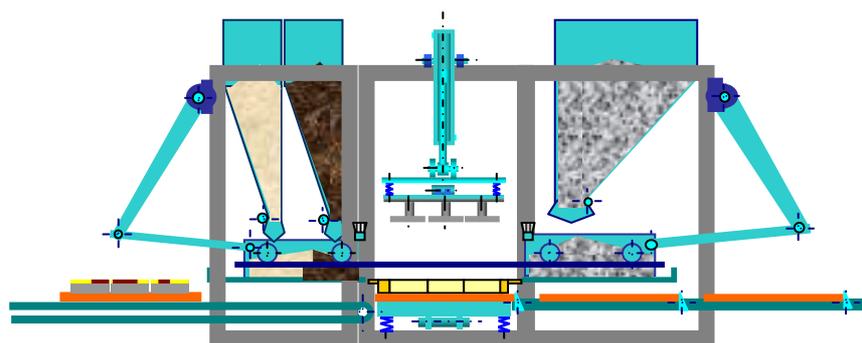


Abbildung 2.6: Steinformmaschine mit Kern- und Vorsatzfülleinrichtung mit zwei Füllsilos

Eine weitere Modifikation bilden Varianten mit mehreren Trichtern innerhalb der Vorsatzfülleinrichtung. Diese ermöglichen es, wie in der Abbildung 2.6 gezeigt, unterschiedliche Betongemenge separiert vorzuhalten und in den Vorsatzfüllwagen zu dosieren. Ein typischer Anwendungsfall ist die Produktion von Pflastersteinen mit kontrastreichen, changierenden Farben an der Steinoberfläche.

Fülltrichter mit Dosiereinrichtung

Der Fülltrichter mit Dosiereinrichtung ist das Zwischenlager der Steinformmaschine für das zu verarbeitende Betongemenge. Der Transport und die Übergabe des Gemenges vom Mischer in den Fülltrichter der Steinformmaschine können unterschiedlich realisiert werden. Bei Kreislaufanlagen finden meist automatische Kübelbahnen, siehe Abbildung 2.1, oder Gurtförderer Anwendung. Ist der Mischer unmittelbar über der Steinformmaschine positioniert, erfolgt die Entleerung des Mixers direkt in den Fülltrichter der Steinformmaschine.

Über die Dosiereinrichtung, eine Verschlussvorrichtung an der Unterseite des Fülltrichters, wird das Gemenge in den Füllwagen eingebracht. Die Dosiereinrichtung kann als hydraulisch oder als elektromotorisch getriebene Klappe oder Schieber ausgebildet sein. Die Ansteuerung erfolgt über ein Mess- und Regelsystem. Moderne Steinformmaschinen regeln den Füllstand im Füllwagen mit Hilfe lasergestützter Entfernungsmesssysteme. Durch ständige Abfrage der Füllhöhe im Füllwagen und eine adäquaten Beschickung mit Betongemenge durch Öffnen des Verschlussmechanismus am Fülltrichter, wird der Füllungsgrad eingestellt. Die Abbildung 2.7 zeigt ein Beispiel zur Gestaltung der Dosiereinrichtung mit schwenkbaren Doppelklappen (Konturen weiß hervorgehoben). Der Füllwagen befindet sich in Grundstellung unter dem Fülltrichter.

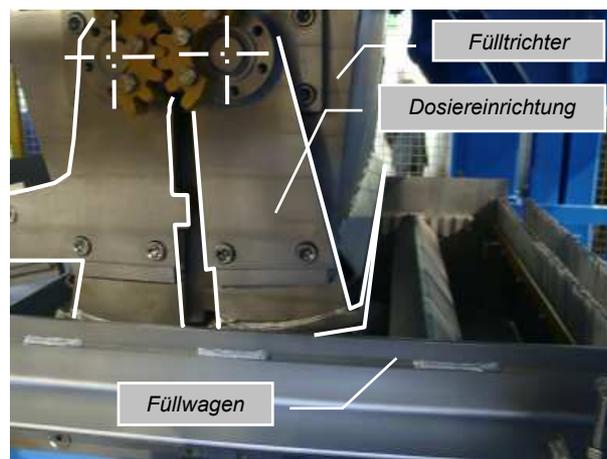


Abbildung 2.7:
Fülltrichter mit Dosiereinrichtung über dem Füllwagen

Die Ansteuerung der Dosiereinrichtung kann auch zyklus- oder zeitabhängig realisiert werden. Die Kontrolle des Füllstandes erfolgt dabei visuell durch den Maschinenbediener. Notwendige Anpassungen der Siloöffnungszeiten und/oder der Anzahl der Öffnungszyklen müssen bei solchen Systemen durch manuelle Eingaben aktiviert werden. Die erreichbare Präzision bei der Einstellung des Füllungsgrades ist bei zyklus- oder zeitgesteuerten Systemen relativ gering.

Füllwagen

Der Füllwagen transportiert und verteilt das Betongemenge über dem zu befüllenden Raum des Formunterteils. Der Füllwagen besteht aus

- einem Füllkasten mit Schüttelrost sowie
- einem Rahmen mit Laufrädern.

Vorder- und Rückwand des Füllwagens schließen nach unten mit einem Abstreifer ab. Die Abbildung 2.8 zeigt eine von zahlreichen am Markt angebotenen Füllwagenvarianten. Der weiße Pfeil in der Abbildung gibt die Fertigungsrichtung an.

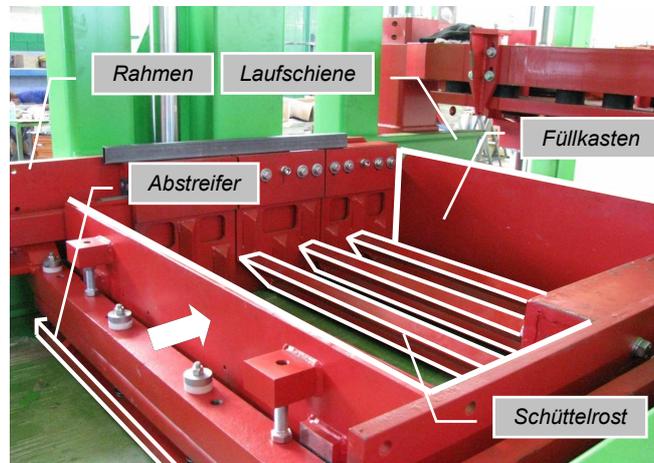


Abbildung 2.8:

Variante für die konstruktive Gestaltung des Kernfüllwagens

Während der Grundstellung der Steinformmaschine steht der Füllwagen unter dem Fülltrichter. In dieser Position wird er mit Betongemenge gefüllt. Durch eine translatorische Bewegung aus der Grundstellung heraus transportiert der Füllwagen das Gemenge über den zu füllenden Raum des Formunterteils. Hat er das Formunterteil um ein definiertes Maß überfahren, schiebt der Füllwagen das Betongemenge durch lineare Pendelbewegungen über dem Füllraum vor und zurück. Die so erzeugten Materialbewegungen sollen die Homogenität der Massenverteilung im Füllraum erhöhen.

Der Antrieb des Füllwagens wird durch ein von Hydraulikzylindern bewegtes Hebelsystem realisiert. Servoelektromotorische Antriebssysteme werden zwar für Steinformmaschinen angeboten, finden aber gegenwärtig in der Industrie nur selten Anwendung. Die Bewegungsfunktion des Füllwagens wird über ein Mess- und Regelsystem gesteuert. Die Wegmessung erfolgt durch induktive Sensoren. Um eine gleichmäßige Befüllung zu erreichen, muss die Bewegungsfunktion des Füllwagens reproduzierbar sein. Die in [14] beschriebenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bewegungsfunktionen an Steinformmaschinen im industriellen Routinebetrieb nicht ausreichend reproduzierbar realisiert werden.

Der Füllwagen fährt auf Laufschiene geführt über das Formunterteil. Dazu werden zwei konstruktiv unterschiedliche Lösungen am Markt angeboten. Bei der ersten Variante läuft der Füllwagen direkt auf der Form. Die Schienen sind in diesem Fall Bestandteil des Formenrahmens. Bei vibrationsunterstützten Füllungen wird der gesamte Füllwagen mit dem Formunterteil in Schwingungen versetzt. Damit werden durch den Füllkasten und den Schüttelrost zusätzliche Vibrationen direkt in das einzufüllende Betongemenge eingetragen. Die Abbildung 2.9 beschreibt diese Variante mit einer schematischen Querschnittsdarstellung von Form und Füllwagen.

In einer zweiten Variante sind die Laufschiene als U-Profil am Rahmen der Steinformmaschine befestigt. Der Füllwagen ist damit von der Form entkoppelt. Bei vibrationsunterstützten Füllungen werden die Schwingungen aus dem Vibrationssystem ausschließlich in das einzufüllende Betongemenge eingetragen. Die Abbildung 2.10

beschreibt diese Lösung mit einer schematischen Darstellung von Form, Füllwagen und einem Teil des Maschinenrahmens mit Laufschiene.

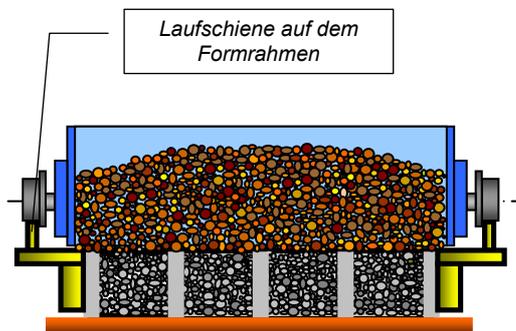


Abbildung 2.9

Füllwagenlauf auf dem Formunterteil

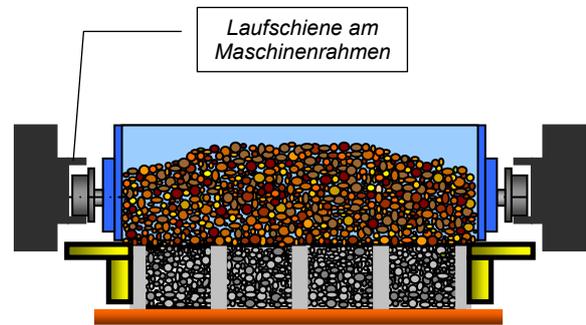


Abbildung 2.10:

Füllwagenlauf am Maschinenrahmen

Über die unterschiedliche Wirkung der beiden Systeme auf die Füllungsgüte gibt es in der Industrie sehr unterschiedliche Bewertungen. Eine systematische Untersuchung und Gegenüberstellung beider Systeme steht noch aus.

Der Kernfüllwagen realisiert die erste Stufe des Füllens. Auf Grund der je Zyklus einzufüllenden Kernbetonmasse, wird der Kernfüllwagen meist größer als der Vorsatzfüllwagen gestaltet. Kernfüllwagen haben einen aktiven Schüttelrost.

Der Vorsatzfüllwagen realisiert die zweite Stufe des Füllens. Auf Grund der je Zyklus einzufüllenden, Vorsatzbetonmasse wird der Vorsatzfüllwagen meist kleiner als der Kernfüllwagen gestaltet. Der Vorsatzfüllwagen verfügt über einen passiven Schüttelrost.

Der Füllkasten ist der Transportraum des Füllwagens. In ihm wird das Betongemenge vom Fülltrichter aufgenommen und über den zu befüllenden Raum des Formunterteils (Füllraum) transportiert.

Der Schüttelrost im Füllkasten parzelliert den Transportraum und stabilisiert die Lage der Gemengeteilchen während der Beschleunigungen des Füllwagens. Die unteren Profile des Schüttelrostes bilden während der Relativbewegungen zum Formunterteil eine Scherebene aus, die das bereits in den Füllraum eingebrachte Betongemenge und das noch im Transportraum befindliche Gemenge trennen. Grundsätzlich können aktive und passive Schüttelroste unterschieden werden.

Aktive Schüttelroste besitzen ein autarkes Antriebssystem. Unabhängig von der Bewegungsfunktion des Füllwagens können so zusätzlich Relativbewegungen zu Formunterteil und Füllkasten ausgeführt werden. Der Antrieb wird über einen Hydraulikzylinder oder über einen Exzenter realisiert. Die Abbildung 2.11 gibt einen Blick auf die konstruktive Gestaltung eines hydraulisch getriebenen Schüttelrostes. Die Stäbe des Rostes bilden Schubelemente (weiß hervorgehoben), die das Gemenge über dem zu befüllenden Raum zusätzlich horizontal vor und zurück (roter Doppelpfeil) bewegen können.

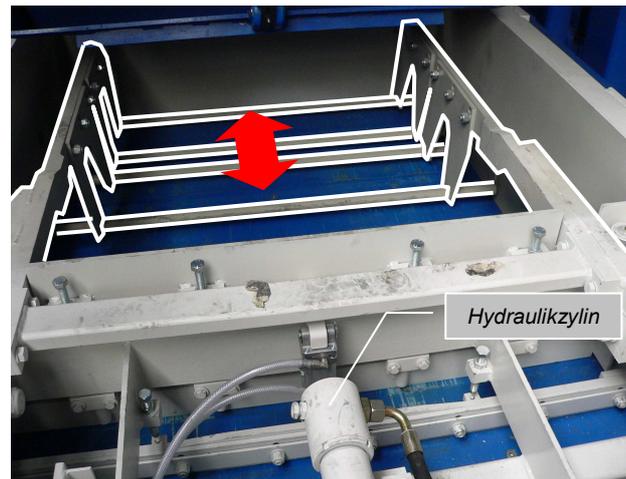


Abbildung 2.11:
Kernfüllwagen mit hydraulisch angetriebenem Schüttelrost

Passive Schüttelroste besitzen kein autarkes Antriebssystem. Sie werden mit geringem Spiel gleitend oder pendelnd an den inneren Seitenwänden des Füllkastens befestigt. Dieses Spiel ermöglicht dem Rost im Ergebnis der Füllwagenbewegungen trägheits-erzeugte Relativbewegungen. Die Abbildungen 2.12 und 2.13 zeigen zwei unterschiedliche Varianten für die konstruktive Gestaltung eines passiven Schüttelrostes (Konturen weiß hervorgehoben). Der rote Doppelpfeil in den Abbildungen zeigt jeweils die Relativbewegungen des Schüttelrostes zum Füllkasten an. Der weiße Pfeil gibt jeweils die Fahrtrichtung des Füllwagens aus der Grundstellung über das Formunterteil an.

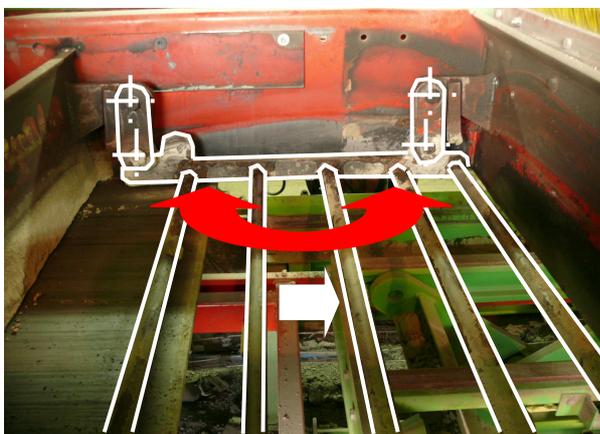


Abbildung 2.12:
Vorsatzfüllwagen mit Pendelrost



Abbildung 2.13:
Vorsatzfüllwagen mit Gleitrost

Zur optimalen Querschnittsform, Anzahl und Anordnung der Stäbe eines Schüttelrostes werden in der Industrie sehr unterschiedliche Aussagen getroffen. Dementsprechend groß ist die Vielfalt der konstruktiven Lösungen zur Gestaltung des Schüttelrostes in der industriellen Realität. Strukturen und/oder Dimensionen werden in den unterschiedlichsten Varianten realisiert. Die gegenüberstellenden Bildübersichten in den Anlagen 2.1 und 2.2 zeigen ausgewählte Beispiele unterschiedlicher Kern- und Vorsatzfüllwagen. Die Vielzahl und Verschiedenartigkeit der Konstruktionen können als Indikator für den derzeit ungenügenden Kenntnisstand zum Füllprozess angesehen werden.

Das Abstreifersystem des Füllwagens soll Höhe und Form der Scherebene zwischen dem bereits in den Füllraum eingebrachten und dem noch im Füllwagen befindlichen Betongemenge einstellen. Abstreifersysteme werden bei neuen Maschinen meist pneumatisch verstellbar ausgeführt. Die Abbildung 2.14 zeigt exemplarisch eine Variante zur pneumatischen Verstellung des Abstreifers am Füllwagen. Der Abstreifer kann so während der Füllung selbstständige Bewegungsfunktionen realisieren. Der blaue Doppelpfeil symbolisiert die mögliche Bewegungsrichtung. Systeme dieser Art erweisen sich im industriellen Routinebetrieb häufig als anfällig. Schäden und Betonanhaftungen an den Bauteilen beeinträchtigen ihre Funktionsfähigkeit. Oft werden sie nach kurzer Zeit demontiert und durch simple, robuste Lösungen ersetzt.

Einfache Abstreifsegmente haben sich im industriellen Alltag bewehrt. Die Abbildung 2.15 zeigt eine simple federbelastete Variante. Der blaue Pfeil im Bild symbolisiert die Druckrichtung der Federn auf den Abstreifer.

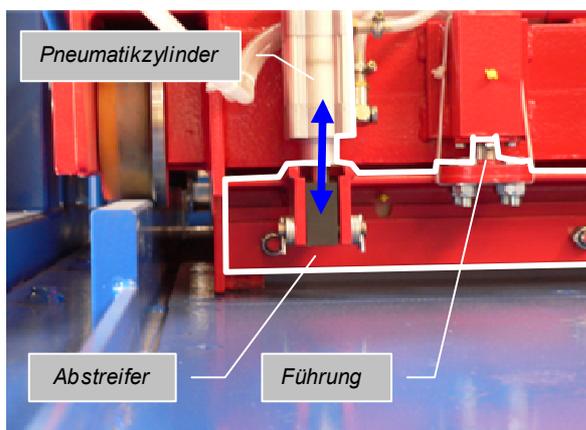


Abbildung 2.14:

Füllwagen mit pneumatisch verstellbarem Abstreifer

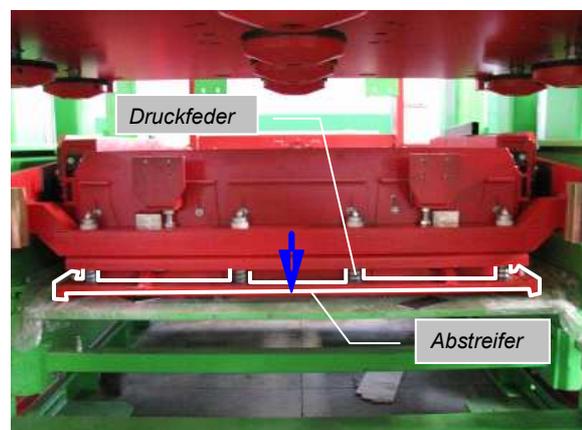


Abbildung 2.15:

Füllwagen mit einfachem federbelastetem Abstreifer

2.3.1.2 Verdichtungseinrichtung

Die Verdichtungseinrichtung einer Steinformmaschine besteht aus

- der Auflast und
- dem Vibrationssystem.

Während der Füllung der Form mit Betongemenge wird das Vibrationssystem mit niedrigen Erregerkräften zur Unterstützung des Füllvorganges aktiviert. Während der Hauptverdichtung wird das vollständig in die Form eingefüllte Betongemenge durch den Schwingtisch mit hohen Erregerkräften in Vibration versetzt. Zeitgleich wird der Formstempel auf die Gemengeoberfläche gepresst. Die ausreichende Verdichtungswirkung an Steinformmaschinen wird nur durch die Kombination von Vibration und Auflastdruck erzeugt. Nur wenn beide Faktoren in erforderlichem Maße wirken, kann eine angemessene Verdichtung des steifen Betongemenges sichergestellt werden.

Auflast

Unabhängig von der Art des Vibrationssystems haben Auflasten von Steinformmaschinen den gleichen strukturellen Aufbau. Die in den Abbildungen 2.16 und 2.19

blau beschrifteten Elemente bilden in ihrer Einheit die Baugruppe Auflast ab. Während der Hauptverdichtung wird die Auflast gravimetrisch und / oder hydraulisch auf die Betonoberfläche gepresst. Die beiden Kreiserreger auf der Auflastplatte versetzen den Formenstempel zusätzlich in Schwingungen. So werden während der Hauptverdichtung parallel zu den Aktionen des Schwingtisches Vibrationen direkt in die Betonoberfläche eingetragen.

In Sonderfällen sind gegenüber den gezeigten Beispielen Modifikationen der Auflast möglich. So wird bei Steinformmaschinen, die nur auf die Produktion von Hohlblocksteinen ausgerichtet sind, häufig auf Vibratoren und Federung in der Auflast verzichtet. Auflastsysteme werden in Aufbau und Wirkung ausführlich und übersichtlich in [12] beschrieben.

Vibrationssystem

Für den Betrieb von Steinformmaschinen existieren im Wesentlichen zwei verschiedene Arten von Vibrationssystemen,

- die Schockvibration und
- die harmonische Vibration.

Auf Grund der Relevanz für den Formgebungs- und Verdichtungsprozess werden beide Systeme im folgenden Abschnitt ausführlicher in Aufbau und Wirkungsweise beschrieben.

Konventionelle Steinformmaschinen sind mit einem Vibrationssystem ausgestattet, welches gezielt Stöße erzeugt und die entstehenden Impulse zur Verdichtung des Betongemenges nutzt. Für die Bezeichnung solcher Systeme hat sich in der Industrie der Begriff "Schockvibration" etabliert. Die Form wird dabei mit Hilfe eines pneumatisch gefederten Hebelsystems mit dem Unterlagsbrett auf den Schwingtisch gespannt. Zwischen Schwingtisch und Unterlagsbrett sind so genannte Schlagleisten als horizontale Ebene fix gegen den Maschinenrahmen gelagert. Die Abbildung 2.16 stellt den Aufbau einer solchen Steinformmaschine schematisch in Vorderansicht dar. Die in der Abbildung gelb beschrifteten Elemente bilden gemeinsam mit dem aus mehreren Schlagleisten bestehenden Schlagrahmen das Schockvibrationssystem.

Der Schlagrahmen beschreibt geometrisch einen ebenen Rost. Er wird aus mehreren, parallel zur Fertigungsachse ausgerichteten, so genannten Schlagleisten gebildet. Diese sind zwischen Schwingtisch und Unterlagsbrett fest gegen das Chassis der Steinformmaschine positioniert. Der Schlagrahmen ist bei Verdichtungssystemen, die auf Schockvibration basieren, von großer Bedeutung. Die planparallele Ausrichtung zum Schwingtisch und die Ebenheit der sich ergebenden Strukturoberfläche haben einen signifikanten Einfluss auf die Bewegungsfunktionen innerhalb des Vibrationssystems. Die schematische Darstellung in der Anlage 2.3. erklärt die Beziehungen zwischen der Anordnung der Elemente und der sich einstellenden Bewegungsfunktion. Vibrationsunterstützte Füllstufen werden infolgedessen ebenfalls maßgeblich durch die Qualität des Schlagrahmens beeinflusst.

Verschleißbedingt, ist die exakte planparallele Ebenheit des Schlagrahmens im industriellen Alltag nicht permanent sicherzustellen. Unebenheiten erzeugen unterschiedliche Verteilungen der Impulsstärken insbesondere beim Aufprall zwischen Schwingtisch und Unterlagsbrett/Formunterteil. Nach den Erfahrungen aus der industriellen Produktion wirken sich solche Defizite auch signifikant auf die erreichbaren Füllungs- und Verdichtungsgüten aus.

Bei Füllstufen ohne Vibration besitzt der Schlagrahmen keine Bedeutung für die erreichbare Füllungsgüte. Systeme, die die harmonische Vibration nutzen, arbeiten

ohne Schlagrahmen. Damit wird eine wesentliche Störgröße für die Füllung und Verdichtung des Betongemenges eliminiert.

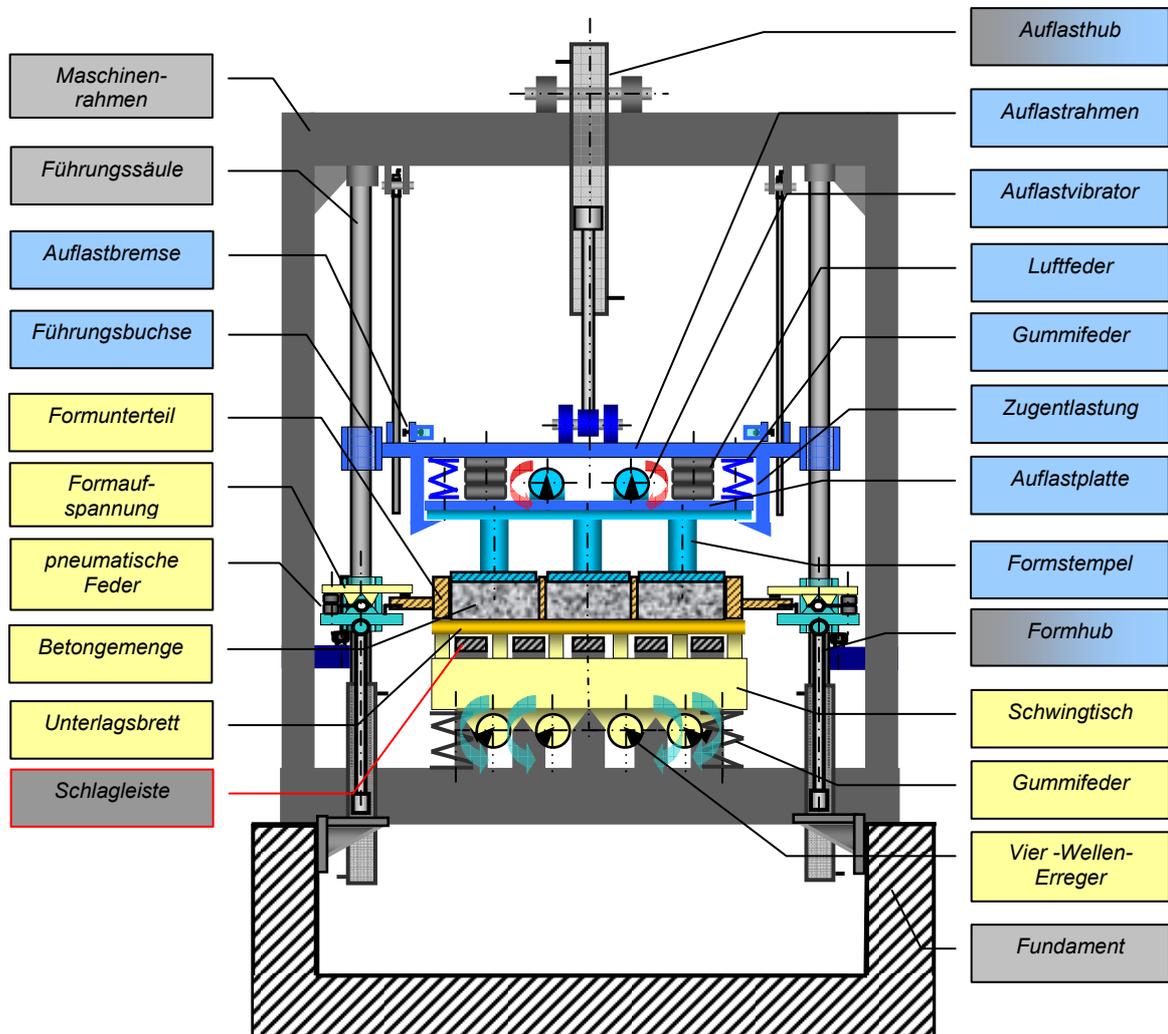


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung der Verdichtungseinrichtung einer Steinformmaschine mit Schockvibration während der Hauptverdichtung

Der Schwingtisch ist eine spannungsfrei geglättete Schweißkonstruktion. An der Oberseite hat er einen, senkrecht zur Fertigungsachse angeordneten, kammartigen Querschnitt. Diese spezielle Geometrie ist für die räumliche Integration der Schlagleisten sowie des Brettvorschubes erforderlich. An der Unterseite des Tisches werden je nach Konstruktionsvariante kompakte Kreiserreger angekoppelt oder die Lagerung der Unwuchtwellen direkt in die Tischkonstruktion integriert. Der Schwingtisch wird auf Gummifedern gegen den Maschinenrahmen oder gegen einen separaten Unterrahmen gelagert. Mit der Rotation der Unwuchtwellen wird der Tisch vertikal, sinusförmig bewegt. Gleiche Kennwerte der Gummifedern sowie eine biege- und torsionssteife, symmetrische Tischkonstruktion sind wesentliche Voraussetzungen für ein gleichmäßiges Schwingungsverhalten.

Wird die Füllung der Form mit Betongemenge durch Vibration unterstützt, ist der Schwingtisch neben dem Füllwagen ein primär aktives Element der Füllausrüstung. Bei Füllungen ohne Vibration besitzt der Schwingtisch keine Relevanz für die erreichbare Füllungsgüte.

Die Vibration des auf Gummifedern gelagerten Schwingtisches wird durch ein elektronisch geregeltes Vier-Wellen-Erregersystem erzeugt. Der Tisch wird dabei durch vier servomotorisch angetriebene, rotierende Unwuchtwellen bewegt. Jeweils zwei Unwuchtwellen bilden ein synchron entgegengesetzt rotierendes Paar, einen so genannten Gegenläufererregers. Die Abbildung 2.17 beschreibt schematisch die Wirkungsweise des Vier-Wellen-Kreislerregers. Die Kräfteparallelogramme in der Abbildung verdeutlichen, dass sich innerhalb des Systems die vertikalen Kräfte nach

$$F_V = F_{V1} + F_{V2} + F_{V3} + F_{V4} \quad (2.1)$$

addieren. Die jeweils entgegen gerichteten horizontalen Kräfte heben einander nach

$$F_H = F_{H1} - F_{H2} + F_{H3} - F_{H4} = 0 \quad (2.2)$$

auf.

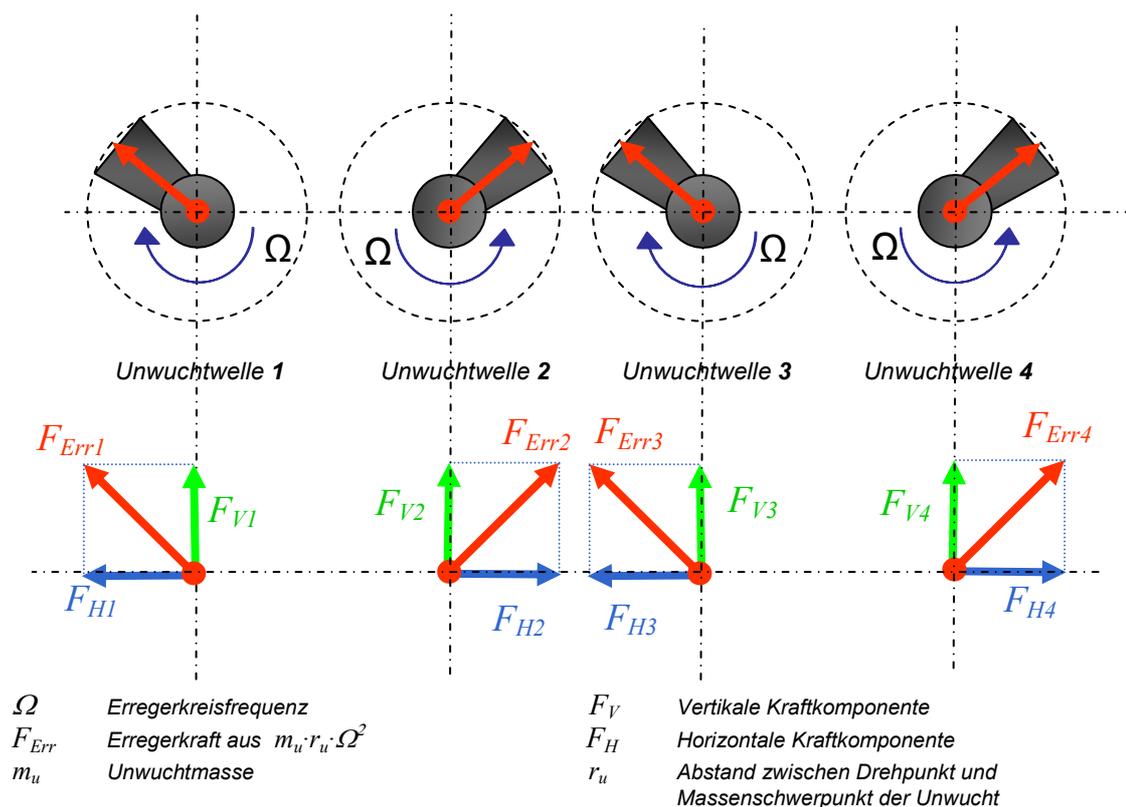


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung der Wirkungsweise des elektronisch geregelten Vier-Wellen-Erregers

Über die elektronische Regelung der Winkelstellung der Unwuchten zueinander kann die resultierende vertikale Kraftkomponente F_V zwischen 0 und einem Maximum variiert werden.

Während der zunächst harmonischen Bewegung des Schwingtisches kommt es zu Stößen zwischen dem Schwingtisch und dem Unterlagsbrett einschließlich Form sowie zwischen dem Unterlagsbrett einschließlich Form und den Schlagleisten. Da die pneumatische Aufspannung der Form auch Relativbewegungen zwischen Form und Unterlagsbrett zulässt, werden zusätzlich Impulse in das System eingebracht. Erst infolge der erzeugten hohen Beschleunigungen beim Zusammenstoßen der Elemente

Schwingtisch — Unterlagsbrett,
Unterlagsbrett — Schlagleisten und
Unterlagsbrett — Formunterteil

wird die notwendige Verdichtungswirkung erreicht.

Neueste, in [12] beschriebene Forschungen haben gezeigt, dass sich während der Hauptverdichtung ebenfalls Stöße zwischen der Betonoberfläche und dem Formstempel einstellen können. Die Ergebnisse der Untersuchungen haben deutlich gemacht, dass diese ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf das Verdichtungsresultat haben. Aufbau und Wirkungsweise von Schockvibrationssystemen werden ausführlich und übersichtlich in [13] beschrieben.

Einen Sonderfall stellt die in Abbildung 2.5 gezeigte Konfiguration mit einem quer zur Fertigungsrichtung geteilten Schwingtisch dar. Unabhängig von der Anzahl der Füllrichtungen und/oder der Fülltrichter gestattet diese Variante, während der Füllung beide Tischhälften separat anzusteuern. Die so realisierten, unterschiedlichen Beschleunigungen der Füllvibration können Unterschiede im Füllverhalten des Betongemenges kompensieren und die Homogenität der Massenverteilung innerhalb der Fertigungseinheit erhöhen.

Steinformmaschinen mit Schockvibrationssystem sind durch extreme Lärmemission und hohen Verschleiß am Verdichtungssystem gekennzeichnet. Die Abbildung 2.18 zeigt exemplarisch eine während der Füllvibration am Formflansch aufgenommene Beschleunigung (a)-Zeit (t)-Funktion und die adäquate Beschleunigung (\tilde{a})-Frequenz (f)-Funktion aus der Frequenzanalyse innerhalb eines Zeitfensters von 0,5 Sekunden. Typisch für Vibrationssysteme dieser Art ist der stochastische Verlauf der Funktion $a(t)$ und die entsprechend multifrequente Funktion $\tilde{a}(f)$ am ausgewählten Messpunkt. Die Messung wurde im Rahmen der in [14] beschriebenen Untersuchungen durchgeführt. Füllaufgabe während der Signalerfassung war die Produktion von zweischichtigen Pflastersteinen im Format 20/10/8. Das Kapitel 5. beschreibt diese Untersuchungen im zusammenfassenden Überblick.

Die in [15],[16] beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass die Reproduzierbarkeit der Bewegungsfunktionen am Vibrationssystem in der industriellen Produktion nicht ausreichend sichergestellt wird. Ebenfalls als äußerst kritisch muss die Homogenität des Kräfteeintrages über die Grundfläche des zu füllenden Raumes der Form betrachtet werden. Mangelhafte Planparallelität zwischen den aufeinander prallenden Strukturen erzeugen unterschiedliche Beschleunigungen. Im Ergebnis stehen mangelhafte Füll- und Verdichtungsgüten, die das Prozessergebnis der Formgebung und Verdichtung maßgeblich negativ beeinflussen.

Zur Erzeugung "harmonischer Vibration" an Steinformmaschinen sind zwei unterschiedliche Systeme bekannt, die sich in der Art der Schwingungserregung unterscheiden.

Das neue, vom Institut für Fertigteiletechnik und Fertigbau Weimar e.V. entwickelte System, nutzt den elektronisch geregelten Vier-Wellen-Erreger zur Realisierung harmonischer Vibration in Steinformmaschinen. Die Abbildung 2.19 stellt schematisch den Aufbau einer solchen Steinformmaschine dar.

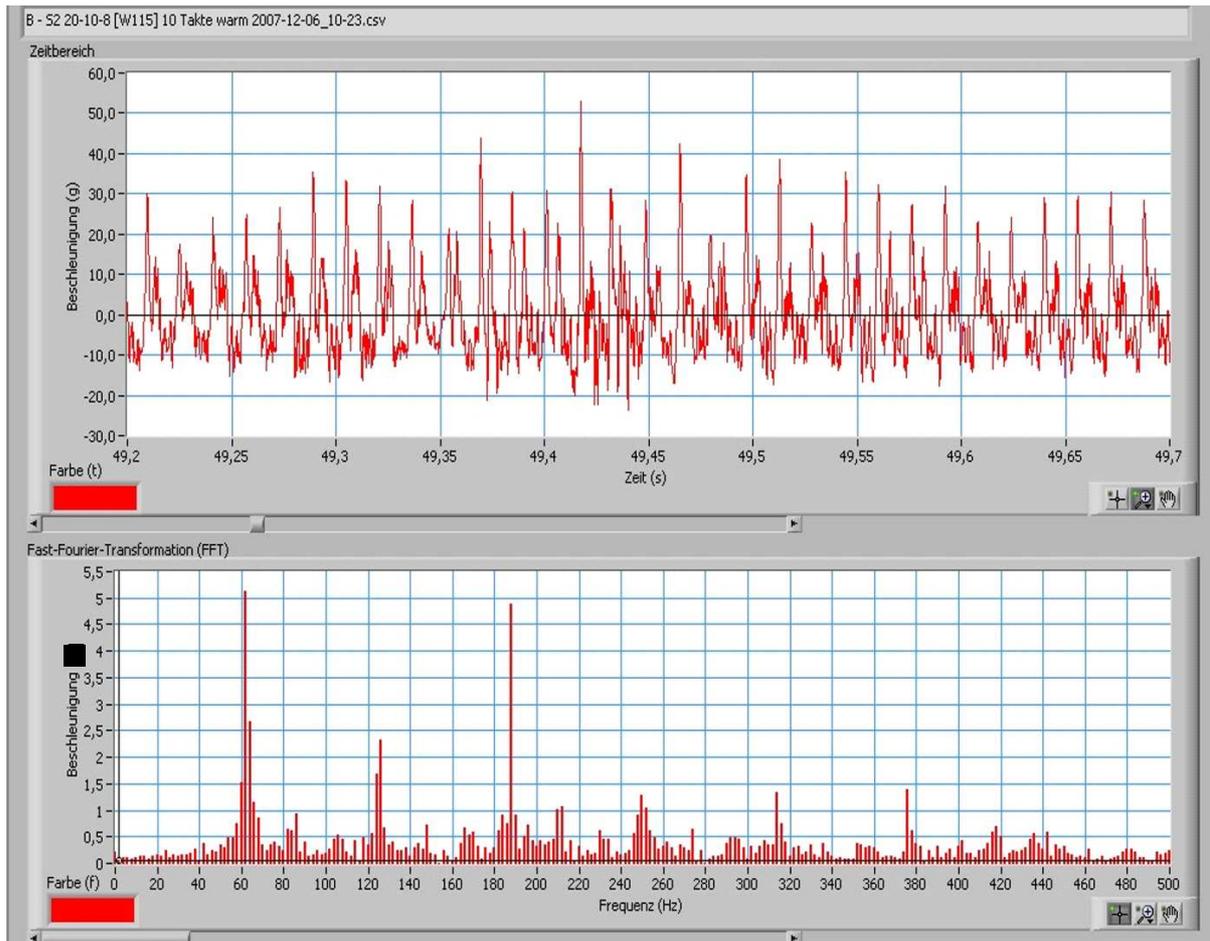


Abbildung 2.18: Beschleunigung-Zeit-Funktion und äquivalente Beschleunigung-Frequenz-Funktion während der 1. Füllvibration an einer Steinformmaschine mit Schockvibration – Messpunkt vertikal am Formunterteil

Im Unterschied zu einer Steinformmaschine mit Schockvibration werden Schwingtisch, Unterlagsbrett und Form während der Füllung und Verdichtung fest miteinander verspannt (roter Kreis in der Abbildung 2.19) und bilden so eine schwingende Einheit. Prallschläge mit extrem hohen Beschleunigungen, wie bei Schockvibrationssystemen bewusst zur Erhöhung der Verdichtungswirkung generiert, bleiben aus. Die Abbildung 2.20 zeigt exemplarisch eine während der Füllvibration am Formflansch gemessene Beschleunigung (a)-Zeit (t)- Funktion und die die adäquate Beschleunigung (\tilde{a})-Frequenz (f)-Funktion aus der Frequenzanalyse innerhalb eines Zeitfensters von 0,5 Sekunden. Die Messung bezieht sich ebenfalls auf die in [14] beschriebenen Untersuchungen während der Produktion von zweischichtigen Pflastersteinen im Format 20/10/8. Im Gegensatz zu den in der Abbildung 2.18 dargestellten Graphen wird ein quasi harmonisches, monofrequentes Schwingungssignal sichtbar.

Um im Vergleich zu Systemen mit Schockvibration eine angemessene Verdichtungswirkung zu erzeugen, müssen die Unwuchten für die Realisierung harmonischer Vibration deutlich vergrößert werden. Das kinetische Moment $m_u \cdot r_u$ des Erregersystems beträgt gegenüber konventionellen Systemen etwa das Vierfache. Die Erregerkraft kann so bis zu 800 kN erreichen. Dieses Angebot an Verdichtungsenergie ermöglicht mit diesem System die Fertigung von Masse-Bauteilen, die bisher auf konventionellen Steinformmaschinen nicht hergestellt werden konnten. Damit eröffnen

sich für die Betonsteinfertigung in Kreislaufanlagen völlig neue Produktperspektiven [6],[18],[19],[20].

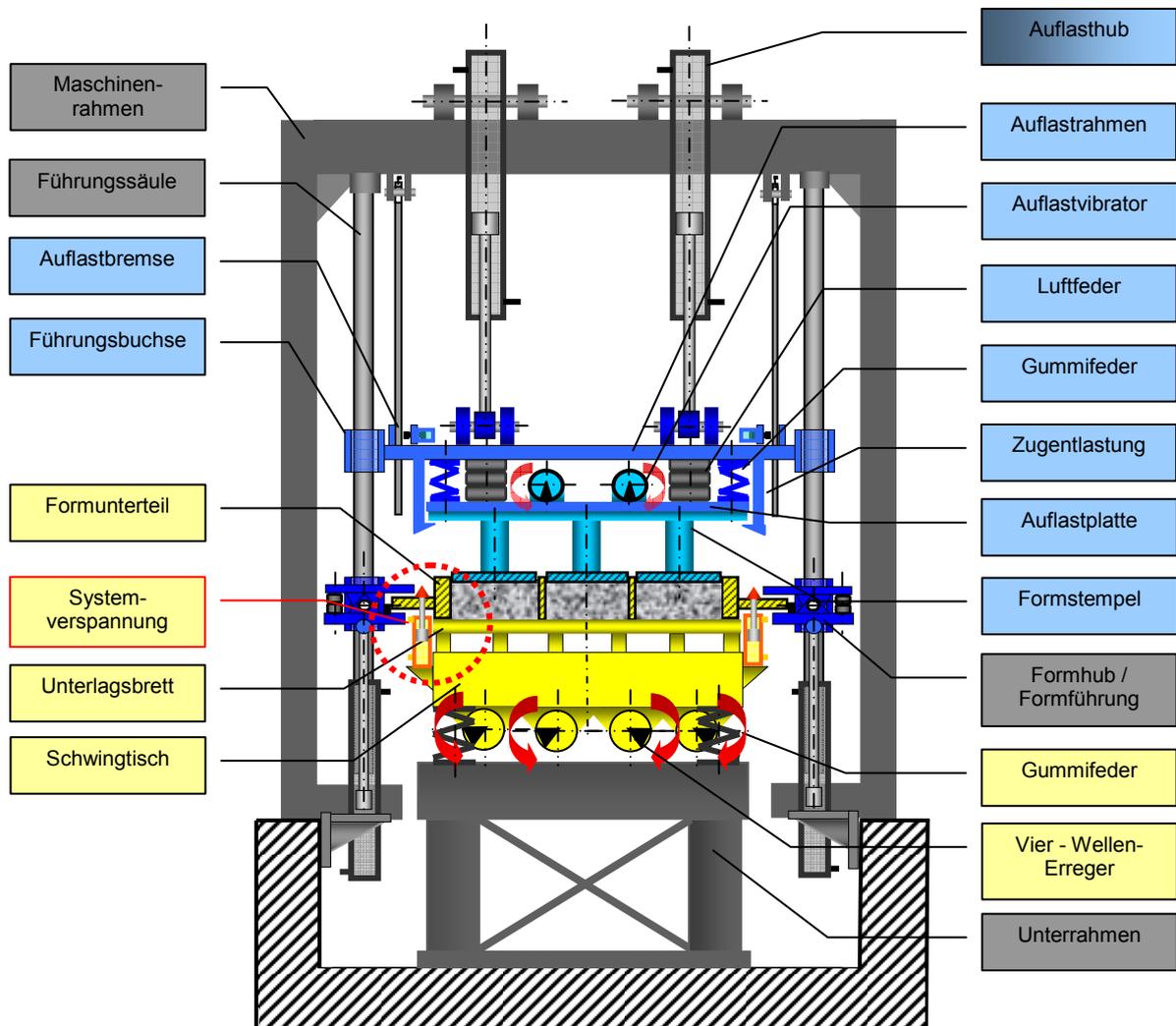


Abbildung 2.19: Schematische Darstellung der Verdichtungseinrichtung einer Steinformmaschine mit harmonischer Vibration während der Hauptverdichtung

Im Vergleich zu Steinformmaschinen mit konventionellem Vibrationssystem generiert die harmonische Vibration höhere Füll- und Verdichtungsgüten bei gleichzeitig deutlich verringertem Lärmpegel [14]. Die Lärmbelastung kann um bis zu 20 dB reduziert werden. Die technischen und arbeitshygienischen Vorteile des neuen Systems werden ausführlich in [21],[22],[23] beschrieben.

Das von der Firma Schlosser-Pfeiffer GmbH & Co. KG angebotene servohydraulische System stellt einen weiteren bemerkenswerten Versuch dar, harmonische Vibration zur Verdichtung in einer Steinformmaschine zu nutzen. Ebenso wie bei dem durch einen Vier-Wellen-Erreger bewegten System wird aus Schwingtisch, Unterlagsbrett und Formunterteil ein einheitlich schwingender Verband gebildet. Die Bewegung dieser Einheit wird hingegen durch einen speziellen Servohydraulikzylinder als Linearschwinger harmonisch bewegt. Zur Aufnahme der großen Reaktionskräfte ist ein massiver

Unterbau des Servozylinders notwendig. Ebenfalls gegenüber konventionellen Steinformmaschinen deutlich verstärkt sind Auflasthub und Auflastlagerung. Eine ausführliche Beschreibung des Systems wird in [10] gegeben.

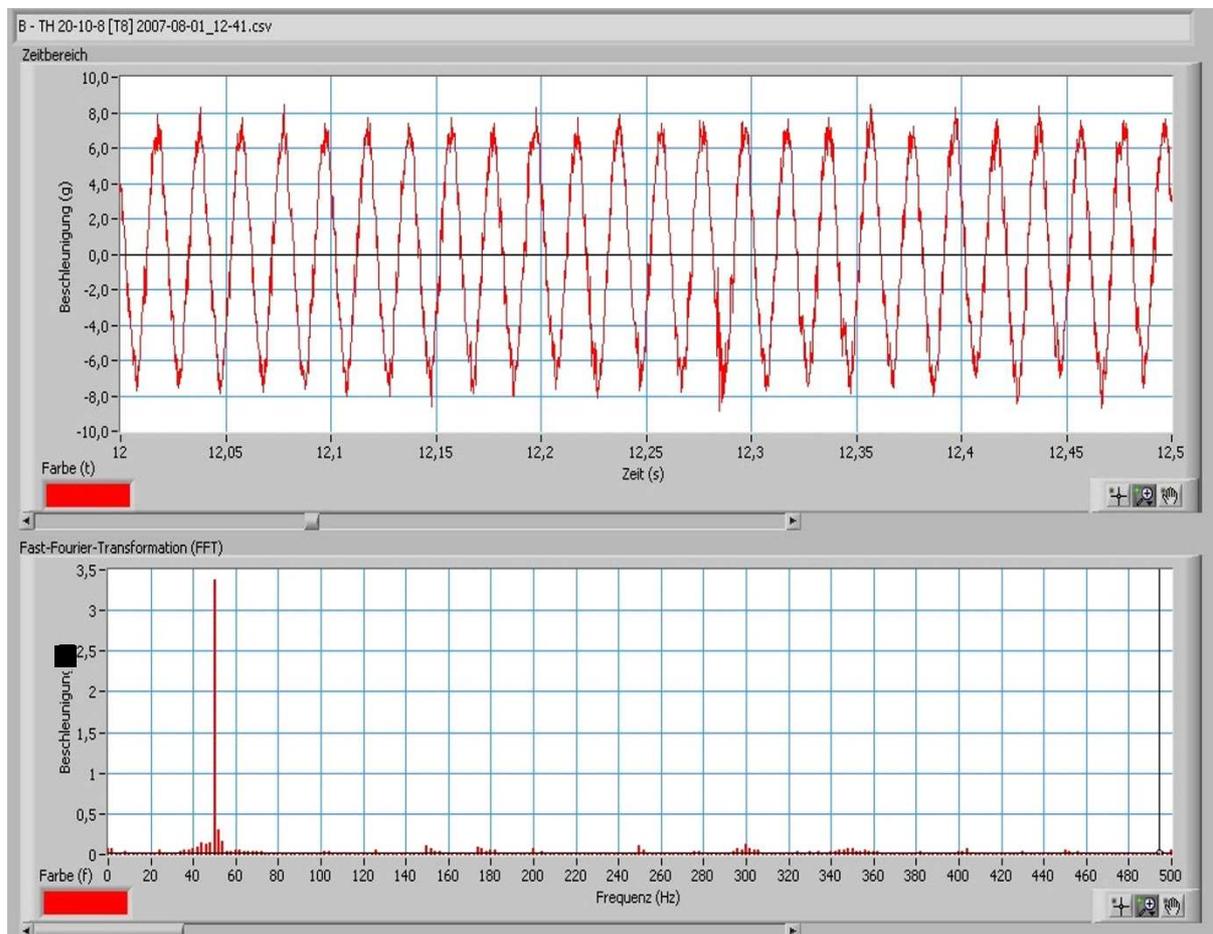


Abbildung 2.20: Beschleunigung-Zeit-Funktion und äquivalente Beschleunigung-Frequenz-Funktion während der 1. Füllvibration an einer Steinformmaschine mit harmonischer Vibration – Messpunkt vertikal am Formunterteil

Auf Grund der deutlich höheren Investitionskosten und des signifikant höheren Aufwandes für Wartung und Instandhaltung an den speziellen Hydraulikkomponenten hat sich dieses System nicht am Markt durchsetzen können [17]. Weltweit wurden nur zwei Maschinen dieser Art in Betrieb genommen.

2.3.1.3 Schalungs- und Entschalungseinrichtung

Die zur Ausprägung der angestrebten Geometrie notwendige Schalung wird aus den Elementen

- Formunterteil,
- Formstempel und
- Unterlagsbrett mit oder ohne Ziehblech

gebildet. Die Druckplatten des Formstempels (Abbildungen 2.21 und 2.22) formen die Oberfläche des herzustellenden Frischbetonkörpers aus. Die Zellenstege des

Formunterteils (Abbildung 2.23 und 2.24) gestalten die Seitenflächen. Unterlagsbrett oder Ziehblech prägen die Konturen an der Unterseite.

Betonpflastersteine aus Kern- und Vorsatzbeton werden entsprechend der späteren Einbaulage gefertigt. Bei Hohlblocksteinen für den Mauerwerksbau erfolgt die Fertigung meist negativ um 180° gedreht. Die Fertigung von Steinen senkrecht zur späteren Einbaulage findet in der industriellen Produktion weniger Anwendung.

Die Trennung der Schalungselemente von den erzeugten Frischbetonkörpern erfolgt durch den geführten Formhub und den geführten Auflasthub (Abbildungen 2.16 und 2.19) sowie gegebenenfalls über die Ziehblechvorrichtung. Wird ohne Ziehblech gefertigt, erfolgt die Trennung von Fertigungseinheit und Unterlagsbrett erst nach der Aushärtung der Betonsteine.

Form

Die Form besteht aus dem Formstempel und dem Formunterteil. Der Formstempel ist in der Steinformmaschine ein Bestandteil der Auflast. Das Formunterteil ist in der Steinformmaschine ein Bestandteil des Vibrationssystems. Die Abbildungen 2.21 und 2.22 zeigen exemplarisch zwei unterschiedliche Formen.

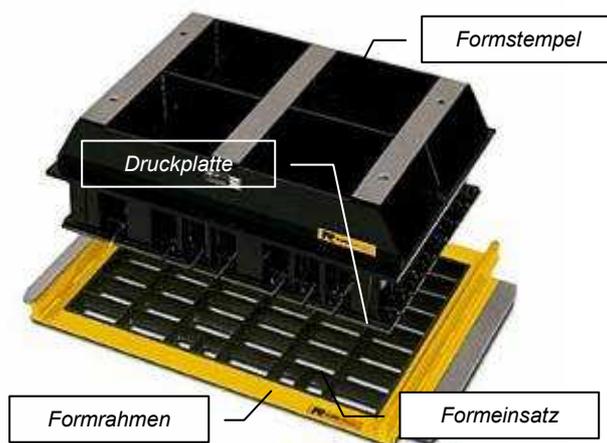


Abbildung 2.21:

Formunterteil und Formstempel
zur Herstellung von Rechtecksteinen
(Quelle: www.rampf.com)

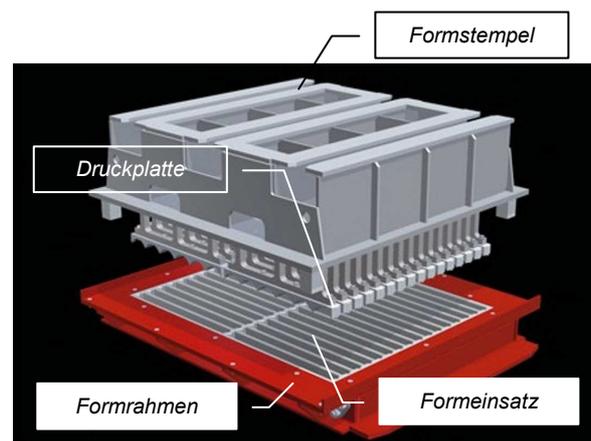
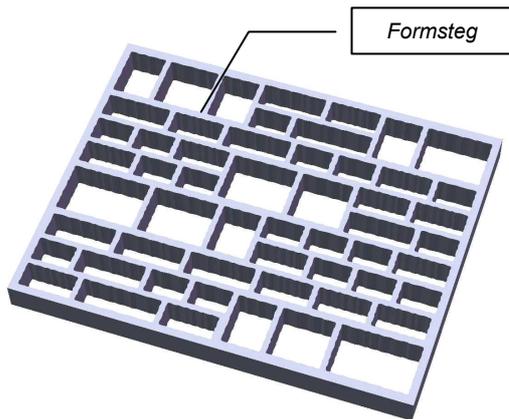


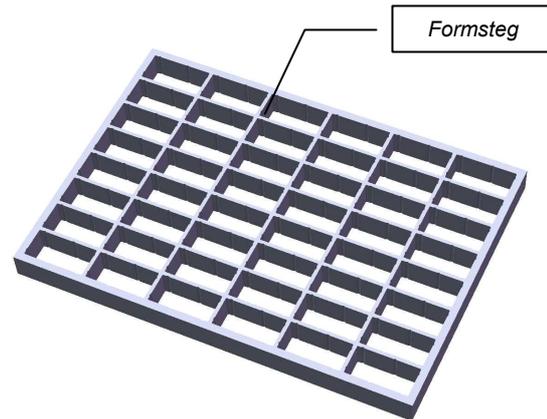
Abbildung 2.22:

Formunterteil und Formstempel
zur Herstellung von Einfasssteinen
(Quelle: www.kobra-group.com)

Das Formunterteil besteht aus dem Formeinsatz und dem Formrahmen. Beide sind fest miteinander verbunden. Der Formeinsatz definiert mit der Anzahl und Anordnung der Formzellen den Füllraum. Über den Rahmen wird das Formunterteil mit der Steinformmaschine verbunden. Auf Grund der Vielfältigkeit der zu erzeugenden Produktgeometrien kann sich der Aufbau des Formunterteils sehr unterschiedlich darstellen. Anzahl, Länge, Breite, Höhe und Gestalt der zu füllenden Zellen können stark variieren. Damit verändern sich auch signifikant das Gewicht und die Schwingungseigenschaften des Unterteils. Die Abbildungen 2.23 und 2.24 zeigen exemplarisch zwei unterschiedliche Formeinsätze.

**Abbildung 2.23:**

Formeinsatz mit inhomogener, asymmetrischer Struktur (Mischbelegung)

**Abbildung 2.24:**

Formeinsatz mit homogener Struktur

Variieren die Zellengrößen innerhalb des Formeinsatzes deutlich, ergibt sich ein unregelmäßiges Formgitter (Abbildung 2.23). Dementsprechend unterschiedlich gestalten sich die Verhältnisse zwischen dem je Zelle einzufüllenden Mengenvolumen V_{FR} und der je Zelle vorhandenen Schalungsfläche A_{FR} . Brückenbildungen über besonders kleinen Zellen innerhalb des Formeinsatzes können darüber hinaus die gleichmäßige Füllung zusätzlich erschweren. Die Abbildung 2.24 zeigt im Gegensatz dazu eine symmetrische, homogene Struktur.

Wird die Füllung mit Vibration unterstützt, überträgt der Formeinsatz durch die Stege Schwingungen und ggf. Stöße in das einzufüllende Betongemenge. Grundsätzliche Voraussetzung für das Erreichen einer hohen Füllungsgüte ist der möglichst gleichmäßige Eintrag. Bei sehr unterschiedlichen Zellgrößen kann die Vibration dementsprechend nur sehr inhomogen verteilt in den zu befüllenden Raum eingetragen werden.

Ein signifikant variierendes Rastermaß der Stege (Abbildung 2.23) bildet einen unregelmäßigen und meist asymmetrischen Querschnitt des Formeinsatzes. Dementsprechend unterschiedlich gestalten sich die Schwingungseigenschaften des Formunterteils in sich und verstärken die Unstimmigkeiten [25]. Sogenannte Mischbelegungen stellen deshalb im industriellen Alltag eine häufig nur ungenügend lösbare Füllaufgabe dar.

Formen mit hydraulisch betriebenen, so genannten Klappwänden oder Einschüben, die den Füllraum während der ersten Füllstufe temporär reduzieren, greifen aktiv in den Füllprozess ein. Typische Anwendungsfälle sind Klappwände bei der Produktion von Bordsteinen oder Einschübe bei der Produktion von Torabsenkern.

Fertigungsunterlage

Die Fertigungsunterlage prägt die Steinunterseite des herzustellenden Frischbetonkörpers. Die Fertigungsunterlage bildet das Unterlagsbrett oder gegebenenfalls das so genannte Ziehblech.

Das Unterlagsbrett bildet während der Füllung und Verdichtung einen Teil der Schalung und zugleich ein mitschwingendes Element des Vibrationssystem. Unterlagsbretter können aus einem Holz-, Stahl- oder auch aus einem Kunststoffkorpus bestehen. Zur Erhöhung der Belastungsfähigkeit von Holz und Kunststoffbrettern finden Material-

kombinationen bzw. Beschichtungen Anwendung. Die besonderen Anforderungen an ein Unterlagsbrett sind harte, glatte und planparallele Oberflächen. Deformationen bzw. Dämpfung des Korpus sollen unter statischer und dynamischer Belastung nur ein Minimum betragen.

Wird die Füllung durch Vibration unterstützt, ist die homogene Übertragung der Schwingungen in den zu füllenden Raum der Form eine wesentliche Voraussetzung für das Erreichen einer hohen Füllgüte. Die Gleichmäßigkeit der Fertigungsunterlage bezüglich Elastizitätsmodul und Dämpfungskonstante ist für diesen Fall eine zwingende Notwendigkeit. Die Erfahrungen der industriellen Produktion zeigen, dass sich Unterlagsbretter mit inhomogenen Querschnitten nachteilig auf den gesamten Formgebungs- und Verdichtungsprozess auswirken.

Das Ziehblech wird zusätzlich zwischen Unterlagsbrett und Formunterteil eingefügt. Ziehbleche werden zur Profilierung und/oder zur Glättung der Steinunterseite eingesetzt. Die Abbildung 2.25 zeigt die Produktion mit einem profilierten Ziehblech zur Ausformung von Kerben an der Steinunterseite. Die Abbildung zeigt eine Momentaufnahme während der Entschalung der Frischbetonkörper. Mit dem Ende der Hauptverdichtung wird das Formunterteil leicht angehoben. Somit wird das Ziehblech zwischen Unterlagsbrett und Form entlastet. Danach wird das Blech durch eine Vorrichtung herausgezogen. Erst dann beginnt die vollständige Entschalung.

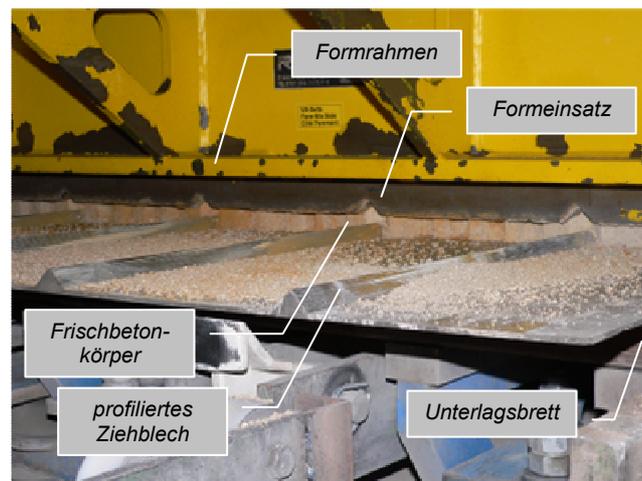


Abbildung 2.25: Fertigung mit einem profilierten Ziehblech

Unprofilierte Ziehbleche werden häufig nur auf Grund der ungenügenden Brettqualität verwendet. So können bei stark verschlissenen Brettoberflächen glatte Steinunterseiten ausgeformt werden.

2.3.2 Arbeitsweise von Steinformmaschinen

Die Arbeitsweise an einer Steinformmaschine wird im Wesentlichen von der zu lösenden Produktionsaufgabe bestimmt. Die Produktionsaufgabe wird durch

- die Anzahl der zu verarbeitenden unterschiedlichen Betongemenge,
- die Zusammensetzung und die Rheologie der oder des zu verarbeitenden Betongemenge(s),

- die Geometrie der herzustellenden Frischbetonkörper sowie durch
- die Anzahl und die Konfiguration der je Fertigungseinheit (Zyklus) zu erzeugenden Frischbetonkörper

definiert.

In Abhängigkeit von der zu lösenden Produktionsaufgabe werden vom Anlagenbediener die Parameter für den gesamten Formgebungs- und Verdichtungsprozess gewählt und mit einem Programm in der Steuerung der Steinformmaschine für den Routinebetrieb hinterlegt. Die Anlage 1.1 gibt eine Übersicht ausgewählter frisch entschalter Betonsteine. Jede unterschiedliche, pro Fertigungszyklus zu erzeugende Einheit stellt eine eigenständige Produktionsaufgabe dar.

Grundsätzlich wird zwischen der Fertigung so genannter "einschichtiger" und "zweischichtiger" Betonsteine unterschieden. Einschichtige Betonsteine werden aus einem Betongemenge hergestellt. Dies sind beispielsweise Betonsteine für den Mauerwerksbau oder Betonsteine zur Böschungsbefestigung und/oder Grundstückseinfriedung.

Bei der Herstellung einschichtiger Produkte wird die zur Erzeugung der anzustrebenden Betonsteinrohndichte notwendige Gemengemasse mit einer Füllstufe in den zu befüllenden Raum des Formunterteils (Primärfüllraum) eingebracht und direkt im Anschluss verdichtet. Nach dem Abschluss der Verdichtung erfolgt die Entschalung der Frischbetonkörper. Die Formgebung und Verdichtung wird bei einschichtigen Betonsteinen im Regelfall in vier Arbeitsstufen an der Steinformmaschine realisiert. Die Abbildung 2.26 zeigt schematisch die Abfolge der Füll-, Verdichtungs- und Entschalstufen.

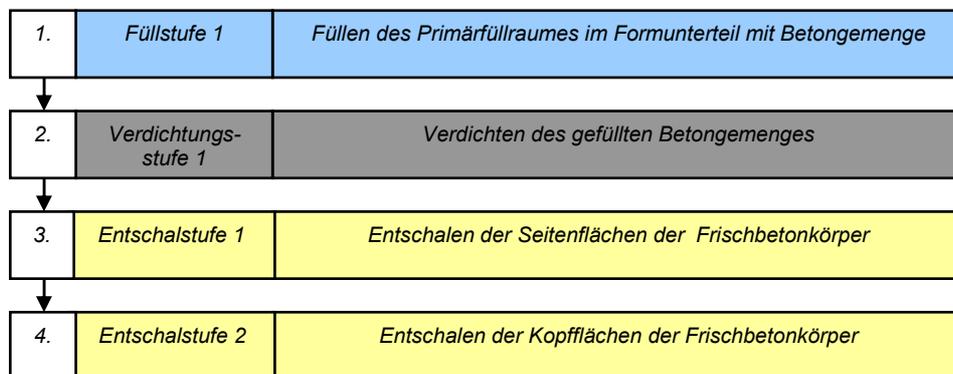


Abbildung 2.26: Ablaufschema der Formgebung und Verdichtung mit einer Füllstufe

Zweischichtige Betonsteine werden aus einem Kernbetongemenge und einem Vorsatzbetongemenge hergestellt. Typisch dafür sind insbesondere Produkte für die Verkehrsflächenbefestigung wie beispielsweise Pflastersteine, Pflasterplatten, Gehwegplatten sowie Bord- und Rinnensteine. Bei changierenden Farben an der Oberfläche können bis zu 4 unterschiedlich eingefärbte Vorsatzbetone verarbeitet werden.

Der Kernbeton bildet bei Betonsteinen mit etwa 90 V-% den tragenden Körper. Der Vorsatzbeton bildet mit etwa 10 V-% die in der Einbaulage des Betonsteins sichtbare Oberfläche. Diese Schicht aus Vorsatzbeton muss insbesondere eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegenüber Abrieb und Bewitterung sicherstellen.

Für die Fertigung von zweischichtigen Betonsteinen sind zwei Füllstufen notwendig, die Kernbetonfüllung, im Folgenden als Füllstufe 1 bezeichnet und die Vorsatzbetonfüllung, im Folgenden als Füllstufe 2 bezeichnet. Die Formgebung und Verdichtung wird bei zweischichtigen Betonsteinen im Regelfall in sechs Arbeitsstufen an der Steinformmaschine realisiert. Um das Vorsatzbetongemenge einfüllen zu können, muss das bereits mit der ersten Füllstufe eingebrachte Kernbetongemenge vorverdichtet werden. Mit dem so entstehenden Setzmaß Δh der Kernbetonsäule wird der für die Vorsatzfüllung notwendige Sekundärfüllraum erzeugt. Im Anschluss erfolgen das Einbringen des Vorsatzbetongemenges, die Verdichtung der gesamten Füllung und die Entschalung der erzeugten Frischbetonkörper. Die Abbildung 2.27 zeigt die Abfolge der Arbeitsstufen bei der Formgebung und Verdichtung mit zwei Füll- und Verdichtungsstufen.

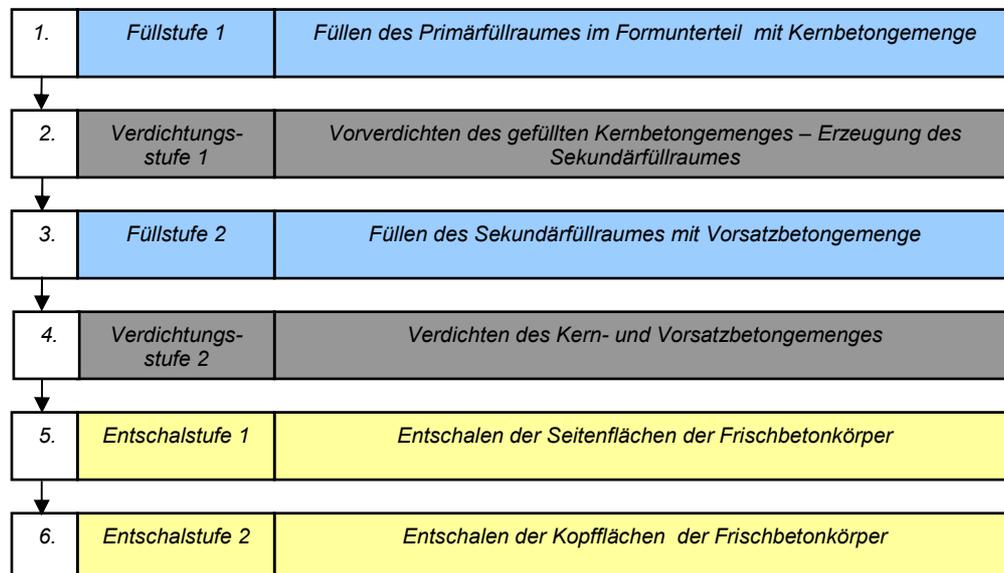


Abbildung 2.27: Ablaufschema der Formgebung und Verdichtung mit zwei Füllstufen

Eine ausführliche Darstellung aller Arbeitsschritte der Formgebung und Verdichtung bei der Produktion von zweischichtigen Betonpflastersteinen wird mit der Übersicht in der Anlage 2.4 gegeben.

2.4 Füllen der Form mit Betongemenge

Das Füllen der Form mit Betongemenge kann an Steinformmaschinen also in zwei Füllstufen erfolgen. Beide Füllstufen haben signifikant unterschiedliche Ausgangsbedingungen. Für eine umfassende Analyse des Füllprozesse müssen beide Füllstufen daher zunächst getrennt betrachtet werden.

Füllstufe 1

Während der Füllstufe I wird der noch leere Füllraum in der Form, nachfolgend als Primärfüllraum bezeichnet, mit Betongemenge gefüllt. Die senkrecht zur Fertigungs-

richtung stehenden Stege in der Form parzellieren den Füllraum und bilden vertikale Barrieren für die Partikel des einzubringenden Betongemenges.

Mit der Füllstufe 1 wird bei zweischichtigen Produkten der so genannte Kernbeton in die Form gefüllt. Kernbetone sind bei der Herstellung von Betonpflastersteinen steife Betongemenge mit einem Größtkorn von $8\text{ mm} \geq d_{max}$ bis $\geq 16\text{ mm}$. Bei einschichtigen Produkten, wie z.B. Hohlblocksteinen für den Mauerwerksbau aber auch bei einschichtigen Pflastersteinen beträgt das Größtkorn $8\text{ mm} \geq d_{max} \geq 11\text{ mm}$. Ausnahmen bei der Wahl des Größtkornes sind möglich.

Für die Lösung der unterschiedlichen Füllaufgaben wird die Füllstufe 1 zumeist durch Vibration des Schwingtisches unterstützt. Dadurch wird das Gemenge fließfähiger und kann die zu füllenden Räume besser ausfüllen.

Mit der Realisierung der ersten Füllstufe geht, je nach gewählter Prozesseinstellung, eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Vorverdichtung des Betongemenges einher. Realisiert wird die Vorverdichtung insbesondere durch

- Druck aus der Gewichtskraft der Gemengeschüttung im Füllwagen,
- Schub aus den Relativbewegungen des Füllwagens und/oder des Schüttelrostes sowie
- Vibration(en) während der Füllung (optional).

Füllstufe 2

Durch die Füllstufe 2 wird der mit der Verdichtungsstufe 1 erzeugte Sekundärfüllraum im oberen Bereich der Form mit Vorsatzbeton ausgefüllt. Die einzubringende Masse ist bei Betonsteinen gegenüber der Füllstufe 1 deutlich geringer. Die Höhe der vertikalen, als Barrieren wirkenden Formstege wird durch den bereits eingefüllten Kernbeton ebenfalls deutlich reduziert.

Vorsatzbetone sind bei der Herstellung von Betonsteinen ebenfalls steife Betongemenge. Mit einem Größtkorn $2\text{ mm} \leq d_{max} \leq 5\text{ mm}$ sind sie jedoch deutlich feiner als die Kernbetone. Sie besitzen darüber hinaus einen signifikant höheren Bindemittelgehalt.

Füllausrüstung

Mit dem Begriff "Füllausrüstung" sollen alle Baugruppen und Elemente der Steinformmaschine zusammenfasst werden, die das Einbringen des Betongemenges in den zu befüllenden Raum aktiv und/oder passiv beeinflussen.

Erfolgt die Füllung ohne Unterstützung von Vibration sind dies

- der Fülltrichter mit Dosiereinrichtung,
- der Füllwagen und
- das Formunterteil.

Wird die Füllung durch Vibration unterstützt werden auch

- die Fertigungsunterlage
- der Schlagrahmen und
- der Schwingtisch

zu Elementen der Füllausrüstung.

Wird die erste Verdichtungsstufe wie im Beispiel der Anlage 2.4 unter Verwendung der Auflast durchgeführt, beeinflusst diese mittelbar die zweite Füllstufe. In diesem Fall stellt auch die Auflast ein Element der Füllrüstung dar.

Füllaufgaben

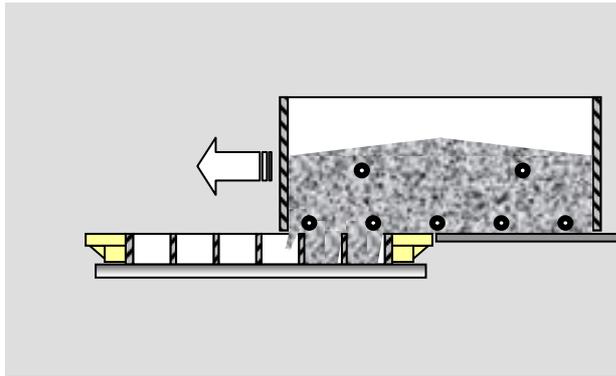
Neben der Anzahl und den Eigenschaften der zu verarbeitenden Betongemenge bestimmen insbesondere die Geometrie und die Anzahl der je Fertigungseinheit (Zyklus) zu erzeugenden Frischbetonkörper den Verlauf des Füllprozesses. Für analytische Betrachtungen können in Abhängigkeit vom Volumen und/oder der Struktur des zu füllenden Raumes aus der Vielzahl der zu fertigenden Produkte 8 essenziell unterschiedliche Füllaufgaben extrahiert werden:

- Rechteck- und Quadratsteine;
- Rechteck- und Quadratblöcke;
- Platten liegend;
- Platten stehend;
- Filigrane Steine und Platten;
- Filigrane Blöcke;
- Tröge;
- Stäbe.

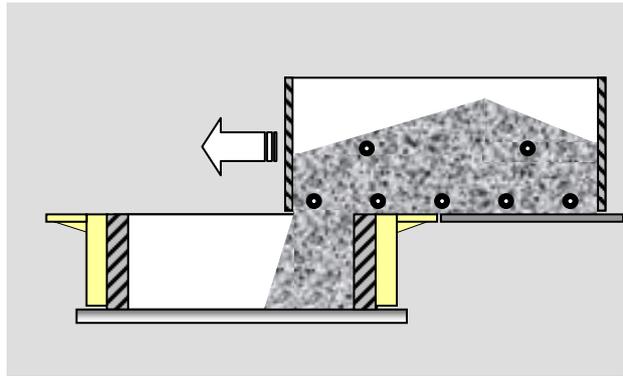
Die Übersicht in der Abbildung 2.28 stellt die differenten Füllaufgaben schematisch dar. Die Grafiken zeigen, näherungsweise maßstäblich, jeweils das Überfahren der Form durch den Füllwagen. Mit der gewählten Strukturierung der Füllaufgaben wird die Mehrzahl der in der Praxis relevanten Füllaufgaben beschrieben. Nur wenige Sonderfälle bleiben unberücksichtigt.

Die Grafiken geben im Schnitt einen Blick in die jeweils zu füllenden Räume frei. Für die Definition der unterschiedlichen Füllaufgaben ist neben der Ausformung der Formstege, Formkerne und Kernhalter insbesondere das Oberflächen-Volumen-Verhältnis im Füllraum als "spezifische Oberfläche" von Bedeutung. Diese wird durch den Quotient aus dem Volumen des zu füllenden Raumes V_{FR} und der Oberfläche innerhalb des zu füllenden Raumes A_{FR} quantifiziert. Zwei Extreme bilden die Füllaufgaben 2 und 6 der Abbildung 2.28. So kann beispielsweise bei der Herstellung von großen Blöcken der Quotient aus $A_{FR} : V_{FR}$, im Folgenden als *Füllraumkennzahl* bezeichnet, mit $3 \text{ m}^2 : 0,5 \text{ m}^3 \approx \underline{6 \text{ m}^{-1}}$ betragen.

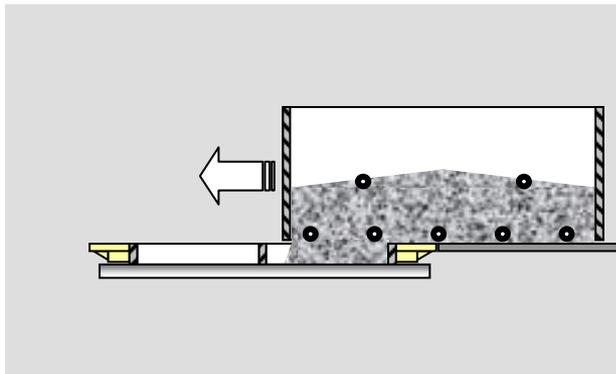
Bei der Herstellung von filigranen Blöcken (Vollwärmeblöcke 12 DF) hingegen kann die Füllraumkennzahl $A_{FR} : V_{FR}$ mit $143 \text{ m}^2 : 0,27 \text{ m}^3 \approx \underline{540 \text{ m}^{-1}}$ einen neunzigfachen Wert einnehmen. Unterschiedliche Auswirkungen auf den Verlauf des Füllens sind damit unabdingbar.



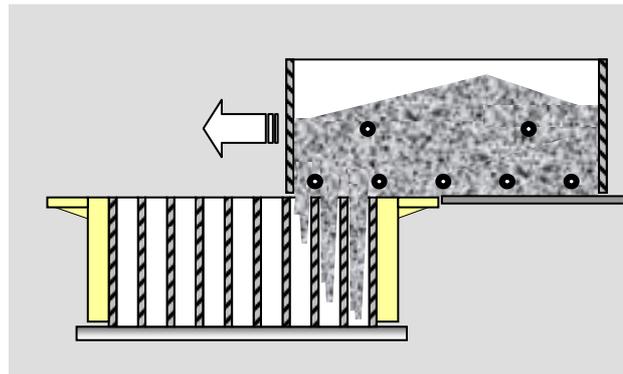
Füllaufgabe 1:
Rechteck- und Quadersteine



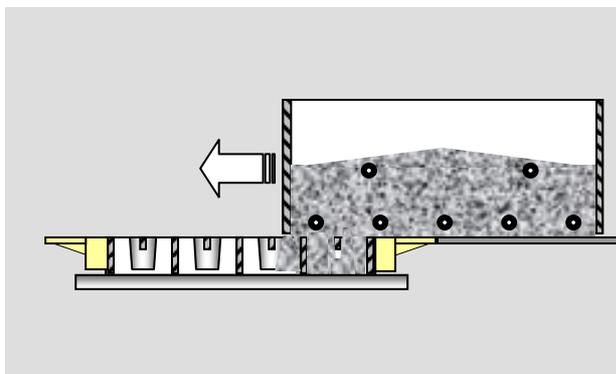
Füllaufgabe 2:
Rechteck- und Quaderblöcke



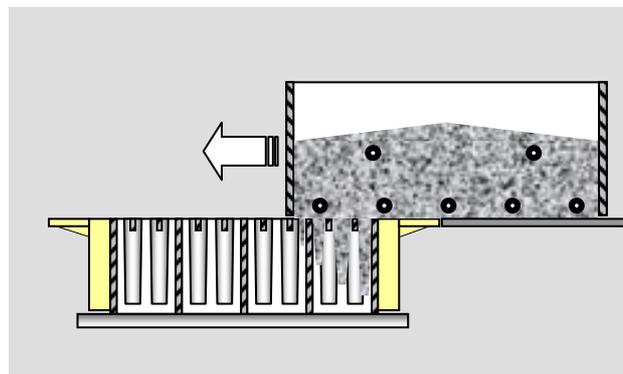
Füllaufgabe 3: Platten liegend



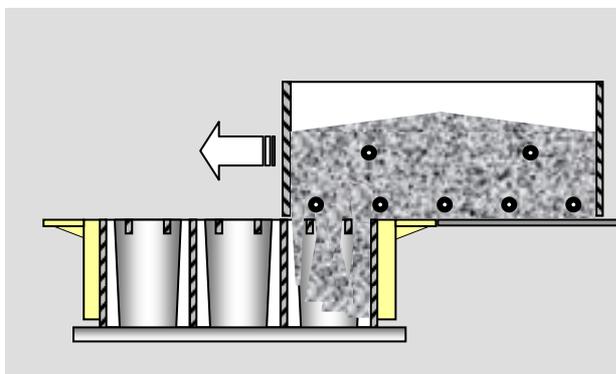
Füllaufgabe 4 : Platten stehend



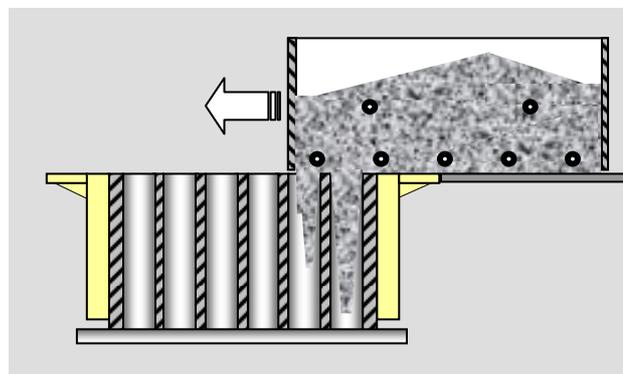
Füllaufgabe 5:
Filigrane Steine und Platten



Füllaufgabe 6: Filigrane Blöcke



Füllaufgabe 7: Tröge



Füllaufgabe 8: Stäbe

Abbildung 2.28: Überblick der unterschiedlichen Füllaufgaben bei der Produktion von Betonsteinen

3. Methode zur Erfassung und Evaluierung der Füllungsgüte

Eine wesentliche Voraussetzung für die Analyse des Füllprozesses ist die Quantifizierung und Bewertung des Prozessergebnisses. Publikationen und Methoden zur expliziten Ergebnisbeschreibung sind nicht bekannt.

Zunächst soll geprüft werden, ob die bereits im Rahmen der werkseigenen Qualitätskontrolle zur Anwendung kommenden Prüfverfahren für eine Bewertung der erreichten Füllungsgüte geeignet sein können. Betrachtet man die Ergebnisse dieser Festigkeits-, Rohdichte- und Widerstandsfähigkeitsprüfungen an Betonsteinen, so ist es sicherlich möglich, mittelbare Beziehungen zur Füllungsgüte abzuleiten. Die Resultate dieser Prüfungen, welche die

- Versagensspannungen,
- Dichten,
- Abwitterungs- und
- Abriebmassen

der Proben angegeben, werden jedoch nicht nur von der Homogenität der Füllung, sondern auch von einer Vielzahl anderer Einflussfaktoren bestimmt. Sie sind daher für die Quantifizierung und Evaluierung des Füllungsergebnisses ebenso ungeeignet wie für die Analyse des Füllprozesses selbst. Darüber hinaus würde deren Anwendung für die umfassende Abbildung der Füllungsgüte einen nicht realisierbaren Prüfaufwand darstellen. Für die Bewertung und Verifizierung der Füllungsgüte im Ergebnis von numerischen Simulationen, siehe Abschnitt 8, stehen Festbetoneigenschaften nicht zur Verfügung. In diesem Fall können nur die in die Form eingebrachte Masse der Partikel bestimmt und die daraus resultierende Füllungsgüte berechnet werden.

Im Rahmen der Untersuchungen war es daher notwendig, eine geeignete Methode zu entwickeln, die das Ergebnis der Füllung aus realen Prozessen und aus numerischen Experimenten gleichermaßen präzise beschreiben kann. Ausgehend von der Definition des Prozesszieles ist dabei unter Anwendung geeigneter statistischer Methoden zu bestimmen,

- wie homogen es gelingt, das Betongemenge im Füllraum zu verteilen bzw.
- wie exakt es gelingt, die Steinmassen der Sollmasse zu approximieren.

Im vorliegenden Abschnitt wird die entwickelte Methode zur Bestimmung und Bewertung des Prozessergebnisses ausführlich beschrieben. Um die Füllungsgüte abzubilden, werden klassische Methoden der deskriptiven Statistik angewandt. Die Merkmalsverteilungen in den gefertigten Einheiten werden systematisch erfasst und analysiert. Die Betrachtungen beziehen sich zunächst ausschließlich auf die Massen der diskreten Betonkörper innerhalb einer untersuchten Stichprobe. Die Distribution der unterschiedlichen Gemengekomponenten innerhalb eines Probekörpers oder innerhalb einer Stichprobe bleibt unberücksichtigt.

Zur effizienten Protokollierung und Aufbereitung der Daten wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen unter Nutzung der Standardsoftware Microsoft Excel entsprechende Dateien entwickelt. Im Folgenden werden die Algorithmen zur Messwertaufnahme sowie zur Berechnung und Bewertung der Füllungsgüte beschrieben. Die Abbildungen und Tabellen zeigen die dafür entwickelten Nutzeroberflächen:

- die Register "Messwerte" (Abbildung 3.1) und "Nutzervorgaben" (Abbildung 3.2) für die Eingabe der Messwerte und der Nutzervorgaben;

- die Register "Zyklus" 1 bis 10 für die anschauliche Darstellung der Massenverteilungen (Abbildung 3.3);
- das Register "Mittelwerte" (Abbildung 3.4) zur Zusammenfassung der Massenverteilungen aller Zyklusregister 1 bis 10 und
- das Register "Auswertung" zur Berechnung der empirischen Kenngrößen sowie zur Darstellung des Histogrammes der Merkmalsverteilung.

Die Algorithmen werden anhand der Stichprobe $6K$ erklärt. Die Ziffer "6" steht für die sechste untersuchte Steinformmaschine. Der Buchstabe "K" steht für die Massenverteilung im Ergebnis der Kernbetonfüllung (Füllstufe 1).

3.1 Datenerfassung und -verarbeitung

Mit der Quantifizierung der Füllungsgüte soll das Prozessergebnis objektiv, in Zahlen messbar dargestellt werden. Dazu bedarf es zunächst der Auswahl eines Merkmals. Merkmale sind die Eigenschaften der Elemente einer Stichprobe. Entsprechend den Merkmalswerten oder Merkmalsausprägungen werden in der Statistik quantitative und qualitative Merkmale unterschieden. Diese können stetig oder diskret sein [27],[28].

3.1.1 Aufnahme der Messdaten

Für den Untersuchungsgegenstand "Füllung der Form mit Betongemenge" wird die lagerfeuchte Steinmasse m_i als das geeignete quantitative, stetige Merkmal betrachtet. Da für die Analyse des Füllprozesses vollständige gefertigte Einheiten zu untersuchen sind, wird der Stichprobenumfang n so gewählt, dass dieser ein Vielfaches der Probenzahl je Fertigungszyklus Z darstellt. Die Probenzahl je Fertigungszyklus n_{PZ} entspricht der Anzahl der Betonkörper je gefertigter Einheit. Für die im Abschnitt 4 beschriebenen Untersuchungen wurden jeweils 10 Fertigungszyklen à 48 Steine als Stichprobenumfang mit $n = 480$ gewählt.

Zunächst werden die Massen $m_1 \dots m_n$ durch systematische Verwiegung der Steine der aufeinander folgenden Zyklen unter Beachtung der Zeilen- und Spaltenlage bestimmt. Die Editierung der Steinmassen erfolgt mit Hilfe eines zyklusbezogenen Eingabeschemas im Register "Messdaten". Die Abbildung 3.1 zeigt die entsprechende Nutzeroberfläche. Je nach Anzahl der zu untersuchenden Zyklen enthält das Register eine äquivalente Anzahl von Eingabeschemen. Jedes Eingabefeld innerhalb des Schemas entspricht einer Stein- bzw. Probemasse m_i . Im gezeigten Beispiel bildet das Eingabeschema einen Fertigungszyklus mit 48 Rechtecksteinen ab. Das Register "Messwerte" ist der Ausgangspunkt, die sogenannte Urliste, für die statistischen Untersuchungen.

3.1.2 Berechnung der Füllungskennzahlen

Ausschließlich an Hand der ermittelten Steinmassen m_i ist die Bewertung der erreichten Füllungsgüte nur eingeschränkt möglich. Ohne unmittelbare Aussagekraft sind die absoluten Massen für die Evaluierung von Mischbelegungen. Ebenfalls ungeeignet sind sie für die Gegenüberstellung von gleichartigen Steinen, die aus Ausgangsstoffen mit unterschiedlichen Dichten hergestellt wurden.

Um ein stetiges, qualitatives Merkmal für die Bewertung der untersuchten Grundgesamtheit zu generieren, werden die ermittelten Steinmassen m_i nach der Gleichung

$$f_i = m_i / m_{ref} \quad (3.1)$$

in dimensionslose Füllungskennzahlen $f_1 \dots f_n$ transformiert.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1											
2		Eingabe der Versuchsdaten									Werte übernehmen und rechnen
3											
4		Zyklus 1									
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											

Abbildung 3.1: Schema im Register "Messwerte" zur Eingabe der Steinmassen $m_1 \dots m_{48}$ des ersten Zyklus Z_1

Die Referenzmasse m_{ref} steht dabei für einen zu wählenden Bezugswert, vorzugsweise die anzustrebende Sollmasse der Probe m_{soll}

$$m_{ref} = m_{soll}$$

Das Erreichen der Sollmasse wird in diesem Fall nach Gleichung 3.1 mit

$$f_i = f_{soll} = 1$$

definiert. Die Sollmasse ist ein Kennwert der werkseigenen Qualitätskontrolle bei der Produktion von Betonsteinen. Sie errechnet sich aus der anzustrebenden Steinhöhe und dem Volumen des Steines.

Je nach Auswertungsziel kann die Referenzmasse auch durch Parameter der deskriptiven Statistik, wie beispielsweise dem Maximalwert

$$m_{ref} = m_{max}$$

oder dem arithmetischen Mittel

$$m_{ref} = \bar{m}$$

der Stichprobe definiert werden.

Die Wahl des Maximalwertes oder des Mittelwertes kann dann vorteilhaft sein, wenn ausschließlich die Streuung einer Verteilung und/oder der Vergleich der Streuung mehrerer Stichproben von Interesse sind. Nicht anwendbar sind diese Methoden bei so genannten Mischbelegungen.

Die Definition des für die Transformation notwendigen Referenzwertes erfolgt über Pointbuttons bzw. durch Eingabe im Register "Nutzervorgaben". Ebenfalls in diesem Register können die Anzahl der Farbabstufungen und die Farbtöne für die zu generierenden Masseverteilungsmatrizen festgelegt werden. Die Abbildung 3.2 zeigt die Nutzeroberfläche dieses Registers. Im dargestellten Beispiel wird als Referenzmasse die Sollmasse des gefertigten Steines mit $m_{ref} = m_{soll} = 3330 \text{ g}$ definiert. Die Sollmasse errechnet sich aus dem Steinvolumen und der anzustrebenden Steinrohichte. Mit der Betätigung des Buttons "Vorgaben übernehmen/speichern" werden die Nutzervorgaben für die Berechnungsalgorithmen übernommen.

Anzahl Farbabstufungen:	10	Prozent
Farbe(0):		88
Farbe(1):		90
Farbe(2):		92
Farbe(3):		94
Farbe(4):		96
Farbe(5):		98
Farbe(6):		100
Farbe(7):		102
Farbe(8):		104
Farbe(9): (Maximalwert)		106

Abbildung 3.2: Schema im Register "Nutzervorgaben" zur Definition der Auswertemodi

Nach Eingabe aller Steinmassen und Wahl der Benutzervorgaben wird durch Betätigung des Buttons "Werte übernehmen und rechnen" im Register "Messwerte" (Abbildung 3.1) die Berechnung der Füllkennzahlen $f_1 \dots f_n$ gestartet. In dessen Folge werden alle Zyklusregister (Abbildung 3.3) zuzüglich eines Registers "Mittelwert" (Abbildung 3.4) durchlaufen. Entsprechend der Masseverteilung werden die Zellen farblich abgestuft. Die so generierten Masseverteilungsmatrizen bilden in ihrer Konfiguration, näherungsweise maßstäblich, die Grundfläche des zu füllenden Raumes ab.

Die Zellen der Matrix werden durch ihre Zeilen- und Spaltenkoordinaten definiert. Jede Zelle bringt zwei Ziffern zur Anzeige. Die obere Ziffer gibt die Masse des in diese Zelle

gefüllten Gemenges m_i in Gramm an. Die untere, fett hervorgehobene Ziffer zeigt die errechnete Füllungskennzahl f_i . Durch die farbliche Abstufung der Matrix können kritische Zonen innerhalb der im jeweiligen Zyklus gefertigten Einheit schnell lokalisiert werden. Mit dem Umschalten von Zyklusregister zu Zyklusregister innerhalb der Datei werden Unterschiede zwischen den Zyklen detektiert. Die Abbildung 3.3 zeigt exemplarisch die am Sollwert definierte Masseverteilungsmatrix im vierten Zyklus der untersuchten Stichprobe. Der rote Pfeil an der Oberseite der Matrix zeigt die Fertigungsrichtung an.

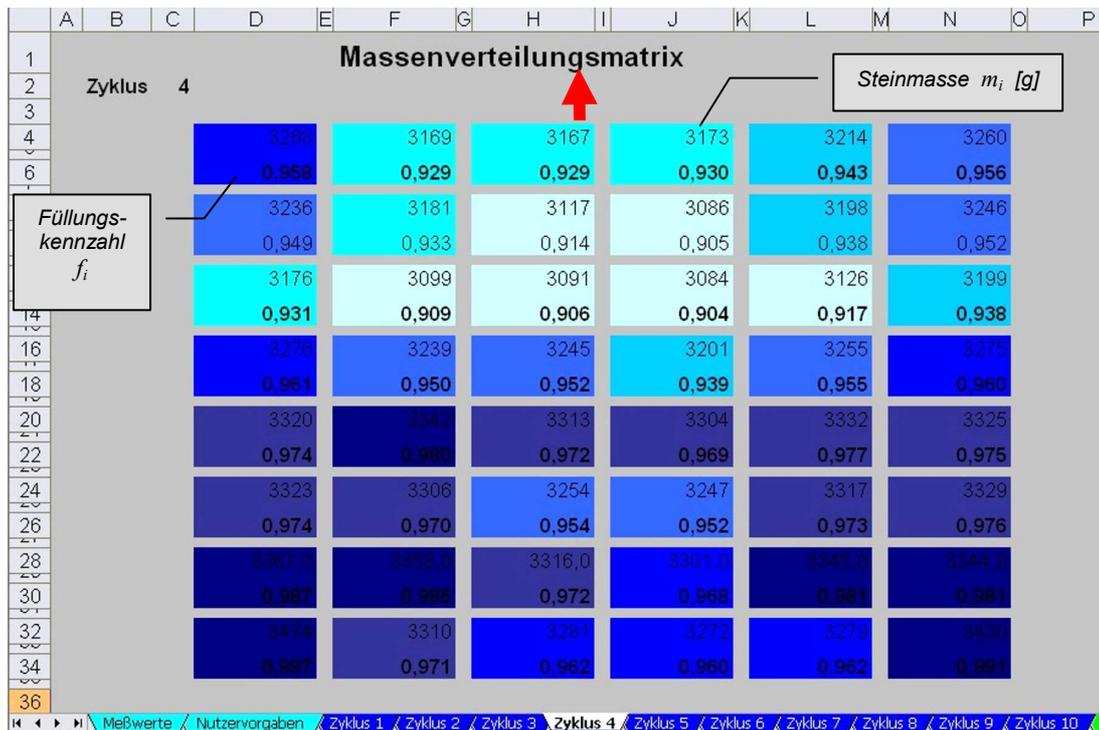


Abbildung 3.3: Schema zur Anzeige der Massenverteilung innerhalb einer gefertigten Einheit im Register "Zyklus 4"

In dem in der Abbildung 3.4 gezeigten Mittelwertregister werden je Zelle die Durchschnittswerte \bar{m}_{Ze} und \bar{f}_{Ze} aus den Einzelwerten der Zyklen Z_1 bis Z_{10} einer Stichprobe abgebildet. Eine solche zusammenfassende Matrix macht systematische, zellenbezogene Füllungsdefizite sichtbar.

3.1.3 Berechnung der statistischen Kennwerte

Zur Evaluierung der Füllungsgüte werden ausgewählte statistische Kenngrößen berechnet und dem jeweiligen Sollwert gegenübergestellt. Darüber hinaus werden graphische Schemata der deskriptiven Statistik genutzt, um die Füllungsgüte übersichtlich zu beschreiben. Die Berechnungen der empirischen statistischen Kenngrößen sowie die Darstellung des Histogrammes erfolgen stichprobenbezogen im Register "Auswertung" der Datei. Graphische und tabellarische Schemata zur Gegenüberstellung mehrerer unterschiedlicher Stichproben werden in einer separaten Datenbank zusammengefasst und abgebildet.

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	
Mittelwertmatrix aus den Zyklen 1 bis 10																	
1	3278	2	3235	3	3217	4	3206	5	3205	6	3201	7	3201	8	3201	9	3201
	0,981		0,949		0,943		0,940		0,940		0,953		0,953		0,953		0,953
7	3284	8	3211	9	3186	10	3161	11	3186	12	3247	13	3247	14	3247	15	3247
	0,963		0,942		0,934		0,927		0,934		0,934		0,934		0,934		0,934
13	3248	14	3155	15	3126	16	3115	17	3133	18	3133	19	3133	20	3133	21	3133
	0,952		0,925		0,917		0,914		0,919		0,919		0,919		0,919		0,919
19	3289	20	3279	21	3254	22	3233	23	3241	24	3241	25	3241	26	3241	27	3241
	0,965		0,962		0,954		0,948		0,950		0,950		0,950		0,950		0,950
25	3343	26	3343	27	3337	28	3300	29	3300	30	3308	31	3308	32	3308	33	3308
	0,980		0,981		0,978		0,968		0,968		0,970		0,970		0,970		0,970
31	3347	32	3319	33	3294	34	3255	35	3284	36	3288	37	3288	38	3288	39	3288
	0,982		0,973		0,966		0,955		0,963		0,964		0,964		0,964		0,964
37	3412	38	3343	39	3305	40	3256	41	3295	42	3355	43	3355	44	3355	45	3355
	0,990		0,982		0,969		0,955		0,967		0,987		0,987		0,987		0,987
43	3464	44	3343	45	3290	46	3250	47	3309	48	3427	49	3427	50	3427	51	3427
	0,993		0,982		0,968		0,953		0,970		0,991		0,991		0,991		0,991

Zellnummer Ze₁ bis Ze₄₈

zellenbezogenes arithmetisches Mittel aus 10 Messwerten einer Zelle

nutzervorgaben / Zyklus 1 / Zyklus 2 / Zyklus 3 / Zyklus 4 / Zyklus 5 / Zyklus 6 / Zyklus 7 / Zyklus 8 / Zyklus 9 / Zyklus 10 / Mittelwerte / Auswertung

Abbildung 3.4: Schema zur Anzeige der berechneten durchschnittlichen Massenverteilung im Register "Mittelwerte"

Lageparameter der Massenverteilung

Zur Evaluierung der Füllungsgüte werden im ersten Schritt das arithmetische Mittel

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (3.2),$$

sowie der empirische Median

$$f_{0,5} = \frac{f_{n/2} + f_{n/2+1}}{2} \quad (3.3)$$

(bei - n - gerade)

berechnet. Mit der Berechnung der Füllungskennzahlen nach Gleichung 3.1 unter der Bedingung $f_{ref} = f_{soll}$ lässt bereits der errechnete Wert des arithmetische Mittels Rückschlüsse auf das Erreichen der anzustrebenden Sollmasse zu. Mit der Gegenüberstellung des Mittelwertes zum empirischen Median kann eine erste Bewertung der Symmetrie der empirischen Häufigkeitsdichte erfolgen.

Streuungsmaße der Massenverteilung

Für die weitere Evaluierung der Füllungsgüte werden im zweiten Schritt die empirische Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2} \quad (3.4)$$

und die Spannweite

$$R = f_{\max} - f_{\min} \quad (3.5)$$

der untersuchten Stichprobe berechnet.

Mit der Ermittlung dieser Kenngrößen wird die Streuung der Masseverteilung präzise beschrieben. Grundsätzlich gilt, umso kleiner Standardabweichung und Spannweite, umso homogener ist die Füllung.

Als Maß für die Streuung relativ zum Mittelwert der Füllungskennzahl wird im dritten Schritt der empirische Variationskoeffizient

$$V = \frac{s}{\bar{f}} \quad (3.6)$$

berechnet.

3.2 Evaluierung der experimentellen Werte

3.2.1 Darstellung und Bewertung der Füllungsgüte

Die Berechnungen zur Darstellung und Bewertung der Füllungsgüte erfolgen auf vier Ebenen.

Ebene 1: Stichprobenbezogen

Aus allen je Stichprobe vorliegenden Messwerten $n = 480$ werden die empirischen Kennwerte berechnet und die Häufigkeitspolygone ermittelt. Die berechneten Lage- und Streuungsparameter geben Auskunft über die Güte des Füllprozesses und der dabei erzeugten Produkte. Auf dieser Grundlage werden die an unterschiedlichen Steinformmaschinen durchgeführten Untersuchungen primär gegenübergestellt und bewertet.

Ebene 2: Zyklusbezogen

Aus allen innerhalb eines Zyklus gefertigten Proben $n_{PZ} = 48$ werden die empirischen Kennwerte berechnet und die Massenverteilungsmatrix erstellt. Die Auswertung auf der zyklusbezogenen Ebene ermöglicht Aussagen zur Füllungsgüte innerhalb einer gefertigten Einheit. Die Homogenität der Füllung über die Gesamtfläche des zu füllenden Raumes der Form kann bewertet werden.

Ein Vergleich der für eine Steinformmaschine aufgenommenen 10 Massenverteilungsmatrizen erlaubt es, gegebenenfalls bestimmte Muster zu erkennen. Beispielsweise können Zellen mit systematischer Unterfüllung oder Zellen, in denen der Sollwert der Masse sicher erreicht wird, detektiert werden.

Ebene 3: Zellenbezogen

Für jede Zellenposition Ze_1 bis Ze_{48} innerhalb der Form wird das arithmetische Mittel aus allen Zyklen Z_1 bis Z_{10} gebildet. Diese Mittelwerte bilden die Grundlage für die Erstellung der in der Abbildung 3.4 gezeigten Massenverteilungsmatrix im Register "Mittelwerte". Besteht bei der Ausbildung von unterfüllten Zonen innerhalb der Form eine Systematik, wird diese bei der zellenbezogenen Auswertung verstärkt sichtbar. Besteht keine solche

Systematik, sind aus der zellenbezogenen Auswertung kaum Schlussfolgerungen möglich.

Ebene 4: Zyklenbezogen

Für die zyklenbezogene Auswertung werden die Messwerte innerhalb einer jeden gefertigten Einheit zu Zyklusmassen m_{z1} bis m_{z10} nach

$$m_{z_i} = \sum_{i=1}^{n_{PZ}} m_i \quad (3.7)$$

zusammengefasst. Die Zyklusmassen m_{z1} bis m_{z10} bilden innerhalb der untersuchten Stichprobe ein eigenständiges Merkmal. Sie geben an, welche Betonmasse pro Zyklus vom Füllwagen in den zu füllenden Raum gelangt. Anhand der Zyklusmassen und der daraus berechneten Kennwerte können Aussagen zur Gleichmäßigkeit der Produktion von Zyklus zu Zyklus getroffen werden. Die erreichten Ergebnisse werden ebenfalls für die Gegenüberstellung und Bewertung der unterschiedlichen Steinformmaschinen genutzt.

Im Rahmen der statistischen Auswertungen werden zunächst, wie in den Gleichungen 3.2 bis 3.6 beschrieben, für den gesamten Stichprobenumfang $n = 480$ die statistischen Kennzahlen berechnet. Zusätzlich werden die gleichen Parameter für jeden Zyklus mit dem Stichprobenumfang $n_{PZ} = 48$ und für die einzelnen Zellenpositionen mit dem Stichprobenumfang $n_{Ze} = 10$ ermittelt. Die nach der Gleichung 3.7 berechneten zehn Zyklusmassen bilden den Stichprobenumfang $n_Z = 10$ für die Bestimmung von Standardabweichung und Spannweite zum Vergleich der gefertigten Einheiten. So werden die Massenverteilungen sowohl innerhalb der gefertigten Einheiten als auch die Entwicklungen der Zyklusmassen innerhalb der Stichprobe abgebildet.

Eine zusammenfassende Darstellung der vier Auswerteebenen und der Berechnungsalgorithmen wird in der Anlage 3.1 gegeben. Die Tabelle 3.1 gibt einen exemplarischen Überblick der im Register "Auswertung" berechneten stichproben- und zyklenbezogenen Kennwerte.

Zur grafischen Darstellung von Lage und Form der Massenverteilung wird das Histogramm ermittelt. Der Stichprobenumfang $n = 480$ wird dafür in eine Anzahl k von Klassen j mit gleicher Klassenbreite b geteilt. Die Anzahl der Klassen soll dabei $7 \leq k \leq 20$ [30] betragen. Die Klassenbreite der Füllungskennzahlen wird aus den Erfahrungen der im Abschnitt 4 beschriebenen Untersuchungen mit $b = 0,01$ gewählt. Die relative Häufigkeit der Füllungskennzahlklasse h_j errechnet sich aus der Gleichung

$$h_j = 100 \cdot n_j / n. \quad (3.8)$$

Die Variable n_j steht für die Besetzungszahl (absolute Häufigkeit) der Füllungskennzahlklasse f_j . Die Tabelle 3.2 stellt exemplarisch die Vorgehensweise zur Erzeugung des Histogrammes dar. Der Berechnungsalgorithmus der Füllungskennzahlen ist im gezeigten Beispiel am Sollwert m_{soll} orientiert. Die schwarz hervorgehobene Zeile weist auf diejenige Klasse hin, die mit dem Sollwert übereinstimmt. Die Zeile, die durch blaue Schrift hervorgehoben wird, zeigt die Klasse mit der größten Häufigkeit (Modalwert) innerhalb der Stichprobe an.

Tabelle 3.1: Übersicht der empirischen Kennwerte des Datensatzes *K6*

Empirische Kennwerte	Stichprobenbezogen $n=480$		Zyklusbezogen Zyklus 4 $n_{PZ}=48$		Zellenbezogen Zelle 5 $n_{Zc}=10$		Zyklenbezogen $n_z=10$	
	m_i [g]	f_i	m_{PZi} [g]	f_i	m_{Zei} [g]	f_{Zei}	m_{Zi} [g]	f_{Zi}
Maximum	3.602	1,082	3.474	1,043	3.280	0,985	160.168	1,002
Minimum	3.053	0,917	3.084	0,926	3.130	0,940	154.806	0,969
arithmetisches Mittel	3.271	0,982	3.258	0,978	3.205	0,962	157.012	0,982
Sollwert (Vorgabe)	3.330	1	3.330	1	3.330	1	159.840	1
empirischer Median	3.271	0,982	3.274	0,983	3.204	0,962	156.870	0,981
Standardabweichung	89	0,027	94	0,028	45	0,014	1.662	0,01
Spannweite	549	0,165	390	0,117	150	0,034	5.362	0,034
Variationskoeffizient	0,027	0,027	0,029	0,029	0,014	0,014	0,011	0,011

Tabelle 3.2: Berechnungstabelle zur Ermittlung der Wertepaare $h_j(f_j)$ des Datensatzes *K6*

Klassennummer	Kennzahl Klasse	Aufsummierte Besetzungszahl	Besetzungszahl	Relative Häufigkeit
j	f_j	B_j	n_j	h_j
1	0,91	0	0	0,000
2	0,92	4	4	0,008
3	0,93	11	7	0,015
4	0,94	30	19	0,040
5	0,95	50	20	0,042
6	0,96	92	42	0,088
7	0,97	151	59	0,123
8	0,98	224	73	0,152
9	0,99	305	81	0,169
10	1,00	373	68	0,142
11	1,01	421	48	0,100
12	1,02	441	20	0,042
13	1,03	461	20	0,042
14	1,04	466	5	0,010
15	1,05	474	8	0,017
16	1,06	476	2	0,004
17	1,07	478	2	0,004
18	1,08	479	1	0,002
19	1,09	480	1	0,002
20	1,12	480	0	0,000
Summen			480	1,000

Mit der Darstellung der empirischen Häufigkeitsdichte im Histogramm (Abbildung 3.5) werden Lage, Form und Streuung der Verteilung anschaulich abgebildet. Mit der Darstellung der Sollwertmarke auf der Abszisse des Diagramms kann bewertet werden, inwieweit es gelungen ist, mit allen Einzelproben die anzustrebende Sollmasse zu erreichen.

Im gewählten Beispiel weist die Verteilung drei prägnante Merkmale auf:

- Die Form der Verteilung stellt sich näherungsweise normalverteilt dar.
- Die Lage der Verteilung in Bezug auf den Sollwert ist auf der Abszisse nach links, also zu kleineren Füllungskennzahlen hin verschoben und damit zu niedrig.
- Die Streuung der Verteilung ist relativ groß.

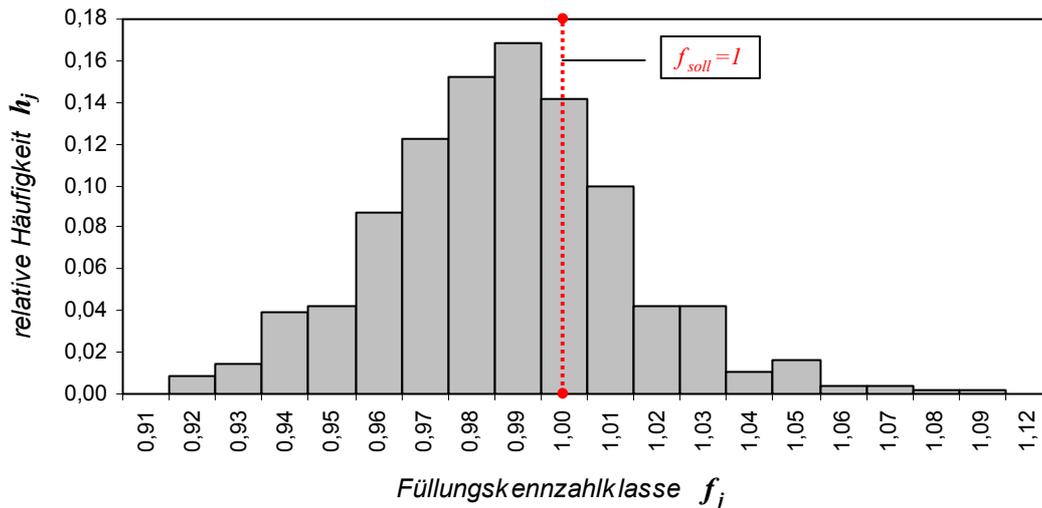


Abbildung 3.5: Histogramm mit Sollwertmarke zur Darstellung der Massenverteilung der Stichprobe 6K im Register "Auswertung"

Die Lage der in der Abbildung 3.5 exemplarisch dargestellten Verteilung verdeutlicht, dass es mit der betrachteten SFM 6 im Ergebnis der ersten Füllstufe nicht in ausreichendem Maße gelungen ist, die anzustrebende Sollmasse zu erreichen. Eine exakte Abfrage der Anzahl der Messwerte, welche die Bedingung $f_i \geq 1$ erfüllen, weisen nur 119 von insgesamt 480 aufgenommenen Werten aus. Das entspricht einem Anteil von 24,8 % der gesamten Stichprobe. Unabhängig von den erreichten Streuungsmaßen der Verteilung, ist die realisierte Füllungsgüte somit als unzureichend zu bewerten.

Da keine ausreichenden Erfahrungen zur Definition eines Streuungsgrenzwertes vorhanden sind, ist im Regelfall nur eine subjektive Bewertung der Verteilung möglich. Mit den unter Abschnitt 4 beschriebenen Untersuchungen wurden erstmals systematisch die statistischen Kennwerte der im industriellen Routinebetrieb generierten Massenverteilungen erfasst. Die errechneten Mittelwerte der Streuungsmaße aus den insgesamt bisher 11 untersuchten Steinformmaschinen geben eine Orientierung zur Bewertung zukünftiger Messungen.

3.2.2 Gegenüberstellung der zyklusbezogenen Kennwerte einer Stichprobe

Mit der Editierung der Massen und den nachfolgenden Berechnungen werden Analysen zur Verteilung des eingebrachten Betongemenges auf die je Zyklus zu füllenden Zellen (Abbildung 3.3) aber auch Analysen zur Massenverteilung von Zyklus zu Zyklus möglich. Die Abbildung 3.6 zeigt mit einem Bereich aus dem Register

“Auswertung“ die Gegenüberstellung der im jeweiligen Zyklus erreichten mittleren Füllungskennzahlen \bar{f}_{Z_i} mit dem zyklusbezogenen Variationskoeffizienten V_{Z_i} des Datensatzes $6K$. Die beiden Diagramme bilden einerseits die Entwicklung der Masse und der Füllungsgüte von Zyklus zu Zyklus ab. Andererseits werden gegebenenfalls auftretende Wechselbeziehungen zwischen der gefüllten Masse und der erreichten Verteilung dieser Masse detektiert.

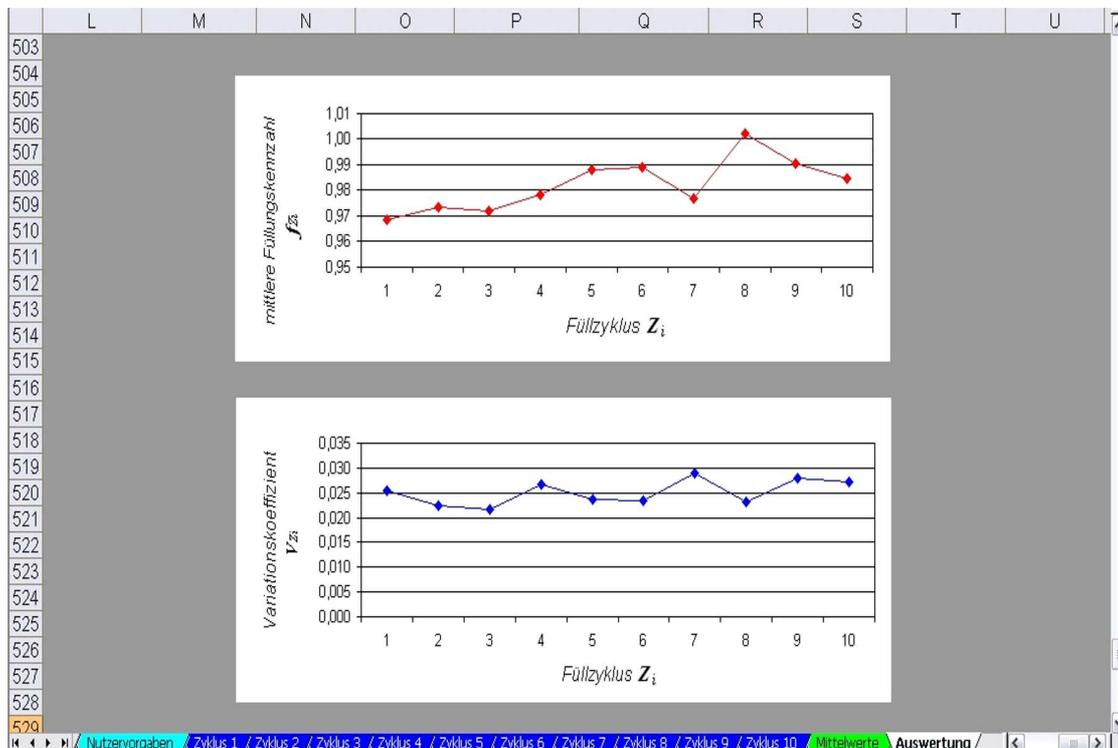


Abbildung 3.6: Diagramme zur Darstellung und zum Vergleich der zyklusbezogenen Füllungskennzahlen und der zyklusbezogenen Füllungsgüte innerhalb der Stichprobe $6K$ im Register “Auswertung“

3.2.3 Vergleich von Stichproben unterschiedlicher Steinformmaschinen

Für eine vergleichende graphische Betrachtung von Stichproben, die auf unterschiedlichen Steinformmaschinen erzeugt wurden, werden die Häufigkeitspolygone der Verteilungen auf der Basis der Gesamtstichprobe $n = 480$ genutzt. Das Diagramm in der Abbildung 3.7 zeigt exemplarisch die Gegenüberstellung dreier unterschiedlicher Häufigkeitspolygone im Ergebnis der Kernbetonfüllung. Im Vergleich werden Unterschiede in Lage, Streuung und Form gut sichtbar. Die Stichproben $5K$ und $7K$ weisen vergleichsweise enge Verteilungen auf. Die Stichprobe $6K$ streut deutlich stärker.

Im Bezug auf den zu erreichenden Sollwert sind die Ergebnisse der Stichprobe $7K$ als völlig ungenügend zu bewerten. Besser, aber ebenfalls nicht genügend, ist das Ergebnis der Stichprobe $6K$. Die Stichprobe $5K$ weist eine näherungsweise ideale Lage des Häufigkeitspolygons zur Sollwertmarke auf. In diesem Fall wird das Erreichen der Sollwertmasse für alle Steine der Stichprobe sichergestellt.

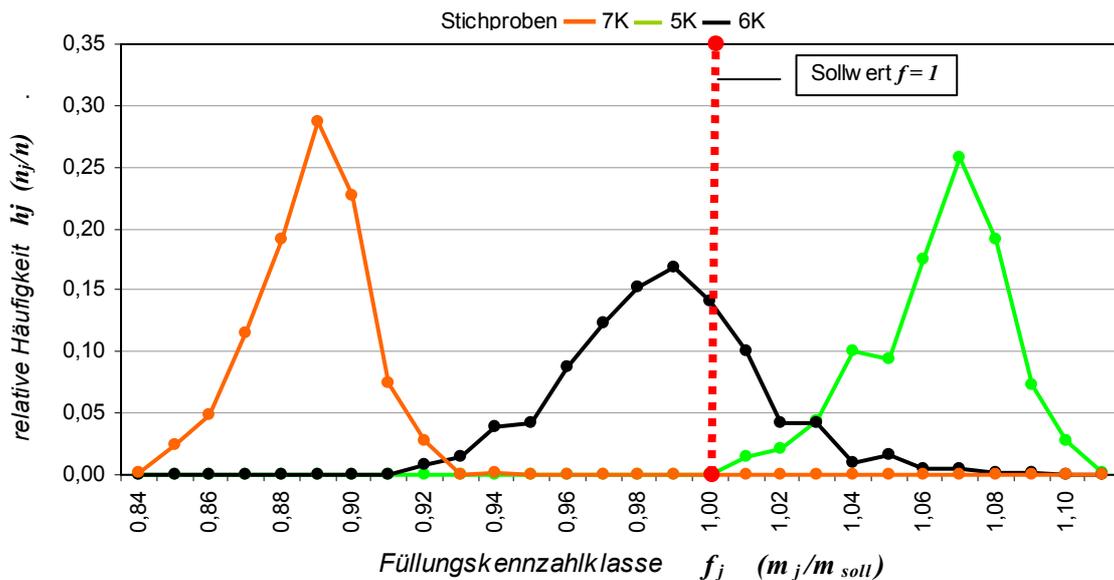


Abbildung 3.7: Gegenüberstellung der Häufigkeitspolygone dreier unterschiedlicher Stichproben im Ergebnis der Kernbetonfüllung

Die gezeigten Häufigkeitspolygone können zur Festlegung eines Gütekriteriums genutzt werden. Dabei wird der prozentuale Anteil der Proben, die den Sollwert der Füllungskennzahl nicht erreichen, begrenzt. Soll dieser Anteil beispielsweise nicht mehr als 5 % betragen, wird das zu erreichende empirische *untere 5%-Quantil* der Verteilung mit

$$f_{0,05} = f_{soll} = 1$$

definiert. Die quasi ideale Füllungsgüte wird in diesem Fall durch diejenige Verteilung abgebildet, welche einen

- minimalen empirischen Variationskoeffizienten V

aufweist und deren

- empirischer, unterer 5%-Quantilwert mit $f_{0,05} = f_{soll} = 1$ dem vorgegebenen Sollwert

entspricht.

Die in der Abbildung 3.8 gezeigte schematische Darstellung der Häufigkeitsdichte beschreibt diesen Fall, ausgehend von der Annahme, dass die Füllkennzahlen normal verteilt sind.

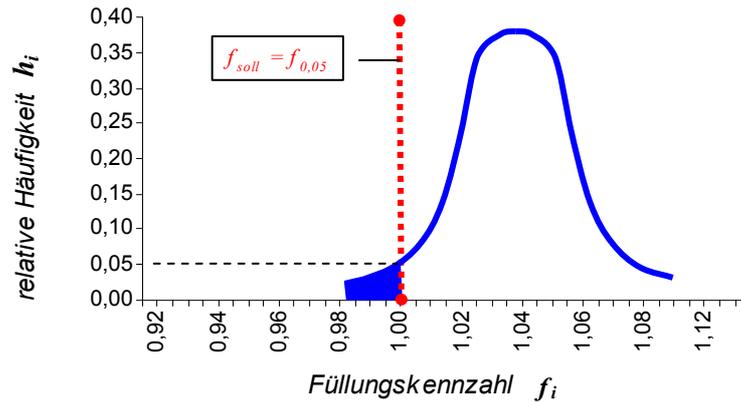


Abbildung 3.8: Häufigkeitsdichte mit minimaler Streuung und optimaler Lage zum Sollwert

Mit der gezeigten Häufigkeitsdichte wird der Sollwert mit 95%-iger Sicherheit erfüllt. Dieser Wert stellt ein für die statistische Qualitätskontrolle von industriellen Produktionsprozessen etabliertes Niveau dar. Der Sollwert selbst setzt die richtige Definition der Sollmasse m_{soll} als "Ersatzkenngröße" für die später zu erreichenden Festbetoneigenschaften voraus. Im Kapitel 5 wird auf die Korrelationen zwischen Steinmasse, Steinrohichte und Steindruckfestigkeit eingegangen.

4. Untersuchung der Füllungsgüte im industriellen Routinebetrieb

Gesicherte Daten über die in der Produktion erreichte Füllungsqualität sind nicht verfügbar. Beim Kauf einer neuen Steinformmaschine werden, wenn überhaupt, nur vage Vereinbarungen zur Gleichmäßigkeit der Produkteigenschaften definiert. Meist werden konkrete Festlegungen ausschließlich auf Wunsch des Käufers im Vertrag fixiert. Bekannt sind beispielsweise Festlegungen über eine sicherzustellende Betonrohddichte mit einer Schwankungsbreite von $\pm 2,5\%$ [29],[30]. Die exakte Definition dieser Toleranz, beispielsweise als Standardabweichung oder als Spannweite einer jeweils für den Nachweis zu untersuchenden Stichprobe, bleibt hingegen aus. Darüber hinaus lässt die Vereinbarung einer solchen rohddichtebezogenen Streuung Einflüsse durch vorhandene Höhenschwankungen der Proben unerkannt. Dementsprechend groß ist der Interpretationsspielraum für Vereinbarungen dieser Art.

Ziel der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen ist es daher, unter Anwendung der im Abschnitt 3. beschriebenen Methode, die tatsächlich im industriellen Routinebetrieb erreichbare Füllungsgüte zu ermitteln. Für eine entsprechende Studie im Praxisbetrieb konnten 5 Industriepartner in Deutschland und der Schweiz gewonnen werden. Im Rahmen der erstmals durchgeführten Untersuchungen wurden bisher 11 Steinformmaschinen an 10 unterschiedlichen Produktionsstandorten systematisch auf die erreichte Qualität der Füllung untersucht.

4.1 Auswahl der zu untersuchenden Proben

Füllaufgabe

Bei der Wahl der zu untersuchenden Füllaufgabe galt es primär, eine Steingeometrie zu finden, die alle beteiligten Industriepartner gleichermaßen im Produktionsortiment haben. Dies bildet die wesentliche Voraussetzung für die spätere Vergleichbarkeit der zu ermittelnden Daten.

Gewählt wurde das weit verbreitete Pflastersteinformat Rechteck 20/10/8 [cm] in zweischichtiger Fertigung aus Kern- und Vorsatzbeton. Dieses Format definiert nach den Erfahrungen der industriellen Produktion keine besonders schwierige Füllaufgabe. Es ist jedoch auf Grund der einfachen Betonrezepturen, der simplen Form und der relativ geringen Massen der Proben für Prüfungen in großer Zahl einfach zu handhaben. Darüber hinaus sind die einfache, gut reproduzierbare Geometrie sowie die gleichmäßige Anordnung der Zellen innerhalb der zu fertigenden Einheit, sehr gut für eine erste Modellbildung und Simulation geeignet.

Stichprobenumfang

Die Auswahl des Stichprobenumfangs wurde im Wesentlichen von den Bedingungen der Fertigung bestimmt. So werden beispielsweise pro Steinpaket jeweils 10 gefertigte Einheiten übereinander gestapelt und verpackt. Zur Vereinfachung der Lagerung und Handhabung der später zur verweigenden Proben wurde der Stichprobenumfang n mit der Steinzahl pro Paket gleichgesetzt.

Die in 10 aufeinander folgenden Zyklen $Z_1 \dots Z_{10}$ gefertigten Einheiten à 48 Steine ergeben den jeweiligen Stichprobenumfang von $n = 480$ je Untersuchungsreihe. Eine Ausnahme bilden die Stichprobenumfänge an den Steinformmaschinen 3 und 4. Mit der Steinformmaschine 3 werden je Zyklus 44 Rechtecksteine 21/10,5/8 gefertigt. Der Stichprobenumfang umfasst damit bei der Untersuchung von 10 aufeinanderfolgend, gefertigten Einheiten $n = 440$. Mit der Steinformmaschine 4 werden je Zyklus nur 36 Rechtecksteine 20/10/8 gefertigt. Der Stichprobenumfang umfasst damit $n = 360$.

4.2 Prämissen für den Start der Probenproduktion

Um aus den Untersuchungen im Routinebetrieb repräsentative Ergebnisse gewinnen zu können, werden für den Start der Analysen an der Steinformmaschine zwei Vorbedingungen definiert.

Prämisse 1 – Betriebszustand der Steinformmaschine

Steinformmaschinen benötigen nach dem Produktionsstart eine Phase zur Erreichung der Betriebstemperatur. Begründet ist dies in der Temperaturabhängigkeit der Viskosität der Öle und Schmierstoffe sowie in der Temperaturabhängigkeit der dynamischen Federkennwerte der Tisch- und Auflastlager. Für den frühesten Start der Untersuchungen wird daher eine vorausgehende Stunde kontinuierlicher Produktion an der Steinformmaschine festgelegt.

Prämisse 2 – Frischbetongemenge und Prozessstabilität

Erfahrungsgemäß können sich insbesondere beim Anfahren einer Produktion Probleme bei der Abstimmung der Gemengefeuchtigkeit ergeben. Dies ist in den Ungenauigkeiten der Feuchtigkeitsmessung und Konsistenzregelung der Mischanlagen begründet. Schwankungen in der Verarbeitbarkeit des Betongemenges stehen im Ergebnis. Der Start der Untersuchungen wird daher zusätzlich vom Erreichen einer stabilen Produktion abhängig gemacht. Diese wird über den erreichten, quasi kontinuierlichen Prozessablauf und der, aus Sicht der Maschinenbediener, optimalen Feuchtigkeit des Frischbetongemenges definiert.

Um die Kern- und Vorsatzfüllung separat beurteilen zu können, wird zwischen den Ergebnissen der Füllstufe 1 und Ergebnissen beider Füllstufen 1+2 differenziert. Die experimentelle Erfassung der Füllungsgüte im Ergebnis der Füllstufe 2 ist sehr schwierig. Nach Abschluss der zweiten Füllstufe müssten Vorsatz- und Kernbetongemenge wieder exakt von einander getrennt werden. Die im Abschnitt 4.6.1. beschriebene Methode schafft eine Möglichkeit zur rechnerischen Bewertung der Vorsatzfüllgüte ohne zusätzlichen Versuchsaufwand.

4.3 Produktion der Proben

Sobald die Prämisse "Prozessstabilität" erfüllt ist, werden zehn aufeinander folgend gefertigte Einheiten mit beiden Füllstufen, Kern- und Vorsatzfüllung, aus der laufenden Produktion mit den Nummern Z_1 bis Z_{10} gekennzeichnet. Außerdem wird auf jeder Einheit die Fertigungsrichtung der Steinformmaschine für die spätere Verwiegung markiert. Dies ist für den räumlichen Bezug der Massenverteilungsmatrizen von grundlegender Bedeutung.

Direkt im Anschluss wird der Vorsatzfüllwagen entleert und der Formgebungs- und Verdichtungsprozess erneut gestartet. Mit identischen Prozessparametern, aber leerem Vorsatzfüllwagen werden nun nochmals zehn aufeinanderfolgende Einheiten ausschließlich aus Kernbeton gefertigt. Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen die unterschiedlichen Proben aus Kern- und Vorsatzbeton (Füllstufe 1+2) bzw. nur aus Kernbeton (Füllstufe 1).

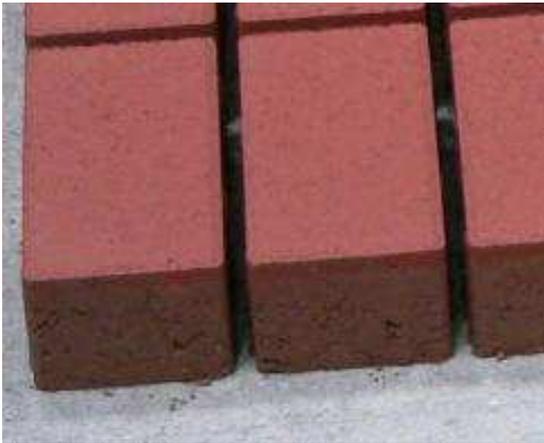


Abbildung 4.1:
Proben aus Vorsatz- und Kernbeton



Abbildung 4.2:
Proben aus Kernbeton

Die Verarbeitungszeit an der Steinformmaschine beträgt etwa 20 Sekunden je Fertigungszyklus mit 48 Steinen. Somit ergibt sich für die Herstellung in beiden Varianten mit insgesamt 20 Zyklen ein Zeitfenster von maximal 10 Minuten. Dieser kurze Zeitraum stellt sicher, dass die Eigenschaften des einzufüllenden Kernbetongemenges für beide Varianten näherungsweise gleich sind. Der Prozessablauf während der Kernfüllung bleibt identisch. So ist es möglich, die Füllaufgabe für die erste Füllstufe konstant zu halten, unabhängig davon, ob nur die Füllstufe 1 oder die vollständige Füllung in den Stufen 1 und 2 vorgenommen wird. Dies ist wesentliche Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Darüber hinaus bildet dies die Grundlage für die Anwendbarkeit der Differenzmethode zur Berechnung der Vorsatzverteilung.

4.4 Dokumentation der Produktion

Während der Produktion der Proben wird der Prozessverlauf an der Steinformmaschine dokumentiert.

Die Dokumentation erfolgt unter Anwendung folgender Methoden:

- Aufnahme von Videosequenzen des Füllens der Form;
- Aufzeichnung von Aktions-Zeit-Funktionen;
- Schwingungsmessungen;
- Aufnahme der Betonrezepturen sowie
- Aufnahme Füllaufgabe und Fülleinrichtung.

Die Abbildung 4.3 zeigt das Startbild einer vergleichenden Videosequenz von vier untersuchten Steinformmaschinen. Die Videoaufnahmen der einzelnen Steinformmaschinen werden so synchronisiert in einem Bild gegenübergestellt. Der gleichzeitige Start der Aufzeichnungen erfolgt aus der Grundstellung der Maschine.

Die Abbildung 4.4 zeigt des Aktions-Zeit-Diagramm ausgewählter Parameter an einer Steinformmaschine während der Produktion der Proben. Aus den Signalen der SPS werden die Weg-Zeit-Funktion der Füllwagen sowie Start und Ende der Vibrationen aufgezeichnet.

Die Abbildung 4.5 zeigt die am Formunterteil aufgenommene Beschleunig-Zeit-Funktion während eines Fertigungszyklus. Die dafür eingesetzten Messmethoden und erzielten Ergebnisse werden in [14] beschrieben.

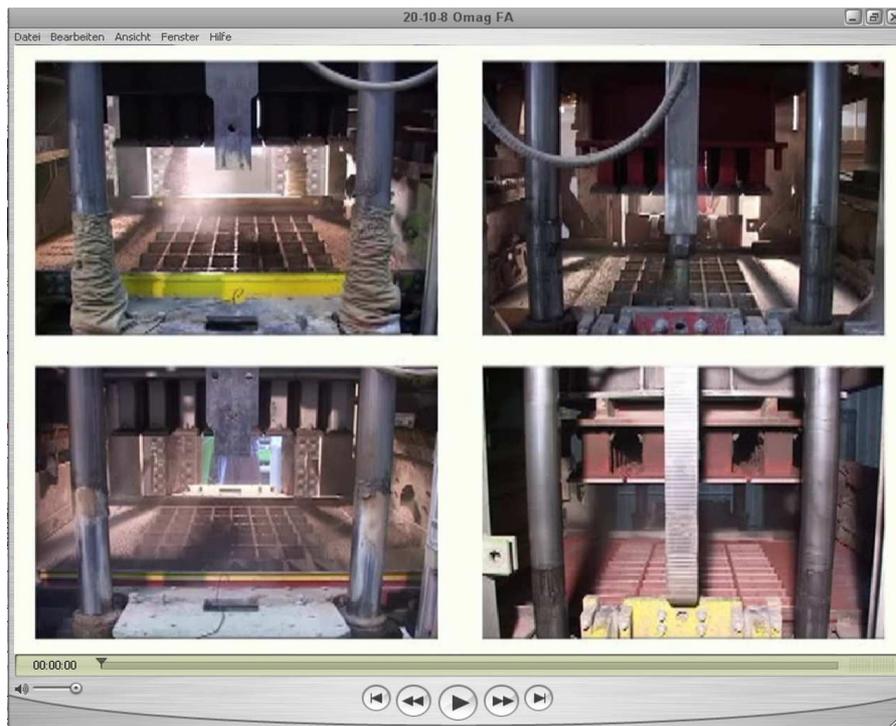


Abbildung 4.3: Startbild einer vergleichenden Videosequenz von vier Steinformmaschinen

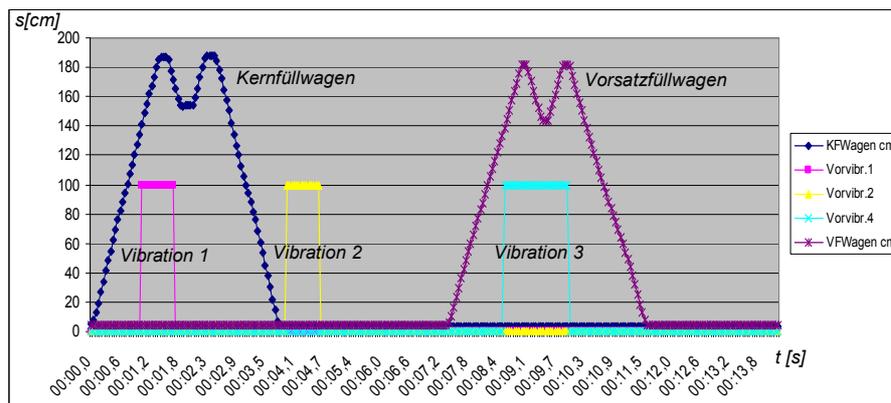


Abbildung 4.4: Aktions-Zeit-Diagramm der Füllwagen und der Vibrationen während der Füllung

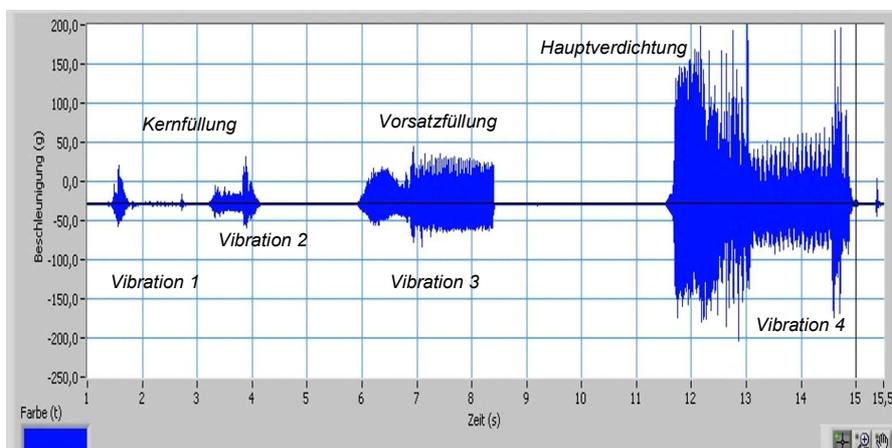


Abbildung 4.5: $a(t)$ -Funktion für die Füllung und Verdichtung innerhalb eines Fertigungszyklus – aufgenommen am Flansch des Formunterteils

Die Abbildung 4.6 zeigt exemplarisch eine maßstäbliche Gegenüberstellung der Ausgangssituationen an fünf der elf untersuchten Steinformmaschinen. Die dreidimensionale CAD-Darstellung verdeutlicht, wie unterschiedlich sich die Bedingungen bei gleicher Füllaufgabe darstellen können. Besonders augenscheinliche Unterschiede bestehen zwischen den Kernfüllwagen (blau). So sind die Volumina der Füllwagen C und E näherungsweise doppelt so groß wie die übrigen Kernfüllwagen. Ebenfalls unterschiedlich sind die Füllwageneinbauten. Beim Vergleich der Vorsatzfüllwagen (gelb) sind auch unterschiedliche Volumina und unterschiedliche Füllwageneinbauten zu erkennen. Die Unterschiede sind dabei jedoch weniger stark ausgeprägt als bei den Kernfüllwagen.

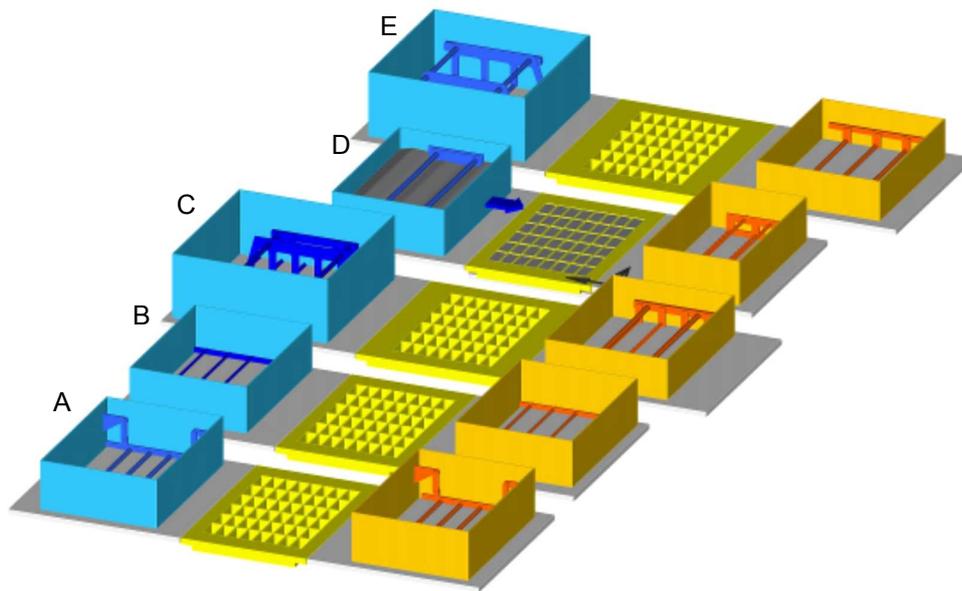


Abbildung 4.6: Maßstäbliche Gegenüberstellung der Füllwagen und Formunterteile von fünf untersuchten Steinformmaschinen in Grundstellung

Die Prozessdokumentation stellt sicher, dass die unterschiedlichen Bedingungen der Stichprobenherstellung sowohl in Bezug auf die Ausrüstungen als auch in Bezug auf die Abläufe im industriellen Routinebetrieb systematisch erfasst und archiviert werden. Auf diese kann zurückgegriffen werden, wenn in späteren Auswertungen kausale Zusammenhänge zwischen der erreichten Befüllungsgüte, der zu realisierenden Befüllungsaufgabe und der zur Verfügung stehenden Befüllungsausrüstung abgeleitet werden sollen. Die Aufnahme der Videosequenzen von Form und Füllwagen kann darüber hinaus zur Verifizierung von Simulationsanimationen Anwendung finden.

4.5 Prüfung der Festbetonproben

Die Untersuchung beginnt mit der systematischen Verwiegung der Proben und der zellen- bzw. zyklusbezogenen Editierung der ermittelten Massen. Für die Lagerung der Proben wurde vereinbart, dass alle Stichproben bis zur Verwiegung unter Dach aufzubewahren sind. Die gekennzeichneten Proben werden nach 7 Tagen mit einer elektronischen Laborwaage (Wiegebereich max. 2.000 g) auf ein Gramm genau verwogen.

Zum Zeitpunkt der Verwiegung besitzen die Steine eine Lagerfeuchtigkeit von 2 % bis 3 %. Eine Trocknung aller Proben ist auf Grund des enormen Aufwandes nicht möglich. Um den Einfluss der Lagerfeuchtigkeit auf das Ergebnis der Massenverteilungen zu

Überprüfen, wird exemplarisch die Korrelation zwischen den lagerfeuchten Massen m_i und den Trockenmassen m_{ti} untersucht. Dafür werden ausgewählte Proben zusätzlich getrocknet und zur Dichtebestimmung vermessen. Darüber hinaus werden nach 28 Tagen zusätzlich die Druckfestigkeiten dieser Proben, für die im Abschnitt 5 beschriebenen Korrelationstests ermittelt.

4.6 Füllungsgüte der untersuchten Steinformmaschinen

Auf Grund der Vielzahl der untersuchten Proben können im vorliegenden Abschnitt nicht alle Ergebnisse im Detail dargestellt werden. Deshalb werden Anwendung und Ergebnisse der unter Abschnitt 3 beschriebenen Methode am Beispiel der Steinformmaschinen 2 und 9 ausführlich sowie für die anderen Maschinen im Überblick dargestellt. Die Steinformmaschine 2 weist eine für die Mehrzahl der im Rahmen der Studie untersuchten Steinformmaschinen typische Füllungsgüte aus. Die Steinformmaschine 9 hingegen zeigt in der ersten Analyse ein auffälliges, zyklusbezogenes Phänomen. An dieser Maschine wurden über die Aufnahme des Ist-Standes hinaus, weitere Untersuchungen vorgenommen und die Wirkung der unter Abschnitt 4.7 beschriebenen Variationen auf die Füllungsgüte untersucht.

Die jeweils zehn Fertigungseinheiten aus Kernbeton im Ergebnis der ersten Füllstufe bilden als Stichprobe einen Datensatz. Jeder untersuchten Steinformmaschine wird eine Nummer von 1 bis 11 zugewiesen. Damit ergibt sich die Kennzeichnung der Datensätze mit $1K$ bis $11K$. Der Zusatz "K" bezeichnet Proben, die nur aus Kernbeton bestehen. Im Ergebnis der Auswertung steht die Güte der ersten Füllstufe.

Die zehn gefertigten Einheiten aus Vorsatz- und Kernbeton im Ergebnis beider Füllstufen bilden jeweils den zweiten Datensatz einer Steinformmaschine. Die Kennzeichnung erfolgt äquivalent mit $1K+V$ bis $11K+V$. Der Zusatz "K+V" steht für Kern- und Vorsatzbetonfüllung. Das Ergebnis der Auswertung stellt die Güte beider Füllstufen in Kombination dar.

Zur Berechnung der Füllungsgüte im Ergebnis der zweiten Füllstufe werden zellen- und zyklusbezogen alle Werte eines Datensatzes K von den entsprechenden Werten eines Datensatzes $K+V$ nach

$$m_{i_v} = m_{i_{K+V}} - m_{i_K} \quad (4.1)$$

subtrahiert. Die weitere Berechnung und Bewertung erfolgt analog der Datensätze "K" und "K+V". Mit den so ermittelten Ergebnissen wird keine reale Verteilung aufgenommen, da für die Berechnung der Differenzmassen nur Wertepaare m_{i_K} und $m_{i_{K+V}}$ aus unterschiedlichen Fertigungseinheiten zur Verfügung stehen. Trotzdem bilden die Resultate eine erste Grundlage für die getrennte Bewertung und Gewichtung beider Füllstufen.

Die zehn auf Grundlage der Gleichung (4.1) errechneten Vorsatzfüllungen bilden den dritten Datensatz einer Steinformmaschine. Die Kennzeichnung erfolgt mit $1V$ bis $11V$. Der Zusatz "V" steht für die Vorsatzbetonfüllung.

4.6.1 Massenverteilungsmatrizen und zyklusbezogene Effekte

Steinformmaschine 2

Die Übersicht in der Abbildung 4.7 stellt die im Ergebnis der ersten Füllstufe ermittelten Massenverteilungsmatrizen gegenüber. Durch die Farbabstufung der unterschiedlich gefüllten Zellen, sind sowohl die inhomogene Verteilung der Massen innerhalb der gefertigten Einheiten als auch Schwankungen von Zyklus zu Zyklus gut zu erkennen. Die Steinmassen nehmen innerhalb der gefertigten Einheiten systematisch in Produktionsrichtung ab. Dieses Phänomen ist bei allen im Rahmen der Studie untersuchten Steinformmaschinen mehr oder weniger stark ausgeprägt zu beobachten. Die Ursache dafür ist in den unterschiedlichen, von den Zellenkoordinaten abhängigen Bedingungen während des Füllens begründet. Diese resultieren aus dem Aufbau und der Funktionsweise der Füllereinrichtung von Steinformmaschinen. Der Abschnitt 6 beschreibt dieses Phänomen noch ausführlich.

Die Übersicht in der Abbildung 4.8 stellt die im Ergebnis beider Füllstufen ermittelten Massenverteilungsmatrizen gegenüber. Die sichtbaren Farbabstufungen lassen zunächst kaum eine Verbesserung der Füllungsgröße gegenüber der ersten Füllstufe erkennen, dies sowohl bezüglich der Massenunterschiede innerhalb der gefertigten Einheiten als auch bezüglich der Massenunterschiede von Zyklus zu Zyklus.

Die Übersicht in der Abbildung 4.9 stellt die aus dem berechneten Datensatz $2V$ ermittelten Massenverteilungsmatrizen gegenüber. Mit der Betrachtung der Matrizen in Zyklusfolge wird ein Abfall der Massen entgegen der Fertigungsrichtung in allen Fertigungseinheiten, mehr oder weniger stark ausgeprägt, erkennbar. Einige Zellen weichen jedoch mit der berechneten Füllungskennzahl deutlich von dieser Systematik ab. Dies ist als Indikator dafür zu werten, dass die Abbildung der Vorsatzfüllgröße auf der Grundlage eines nach Gleichung 4.1 berechneten Datensatzes nur näherungsweise erfolgen kann.

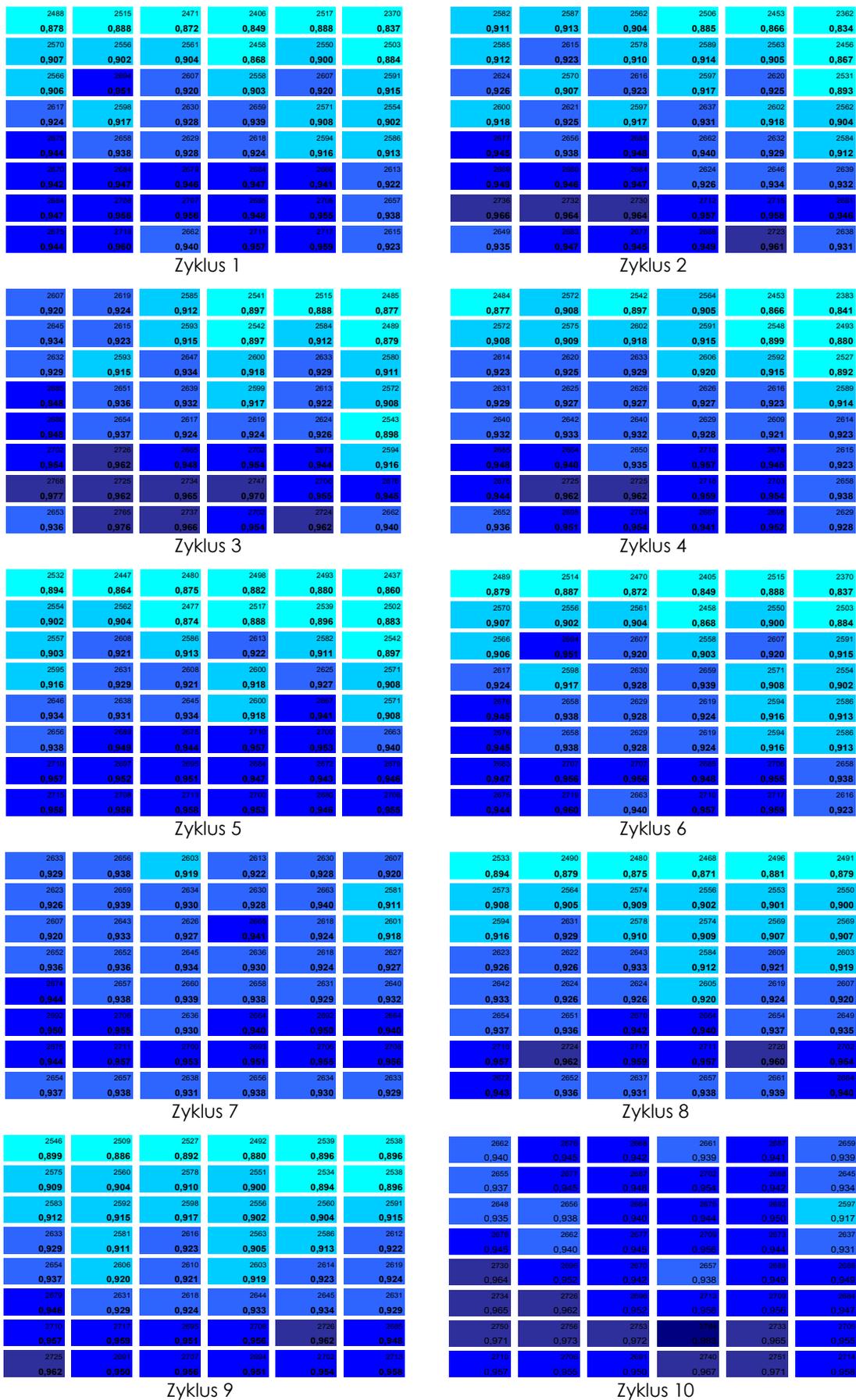


Abbildung 4.7: Massenverteilungsmatrizen der zehn aufeinanderfolgend gefertigten Einheiten im Ergebnis der ersten Füllstufe (Datensatz 2K)

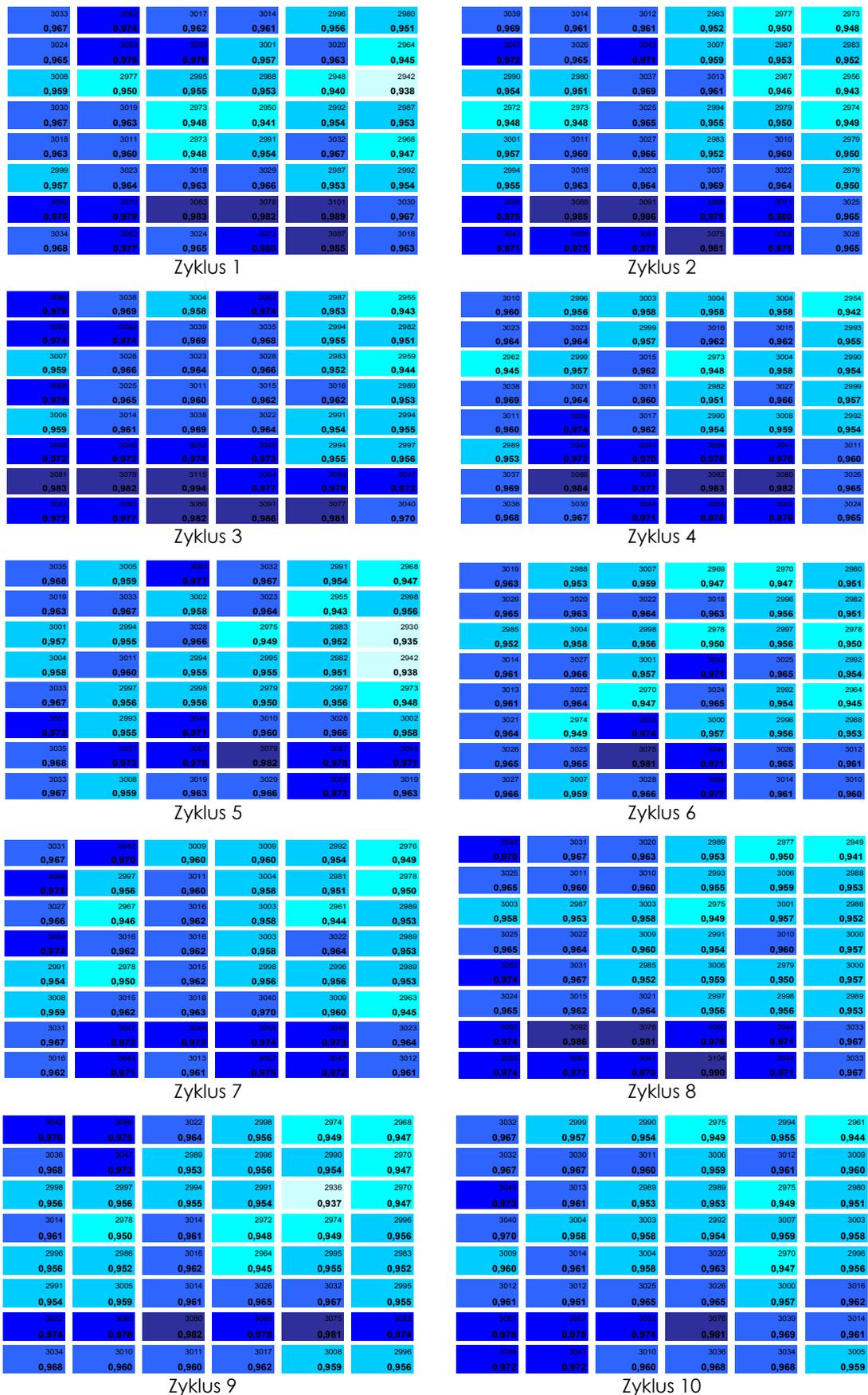


Abbildung 4.8: Massenverteilungsmatrizen der zehn aufeinanderfolgend gefertigten Einheiten im Ergebnis beider Füllstufen (Datensatz 2K+I)

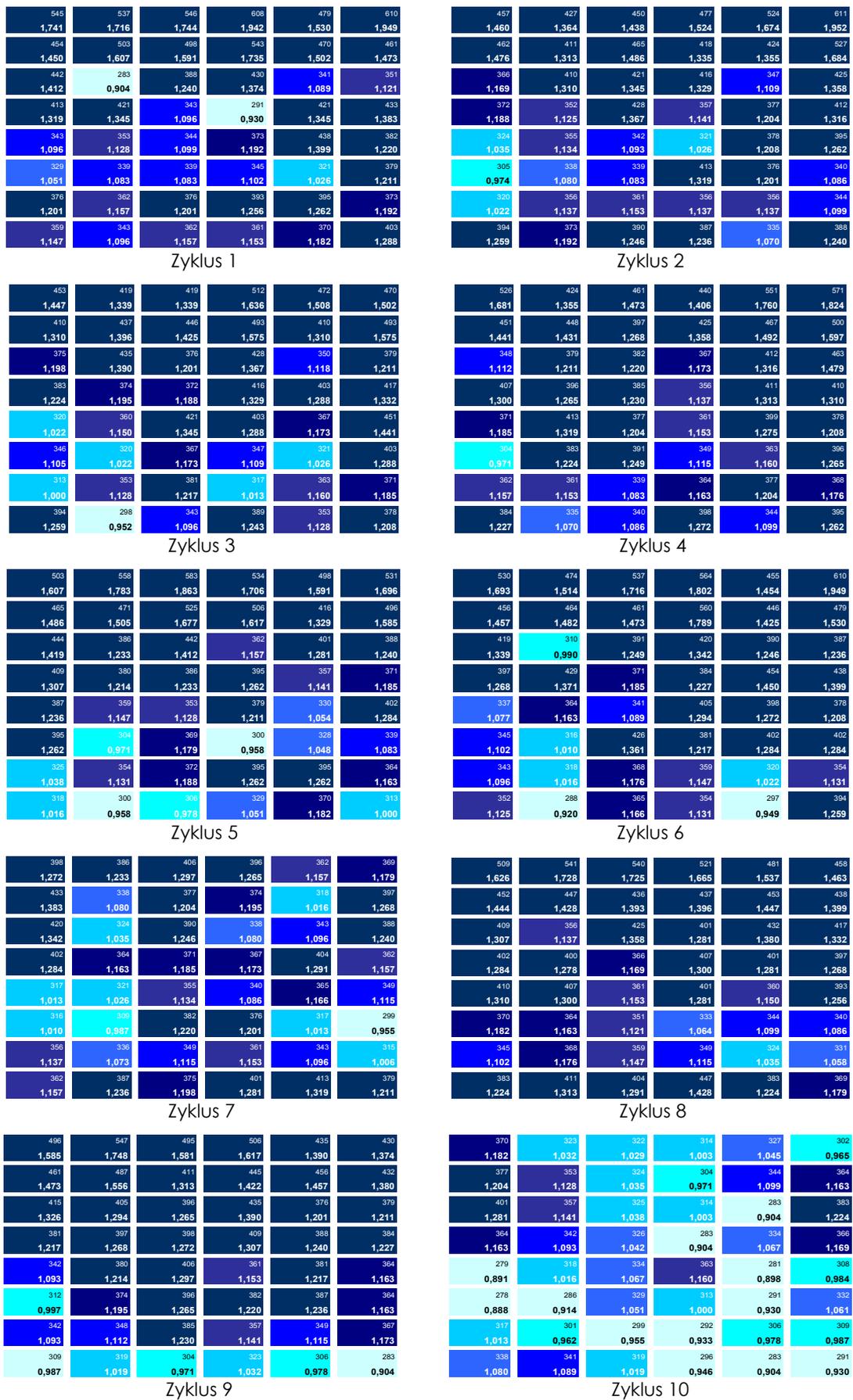


Abbildung 4.9: Massenverteilungsmatrizen für zehn Einheiten im Ergebnis der zweiten Füllstufe (errechneter Datensatz 2V)

Die Gegenüberstellung der Mittelwertmatrizen aller drei Datensätze "K", "K+V" und "V" fasst die Massenverteilungsbilder der Steinformmaschine 2 zusammen (Abbildung 4.10). Die Mittelwertmatrize des Datensatzes 2K bestätigt den systematischen Abfall der Massen in Fertigungsrichtung. Darüber hinaus zeigt die Mittelwertmatrize, dass dabei die rechte Seite einen stärkeren Massenabfall aufweist. Dieser Trend kann auch im Ergebnis der Vorsatzfüllung nicht vollständig egalisiert werden. Im Ergebnis der beiden Füllstufen bleibt die vordere rechte Seite der Form immer noch deutlich unterfüllt. Dementsprechend inhomogen stellt sich die Farbabstufung in der Mittelwertmatrize 2K+V dar. Die Mittelwertmatrize des errechneten Datensatzes 9V zeigt entgegengesetzt zur Mittelwertmatrize 2K einen Anstieg der Massen in Fertigungsrichtung an. Dies kann als ein Indikator für die kompensierende Wirkung der zweiten Füllstufe gewertet werden.

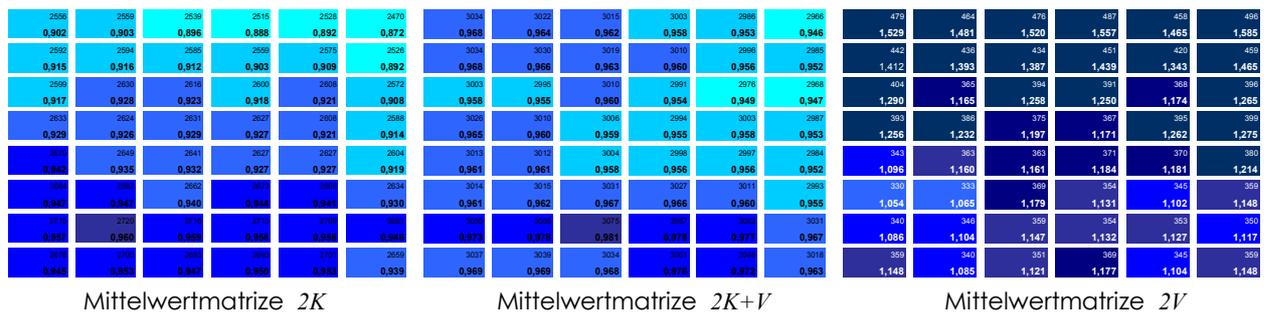


Abbildung 4.10: Massenverteilungsmatrizen "Mittelwerte" für alle Datensätze der Steinformmaschine 2

Mit der Gegenüberstellung ausgewählter, zyklusbezogener statistischer Kennwerte in den folgenden Abbildungen 4.11 bis 4.14 werden die Entwicklung der Zyklusmassen sowie die Streuungen innerhalb der gefertigten Einheiten dargestellt. Darüber hinaus quantifiziert der direkte Vergleich der Datensätze "K" und "K+V" an Hand der mittleren Füllungskennzahlen \bar{f}_{Zi} und der Variationskoeffizienten V_{Zi} innerhalb eines Diagramms (Abbildungen 4.11 und 4.12) die Entwicklung der Füllungsgüte zwischen beiden Füllstufen.

Der Vergleich der Graphen in der Abbildung 4.11 zeigt, dass die Zyklusmassen im Ergebnis beider Füllstufen gegenüber den Zyklusmassen im Ergebnis der ersten Füllstufe sowohl einen signifikanten Anstieg als auch eine Vergleichmäßigung innerhalb der Stichprobe erreichen. Gleichzeitig wird mit der Lage beider Graphen im Diagramm gezeigt, dass weder im Ergebnis der ersten Füllstufe noch im Ergebnis beider Füllstufen die anzustrebende Sollmasse erreicht wird.

Die Gegenüberstellung der Abbildungen 4.11 und 4.12 zeigt für die Stichprobe 2K eine signifikante Wechselbeziehung zwischen der jeweils erreichten Zyklusmasse und der entsprechenden zyklusbezogene Streuung. Im gewählten Beispiel entwickelt sich das Niveau des Variationskoeffizienten V_{Zi} entgegengesetzt zum Niveau der mittleren Füllungskennzahlen \bar{f}_{Zi} .

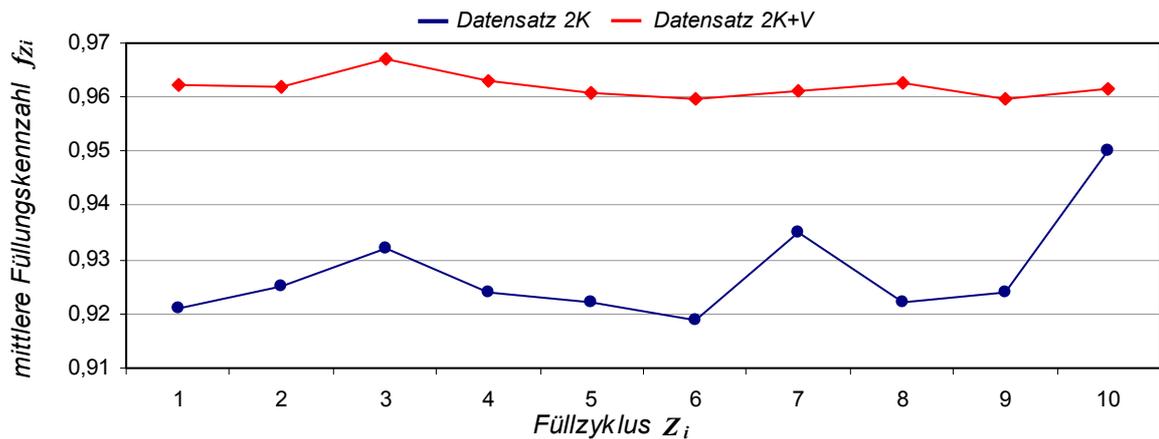


Abbildung 4.11: Entwicklung der Zyklusmassen ($n_z=10$) innerhalb der Datensätze 2K und 2K+V

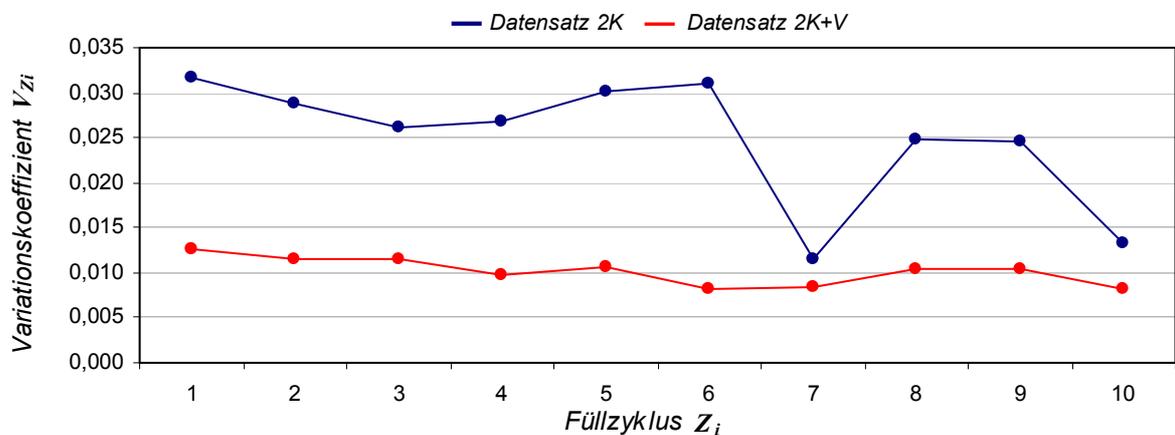


Abbildung 4.12: Entwicklung der zyklusbezogenen Streuung ($n_{pz}=48$) innerhalb der Datensätze 2K und 2K+V

Die Gegenüberstellung der Variationskoeffizienten (Abbildung 4.12) zeigt, dass es gelungen ist, mit der zweiten Füllstufe die Streuung der Massen deutlich zu reduzieren. Im vorliegenden Beispiel lässt sich dieses Erkenntnis mit der ausschließlichen Betrachtung der Massenverteilungsmatrizen (Abbildungen 4.7 bis 4.10) nicht eindeutig ableiten. Der Vergleich der zyklusbezogenen Kennwerte ist daher für eine umfassende Analyse unabdingbar.

Die Abbildungen 4.13 und 4.14 stellen für den errechneten Datensatz 2V die Entwicklung der Zyklusmassen und der zyklusbezogenen Streuungen separat gegenüber. Die Werte der mittleren Füllungskennzahlen (Abbildung 4.13) quantifizieren im Ergebnis der zweiten Füllstufe eine Überfüllung mit Vorsatzgemenge. Die Gegenüberstellung der mittleren Füllungskennzahlen und der Variationskoeffizienten in den Abbildungen 4.13 und 4.14 zeigt im Gegensatz zu den Datensätzen 2K und 2K+V einen umgekehrten Trend in deren Wechselbeziehungen. Die niedrigsten Zyklusmassen erzeugen im vorliegenden Fall die niedrigsten zyklusbezogenen Streuungen.

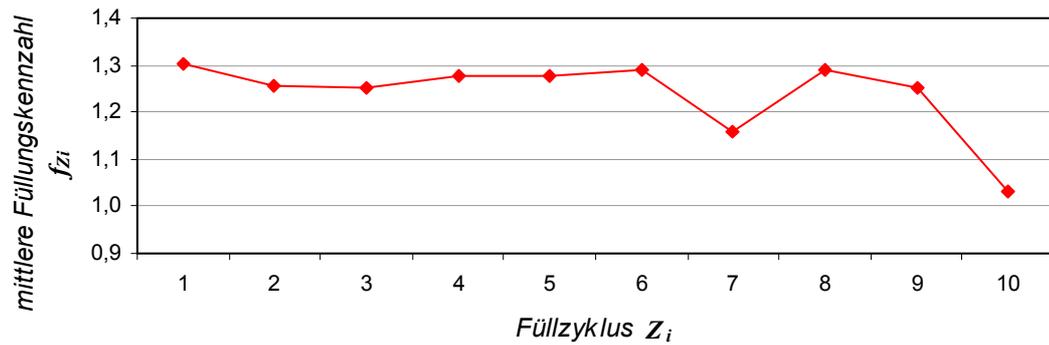


Abbildung 4.13: Entwicklung der Zyklusmassen ($n_z=10$) innerhalb des Datensatzes $2V$

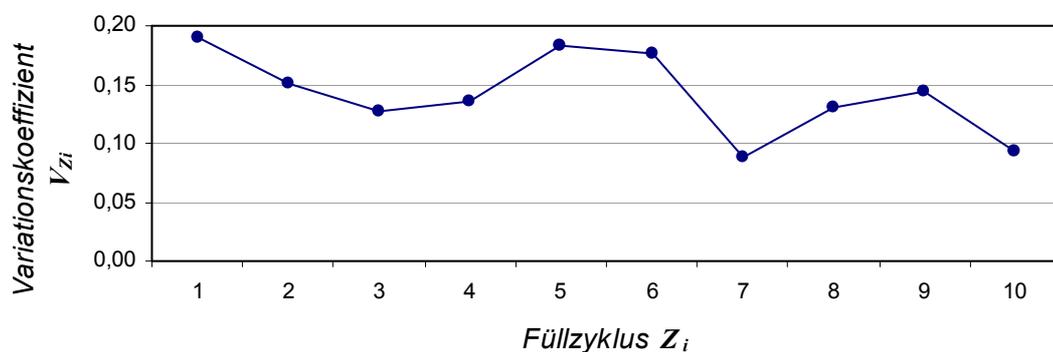


Abbildung 4.14: Entwicklung der zyklusbezogenen Streuung ($n_{PZ}=48$) innerhalb der Datensatzes $2V$

Steinformmaschine 9

Die Übersicht in der Abbildung 4.15 stellt die ermittelten Massenverteilungsmatrizen im Ergebnis der ersten Füllstufe (Datensatz "K") gegenüber. Die Darstellung in Zyklenfolge macht den Wechsel zwischen einem jeweils leichten, unterfüllten und einem jeweils schweren, überfüllten Zyklus deutlich. Bei den unterfüllten Zyklen ist dabei der Abfall der Massen in Fertigungsrichtung deutlicher ausgeprägter als bei den überfüllten Zyklen.

Die Übersicht in der Abbildung 4.16 stellt die Massenverteilungsmatrizen des Datensatzes "K+V" im Ergebnis beider Füllstufen gegenüber. Mit der vergleichsweise dunklen, aber nur schwachen Farbabstufung wird detektiert, dass es mit der zweiten Füllstufe gut gelungen ist, Defizite aus der ersten Füllstufe zu egalisieren. Durch die Abbildung 4.16 wird des Weiteren erkennbar, dass es innerhalb der gefertigten Einheiten eine sehr gut gefüllte Kernzone und eine weniger gut gefüllte Randzone gibt. Dieser Effekt ist bei der Mehrzahl aller innerhalb der Studie untersuchten Steinformmaschinen ausgeprägt. Die Ursachen hierfür können in dem Schüttkegel des zu transportierenden Betongemenges sowie in den Randeffekten innerhalb des Füllkastens begründet sein.

Die Übersicht in der Abbildung 4.17 stellt die aus dem berechneten Datensatz $2V$ ermittelten Massenverteilungsmatrizen gegenüber. Mit der Betrachtung der Matrizen in Zyklenfolge wird sichtbar, dass die Massen innerhalb der gefertigten Einheiten deutlich entgegen der Fertigungsrichtung abfallen. Ebenfalls deutlich erkennbar ist der stetige Wechsel zwischen einer jeweils schweren und einer jeweils weniger schweren Füllung. Diese Abfolge ist entgegengesetzt zum Wechsel der Zyklusmassen im Datensatz $9K$ und verdeutlicht damit die kompensierende Wirkung der zweiten Füllstufe.

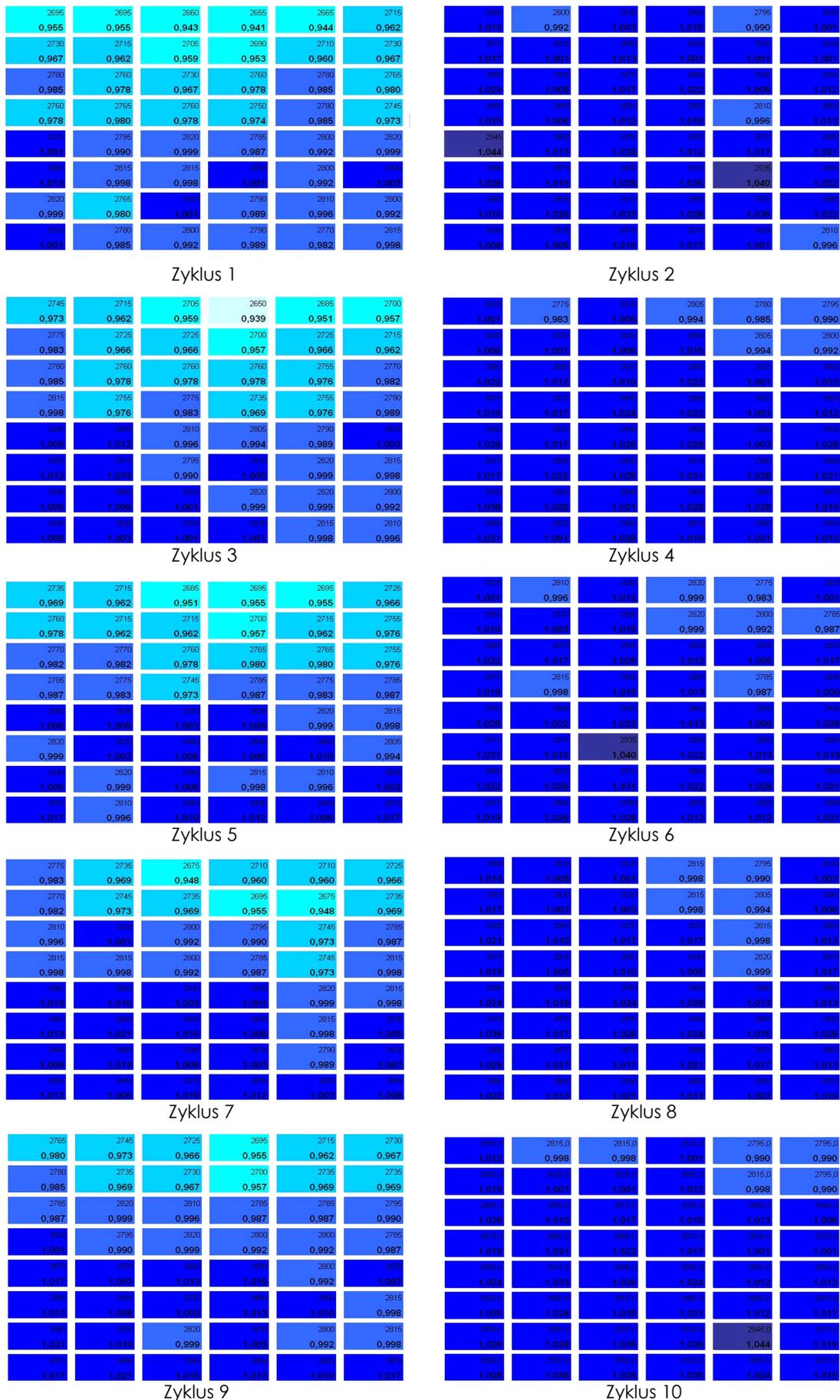


Abbildung 4.15: Massenverteilungsmatrizen der zehn aufeinanderfolgend gefertigten Einheiten aus Kernbeton des Datensatzes 9K

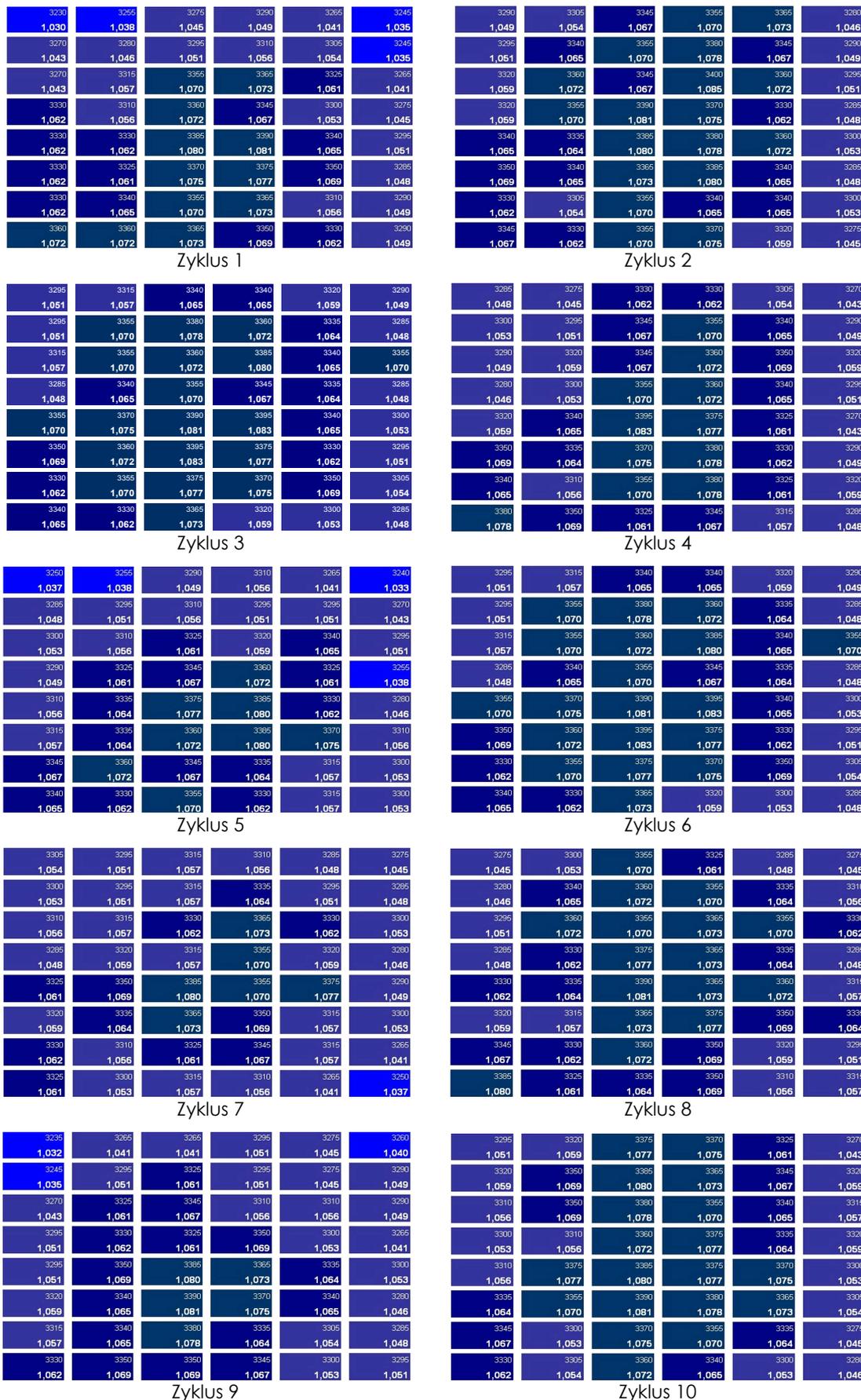


Abbildung 4.16: Massenverteilungsmatrizen der zehn aufeinanderfolgend gefertigten Einheiten aus Kern- und Vorsatzbeton des Datensatzes 9K+V

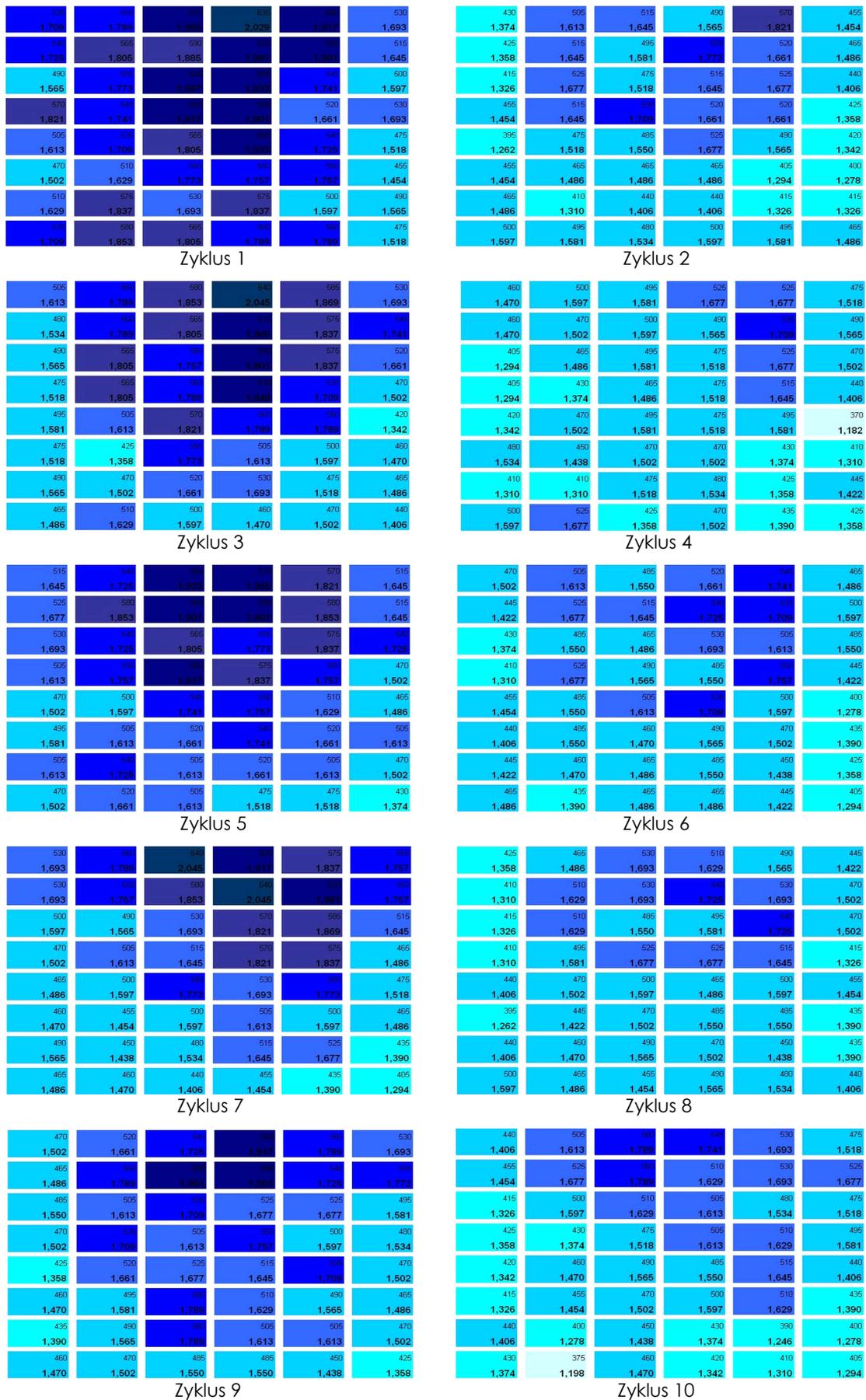


Abbildung 4.17: Massenverteilungsmatrizen für zehn Einheiten im Ergebnis der zweiten Füllstufe (errechneter Datensatz 9V)

zu reduzieren, dies mit entsprechend positiver Auswirkung auf die Kennwerte der Stichprobe.

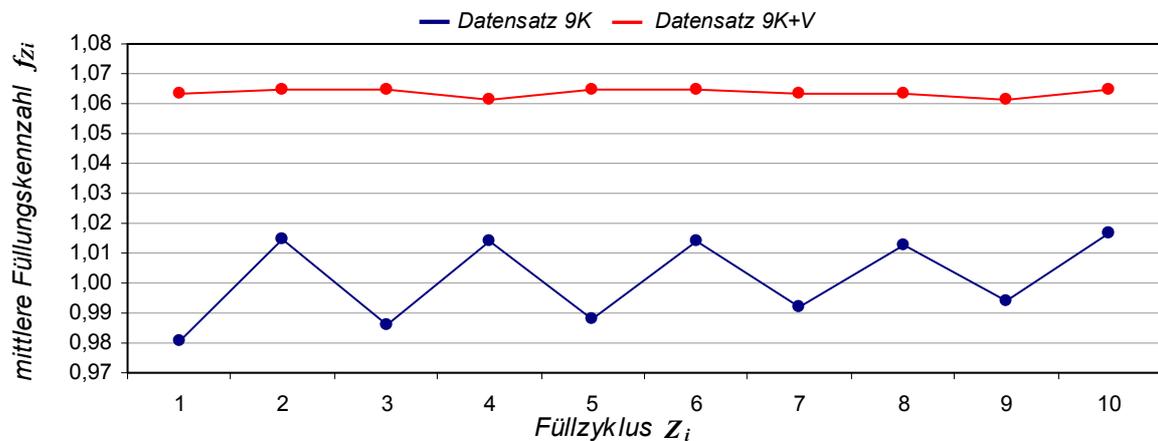


Abbildung 4.19: Entwicklung der Zyklusmassen ($n_Z=10$) innerhalb der Datensätze 9K und 9K+V

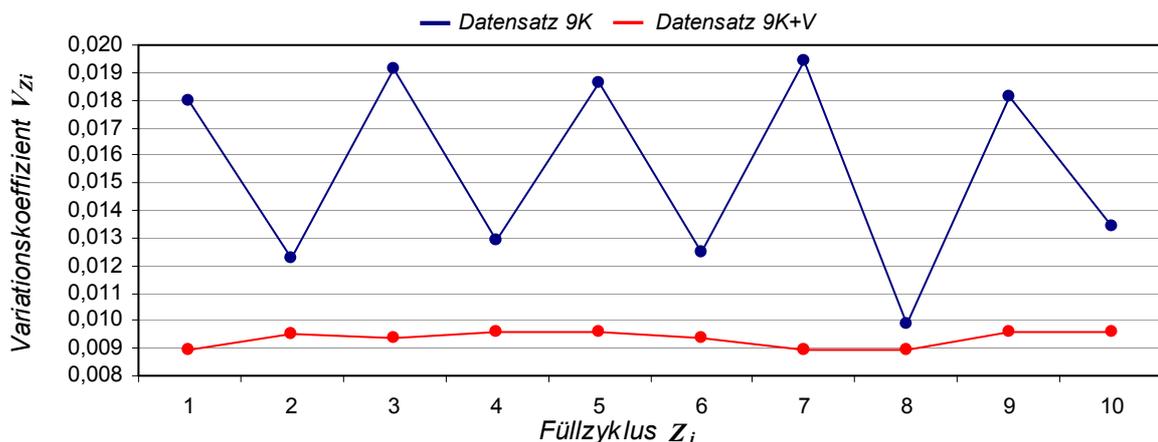


Abbildung 4.20: Entwicklung der zyklusbezogenen Streuung ($n_{PZ}=48$) innerhalb der Datensätze 9K und 9K+V

Die Gegenüberstellung der Abbildungen 4.19 und 4.20 zeigt für die Stichprobe 9K eine besonders stark ausgeprägte Wechselbeziehung zwischen der jeweils erreichten Zyklusmasse und der entsprechenden zyklusbezogenen Streuung. Wie im gewählten Beispiel gut detektiert, entwickelt sich das Niveau des Variationskoeffizienten V_{Z_i} reziprok zum Niveau der mittleren Füllungskennzahlen \bar{f}_{Z_i} .

Die Abbildungen 4.21 und 4.22 stellen für den errechneten Datensatz 9V die Entwicklung der Zyklusmassen und der zyklusbezogenen Streuungen dar. Der systematische Wechsel zwischen einer jeweils schweren und einer jeweils leichten Vorsatzfüllung (Abbildung 4.21) belegt noch einmal die Kompensation der Massendefizite aus der ersten Füllstufe. Die erreichten Werte der mittleren Füllungskennzahlen im Ergebnis der zweiten Füllstufe quantifizieren gleichzeitig die Überfüllung mit Vorsatzmenge. Die Gegenüberstellung der Abbildungen 4.21 und 4.22 zeigt im Gegensatz zum Datensatz

9K keine ausgeprägte Wechselbeziehung zwischen den mittleren Füllungskennzahlen und den Variationskoeffizienten.

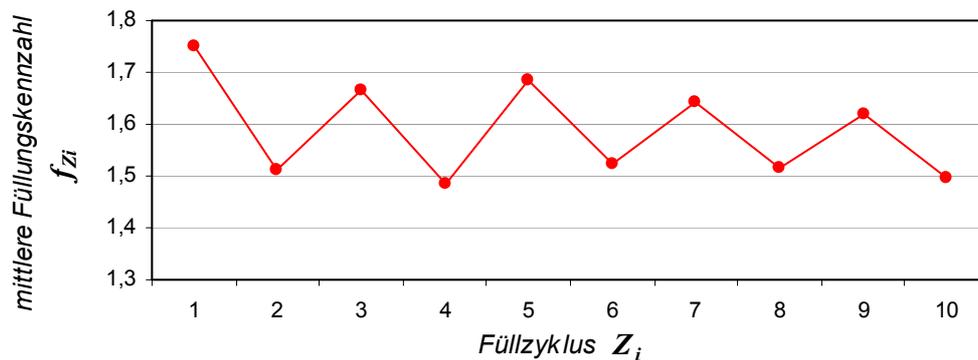


Abbildung 4.21: : Entwicklung der Zyklusmassen ($n_z=10$) des errechneten Datensatzes 9V

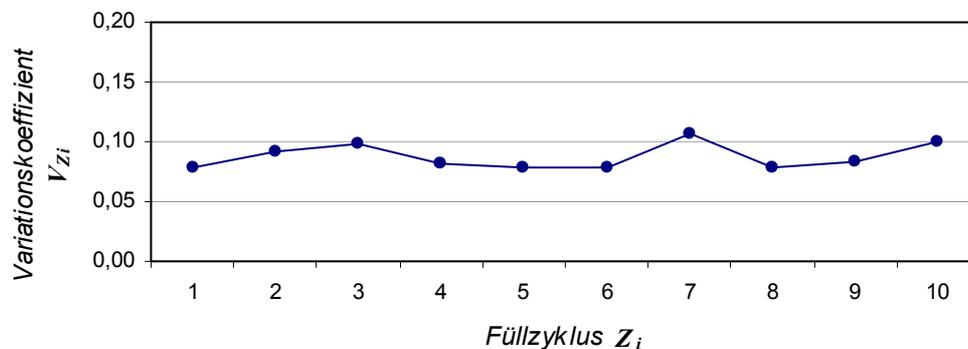


Abbildung 4.22: Entwicklung der zyklusbezogenen Streuung ($n_{PZ}=48$) innerhalb des Datensatzes 9V

4.6.2 Lageparameter und Streuungsmaße

Die statistischen Kennwerte für die ausgewählten Steinformmaschinen 2 und 9 werden bezogen auf die jeweiligen Datensätze "K", "K+V" und "V" in der Tabelle 4.1 zusammengefasst. Daraus gehen folgende Aussagen hervor:

- Das Maximum der Füllungskennzahlen des Datensatzes 2K beträgt $f_{max} = 0,987$. Keine der Proben dieses Datensatzes erreicht somit im Ergebnis der ersten Füllstufe die erforderliche Sollmasse.
- Das Maximum der Füllungskennzahlen des Datensatzes 2K+V steigt zwar gegenüber der ersten Füllstufe auf $f_{max} = 0,994$ an. Trotzdem erreicht auch im Ergebnis beider Füllstufen keine der Proben die Sollmasse.
- Das arithmetische Mittel aller Füllungskennzahlen des errechneten Datensatzes 2V beträgt $f_{mittel} = 1,240$. Dies belegt, dass wegen der Unterfüllung im Ergebnis beider Füllstufen mehr Vorsatz gefüllt wird als vorgesehen.

- Der empirische Median der Füllungskennzahlen des Datensatzes $9K$ beträgt $f_{0,5} = 1,004$. Dies zeigt, dass über die Hälfte aller Proben den anzustrebenden Sollwert erreichen. Die exakte Abfrage der Bedingung $f_i \geq 1$ ergibt, dass 74 % aller ermittelten Füllungskennzahlen des Datensatzes $9K$ größer oder gleich dem anzustrebenden Sollwert sind.
- Das Minimum aller Füllungskennzahlen des Datensatzes $9K+V$ kann gegenüber der ersten Füllstufe von $f_{min} = 0,939$ auf $f_{min} = 1,030$ gesteigert werden. Dies beweist, dass im Ergebnis beider Füllstufen alle Proben des Datensatzes $9K+V$ die Bedingung $f_i \geq 1$ erfüllen.
- Das arithmetische Mittel der Füllungskennzahlen des errechneten Datensatzes $9V$ beträgt $f_{mittel} = 1,589$. Auch an der Steinformmaschine 9 wird also deutlich mehr Vorsatz als vorgesehen gefüllt. Mit dieser Überfüllung gelingt es schlussendlich, die Defizite aus der ersten Füllstufe gegenüber dem Sollwert zu egalisieren, dies zulasten deutlich erhöhter Rohstoffkosten.

Tabelle 4.1: Stichprobenbezogene empirische Kennwerte der Massenverteilungen an den Steinformmaschinen 2 und 9

empirische Kennwerte	Datensätze SFM 2			Datensätze SFM 9		
	2K	2K+V	2V	9K	9K+V	9V
Maximum f_{max}	0,987	0,994	1,952	1,044	1,085	2,041
Minimum f_{min}	0,837	0,935	0,880	0,939	1,030	1,180
Median $f_{0,5}$	0,933	0,961	1,208	1,004	1,053	1,587
Mittelwert f_{mittel}	0,931	0,962	1,240	0,939	1,065	1,589
Sollwert f_{soll}	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Standardabweichung s	0,026	0,010	0,201	0,021	0,011	0,167
Spannweite R	0,150	0,059	1,064	0,105	0,055	0,861
Variationskoeffizient V	0,028	0,010	0,162	0,021	0,010	0,105

Bezüglich der ermittelten Streuungsmaße an den Steinformmaschinen 2 und 9 gehen folgende Aussagen hervor:

- Die an der Steinformmaschine 2 im Ergebnis der ersten Füllstufe erzeugte Streuung der Massen liegt über dem Durchschnitt aller untersuchten Maschinen (Tabelle 4.2).
- Mit der deutlichen Reduzierung aller Streuungsmaße im Ergebnis beider Füllstufen sinken die Streuungsmaße unterhalb der ermittelten Durchschnittswerte (Tabelle 4.3) ab. Der Vergleich beider Füllstufen bekräftigt, dass es mit der Vorsatzfüllung gelungen ist, gegenüber dem Ergebnis der ersten Füllstufe (100 %), die Standardabweichung s auf 39 %, die Spannweite R ebenfalls auf 39 % und den Variationskoeffizient V auf 36 % zu reduzieren.
- Die relativ großen Streuungen im Ergebnis des berechneten Datensatzes $9V$ liegen über den aus der Gesamtheit ermittelten Durchschnittswerten (Tabelle 4.4). Dies kann in den Unsicherheiten der Differenzmethode zur Berechnung der Datensätze "V" begründet sein.

- Die an der Steinformmaschine 9 im Ergebnis der ersten Füllstufe aufgenommene Streuung der Massen entspricht näherungsweise den Durchschnittswerten aller untersuchter Datensätze (Tabelle 4.2).
- Der Vergleich beider Füllstufen an der Steinformmaschine 9 zeigt, dass es mit der Vorsatzfüllung gelungen ist, die Streuungsmaße s , R und V gegenüber der ersten Füllstufe näherungsweise zu halbieren. Mit der Reduzierung aller Streuungsmaße im Ergebnis beider Füllstufen sinken die Streuungsmaße damit ebenfalls deutlich unterhalb der ermittelten Durchschnittswerte (Tabelle 4.3).
- Die Streuungen im Ergebnis des berechneten Datensatzes $9V$ liegen unterhalb des Durchschnittsniveaus aller errechneten Datensätze " V " (Tabelle 4.3).

4.6.3 Ist-Stand-Ergebnisse zur Füllungsgüte aller untersuchten Steinformmaschinen

Eine Übersicht aller im Rahmen der Untersuchungen des industriellen Routinebetriebes ermittelten statistischen Kennwerte wird in den Anlagen 4.1 und 4.2 gegeben.

Füllstufe 1

Die Abbildung 4.23 zeigt alle ermittelten Häufigkeitspolygone aus den Ergebnissen der Füllstufe 1 im Überblick.

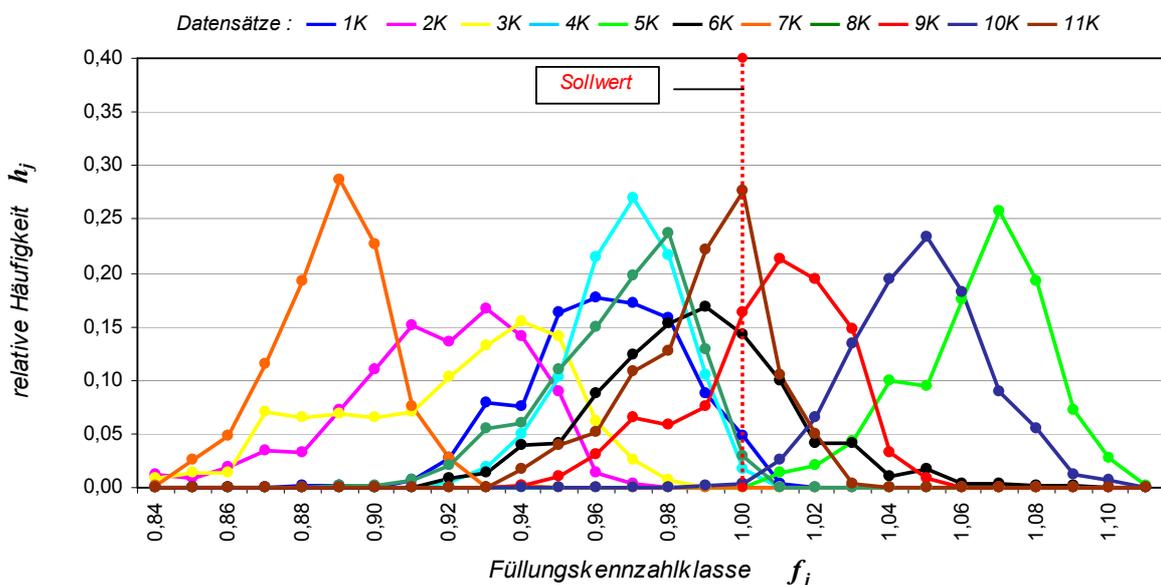


Abbildung 4.23: Vergleich der Häufigkeitspolygone aller Stichproben aus Kernbeton

Zwei Polygone ($9K, 10K$) liegen fast vollständig oberhalb der Sollwertmarke und stellen nahezu für alle Messwerte die Erfüllung der Bedingung $f_i \geq 1$ sicher. Drei Polygone ($6K, 9K, 11K$) liegen mit ihrem Modalwert in unmittelbarer Nähe des Sollwertes. Die Bedingung $f_i \geq 1$ wird jeweils für unterschiedliche Teilmengen der Messwerte sichergestellt. Drei Polygone erreichen näherungsweise mit ihrem oberen 5-% Quantil die Sollwertmarke. Die Bedingung $f_i \geq 1$ wird für nicht mehr als 5 % aller Messwerte erfüllt. Weitere drei Polygone ($2K, 3K, 7K$) liegen selbst mit ihren Maximalwerten deutlich unterhalb der Sollwertmarke $f_{soll} = 1$. Ihr Ergebnis ist deshalb diesbezüglich völlig ungenügend.

Mit der Tabelle 4.2 werden die empirischen Kennwerte aus allen Datensätzen K zusammengefasst. Die errechneten Werte bestätigen die unzureichende Sicherstellung der Sollmasse. So zeigt beispielsweise der über alle Stichproben berechnete mittlere Median mit $\hat{f}_{0,5} = 0,972$ an, dass über die Hälfte aller Messwerte der Studie unterhalb des anzustrebenden Sollwertes liegt.

Tabelle 4.2 Statistische Kenngrößen im Ergebnis der ersten Füllstufe

über alle Datensätze K	empirische Kennwerte der Füllungskennzahlen f aller 11 untersuchten Datensätze Kerbeton						
	f_{mittel}	$f_{0,5}$	f_{max}	f_{min}	s	R	V
Maximum	1,059	1,062	1,102	1,005	0,031	0,165	0,034
Mittelwert	0,970	0,972	1,019	0,908	0,020	0,111	0,021
Minimum	0,883	0,885	0,931	0,833	0,012	0,062	0,012

Betonpflastersteine ohne Vorsatz werden in der Regel ausschließlich unter Anwendung der ersten Füllstufe hergestellt. Die in der Tabelle 4.2 gezeigten Werte können daher einen Ausblick auf das zu erwartende Niveau bei der Produkten mit einstufiger Füllung geben. Zu Beginn des Abschnitts 4 wurde die Zielstellung formuliert, dass die Steinrohndichte maximal um $\pm 2,5\%$ variieren darf [29]. Die maximale Spannweite der Massen von $R_{\text{max}} = 0,165$ (16,5 %) aus allen Datensätzen bildet den oberen Extremwert der Untersuchungen ab, der weit oberhalb der geforderten Schwankungsbreite liegt. Aber auch die minimale Spannweite von $R_{\text{min}} = 0,084$ (8,4%) übersteigt die Anforderungen noch erheblich. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die untersuchten Steinformmaschinen die rohndichtebezogene Forderung von $\pm 2,5\%$ bei einschichtigen Betonsteinen nicht sicherstellen.

Füllstufe 1+2

Die Abbildung 4.24 zeigt alle ermittelten Häufigkeitspolygone aus den Ergebnissen beider Füllstufen im Überblick. Im Resultat beider Füllstufen gelingt es nur an einer von elf untersuchten Steinformmaschinen, den angestrebten Sollwert für alle Messwerte sicherzustellen. Das Polygon (9K+V) liegt auch mit seinem Minimalwert deutlich über der Sollwertmarke $f_{\text{min}} > f_{\text{soll}}$. Wie bereits im Abschnitt 4.6.2 erwähnt, gelang es an der Steinformmaschine 9 mit der zweiten Füllstufe neben der Streubreite auch die Lage der Verteilung zum Sollwert noch einmal deutlich zu verbessern. An den Steinformmaschinen 5 und 10 hingegen hat sich die Lage der Polygone gegenüber dem Sollwert im Ergebnis der Vorsatzfüllung deutlich verschlechtert. Der Vergleich zwischen den beiden Abbildungen 4.23 und 4.24 macht dies sichtbar. Der Vergleich beider Abbildungen verdeutlicht auch, dass im Ergebnis der Vorsatzfüllung alle Polygone (Ausnahme 9K+V) dichter, meist unterhalb der Sollwertmarke zusammenrücken und ein ähnliches Niveau abbilden.

Mit der zweiten Füllstufe können zunächst bei 10 von 11 untersuchten Steinformmaschinen die Streuungsmaße gegenüber der ausschließlichen Kernfüllung signifikant gesenkt werden. Der Vergleich der Kennwerte in den Tabellen 4.2 und 4.3 bestätigt den deutlichen Rückgang der Streuung. So kann die mittlere Standardabweichung von $s = 0,02$ ($\pm 2,0\%$) auf $s = 0,014$ ($\pm 1,4\%$) und die mittlere Spannweite von $R = 0,111$ (11,1 %) auf $R = 0,081$ (8,1 %) gesenkt werden. Betrachtet man noch einmal die eingangs formulierte Forderung nach einer maximal zulässigen Rohdichteschwankung von $\pm 2,5\%$, so wird diese auch bei Betrachtung beider Füllstufen nur durch die Steinformmaschine 9 mit $R \approx 0,042$ (4,2 %) sichergestellt.

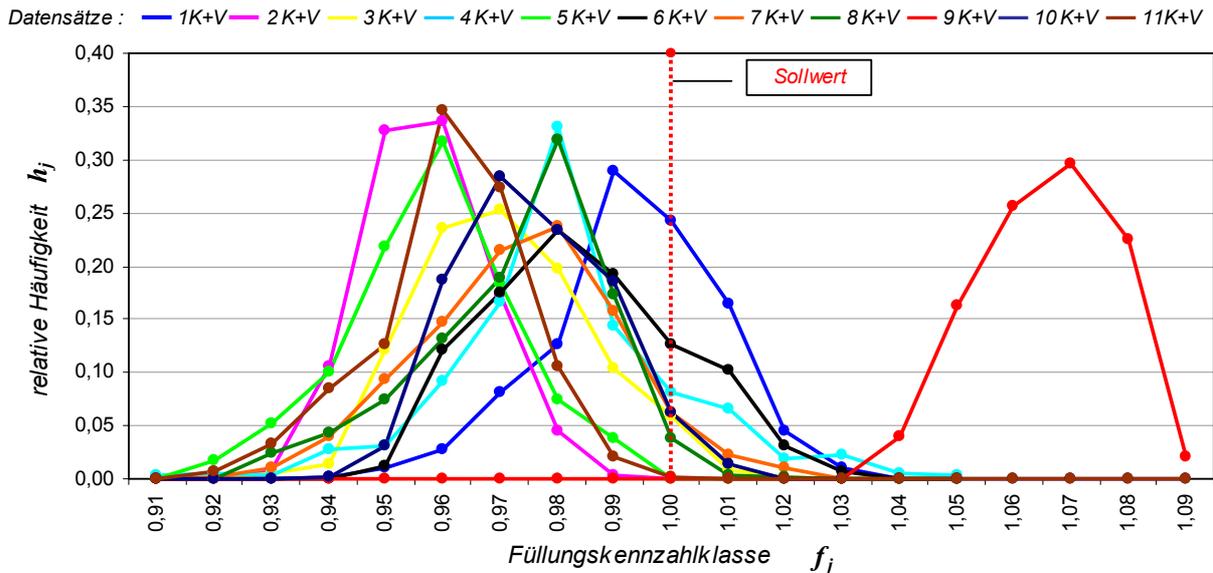


Abbildung 4.24: Vergleich der Häufigkeitspolygone aller Stichproben aus Kern- und Vorsatzbeton

Die in der Tabelle 4.3 gezeigten statistischen Kenngrößen bestätigen, dass mit der Füllung des Vorsatzbetongemenges die Lageparameter geringfügig gegenüber der ausschließlichen Kernfüllung erhöht werden konnten. Trotzdem nimmt beispielsweise der mittlere Median aus allen Datensätzen mit $\bar{f}_{0,5} = 0,991$ immer noch einen Wert unterhalb des Sollwertes ein.

Zusammengefasst ist die im Rahmen der Untersuchungen ermittelte Füllungsgüte als ungenügend zu bewerten. Auffällig ist insbesondere die große Divergenz zwischen den ermittelten Istwerten f_i und dem vorgegebenen Sollwert $f_{soll} = 1$. Setzt man voraus, dass die anzustrebende Steinhöhe als einfach zu messende Größe im industriellen Routinebetrieb sichergestellt wird, so gelingt es mit den gewählten Prozessparametern offensichtlich nicht, je Zyklus ausreichend große Massen m_i gleichmäßig in der Form zu verteilen bzw. diese auf die anzustrebende Packungsdichte zu komprimieren.

Tabelle 4.3: Statistische Kenngrößen im Ergebnis beider Füllstufen

über alle Datensätze K+V	empirische Kennwerte der Füllungskennzahlen f aller 11 untersuchten Datensätze Kern- und Vorsatzbeton						
	f_{mittel}	$f_{0,5}$	f_{max}	f_{min}	s	R	V
Maximum	1,064	1,065	1,085	1,043	0,020	0,141	0,020
Mittelwert	0,991	0,991	1,032	0,952	0,014	0,081	0,021
Minimum	0,956	0,957	0,990	0,911	0,010	0,042	0,009

Füllstufe 2

Die Lage der Häufigkeitspolygone in der Abbildung 4.25 zeigt, dass es bei sechs von elf untersuchten Steinformmaschinen (1V, 2V, 3V, 4V, 6V, 8V) näherungsweise gelingt, die angestrebte Vorsatzmenge einzubringen. Drei Maschinen (7V, 9K, 10V) füllen deutlich mehr als vorgesehen. Zwei von elf Maschinen (5V, 11V) füllen deutlich weniger Vorsatzgemenge als notwendig. Die unzureichende Füllung mit Vorsatz ist beispielsweise bei der Steinformmaschine 5 Ursache für den Abfall der Füllgute im Resultat beider Füllstufen.

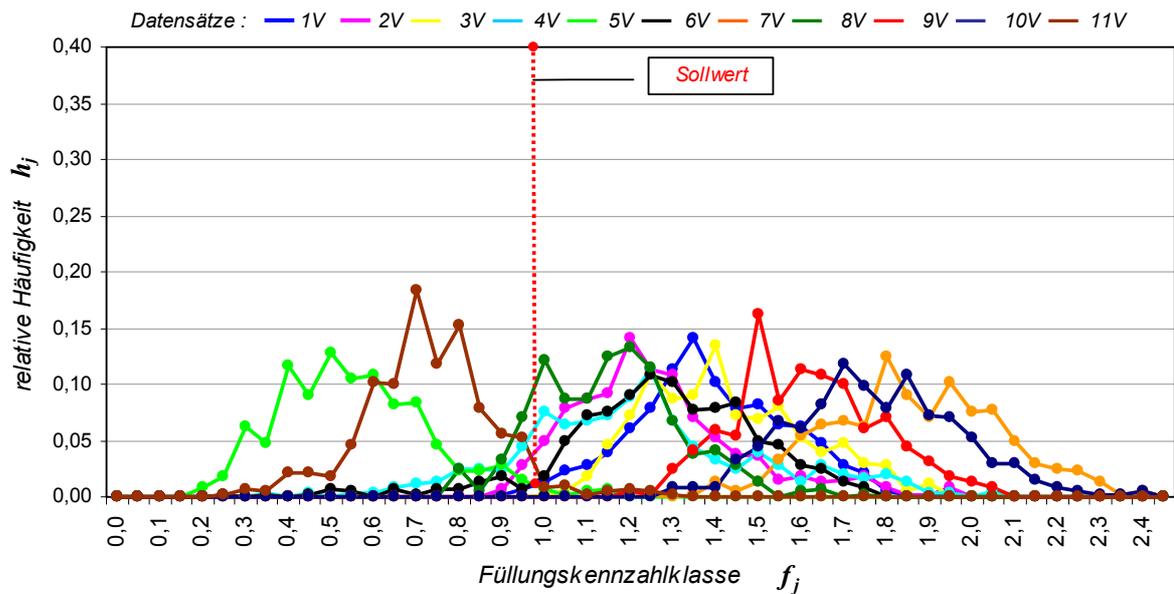


Abbildung 4.25: Vergleich der Häufigkeitspolygone aller Stichproben aus Vorsatzbeton (rechnerisch ermittelt)

Die Vorsatzfüllung stellt etwa nur 10 % Volumenprozent der Gesamtfüllung dar. Trotzdem sind die Streuungsmaße der untersuchten Stichproben, wie in der Tabelle 4.4 zu sehen, etwa um ein Zehnfaches höher als bei der vorausgehenden Kernbetonfüllung. Zu beachten ist, dass sich die Ausgangsbedingungen für die zweite Füllstufe deutlich ungünstiger im Vergleich zur ersten Füllstufe darstellen können. Unterschiedliche Setzmaße in den Formzellen im Ergebnis der ersten Füllstufe erzeugen unterschiedlich große Sekundärfüllräume. Zudem können unterschiedliche Packungsdichten in dem bereits eingefüllten und vorverdichteten Kernbeton das Füllverhalten unter Vibration während der Füllstufe 2 wesentlich beeinflussen. Die Homogenität der zweiten Füllung wird daher immer maßgeblich von der Füllungsgüte der ersten Füllstufe mitbestimmt.

Tabelle 4.4: Statistische Kenngrößen im Ergebnis der zweiten Füllstufe

über alle Datensätze V	empirische Kennwerte der Füllungskennzahlen f aller 11 untersuchten Datensätzen Vorsatzbeton						
	f_{mittel}	$f_{0,5}$	f_{max}	f_{min}	s	R	V
Maximum	2,251	1,834	2,380	1,952	0,253	1,714	0,751
Mittelwert	1,291	1,238	1,806	0,734	0,183	1,072	0,194
Minimum	0,209	0,186	0,757	0,114	0,130	0,643	0,084

4.7 Einfluss der Füllstandsregelung auf die Füllungsgüte

Wie im Abschnitt 4.6.1 beschrieben, zeigt sich nach Auswertung des Datensatzes 9K eine ausgeprägte systematische Schwankung der Füllungsgüte, begründet in der ungenügenden Regelung des Füllstandes im Kernfüllwagen. In Erkenntnis dessen wurde das Regelsystem auf eine vollautomatische lasergestützte Variante umgebaut. Die Abbildung 4.26 zeigt den am Kernbetonfülltrichter befestigten Lasersensor beim Abtasten der Gemengeoberfläche im Kernfüllwagen.



Abbildung 4.26: Lasergestützte Füllstandsmessung und -regelung im Kernfüllwagen der Steinformmaschine 9

Nach dem Umbau wurden die Untersuchungen bei der gleichen Füllaufgabe wiederholt. Daraus geht deutlich hervor, dass mit Hilfe der installierten Mess- und Regelungstechnik das Ergebnis der ersten Füllstufe deutlich verbessert werden kann. Die von Zyklus zu Zyklus gefüllten Massen weisen nur noch geringe Schwankungsbereiten auf. Die Streuung der Massen innerhalb der Zyklen nimmt gleichzeitig signifikant ab.

Die Abbildungen 4.27 und 4.28 stellen die Abfolge der mittleren Füllungskennzahlen \bar{f}_{Z_i} und der Variationskoeffizienten V_{Z_i} vor und nach der Modifikation gegenüber.

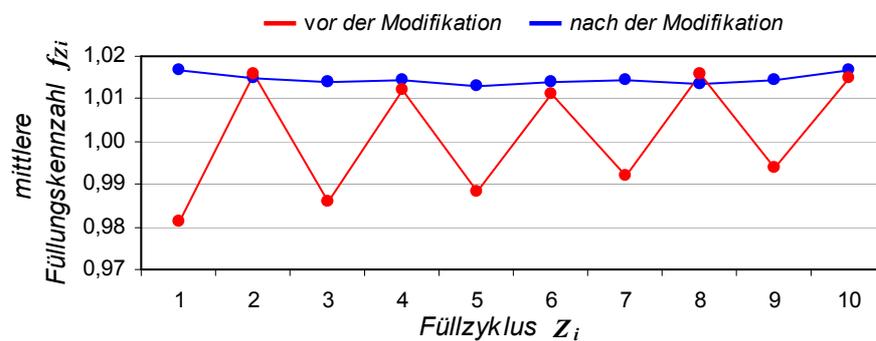


Abbildung 4.27: Vergleich der Zyklusmassen vor (9K) und nach (9.IK) der Modifikation der Füllstandsregelung im Kernfüllwagen

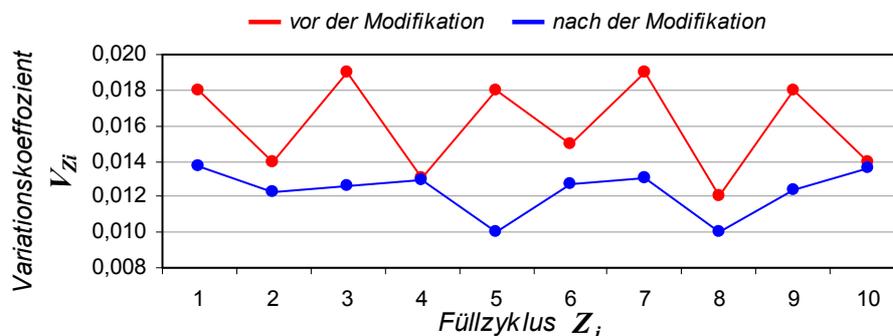


Abbildung 4.28: Vergleich der zyklusbezogenen Streuung vor (9K) und nach (9.IK) der Modifikation der Füllstandsregelung im Kernfüllwagen

Die Vergleichmäßigung des Füllstandes wirkt sich signifikant auf die Güte des Füllprozesses an der Steinformmaschine 9 aus. Insbesondere die Füllungsgüte im Ergebnis der ersten Füllstufe kann deutlich verbessert werden. Der Vergleich der Häufigkeitspolygone in der Abbildung 4.29 zeigt die auffällige Verschiebung des Graphen nach der Modifikation in den Bereich oberhalb der Sollwertmarke sowie die gleichzeitige Reduzierung der Streubreite. Die Gegenüberstellung der Häufigkeitspolygone im Ergebnis beider Füllstufen vor und nach der Modifikation (Abbildung 4.30) lässt insbesondere den Anstieg des Modalwertes $f_{0,5}$ und des Minimalwertes f_{min} erkennen.

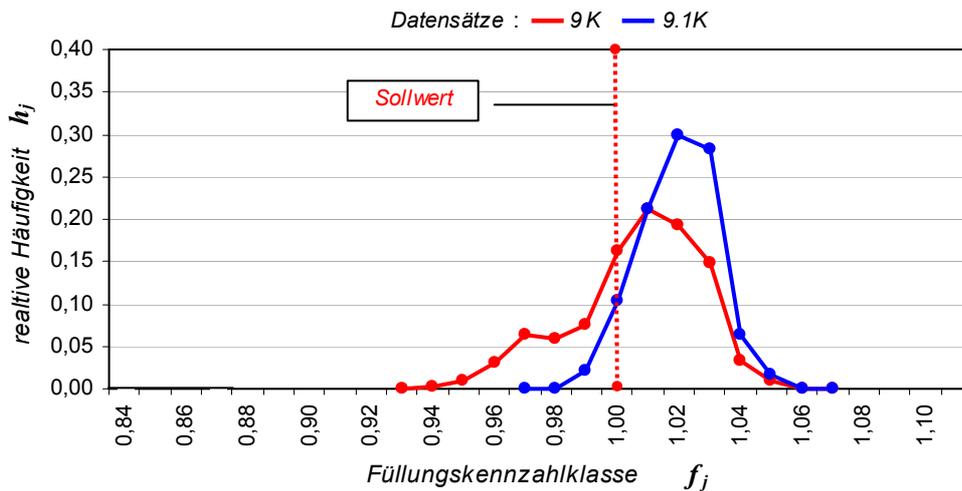


Abbildung 4.29: Vergleich der Häufigkeitspolygone vor (9K) und nach (9.1K) der Modifikation der Füllstandsregelung im Kernfüllwagen – Ergebnis Füllstufe 1

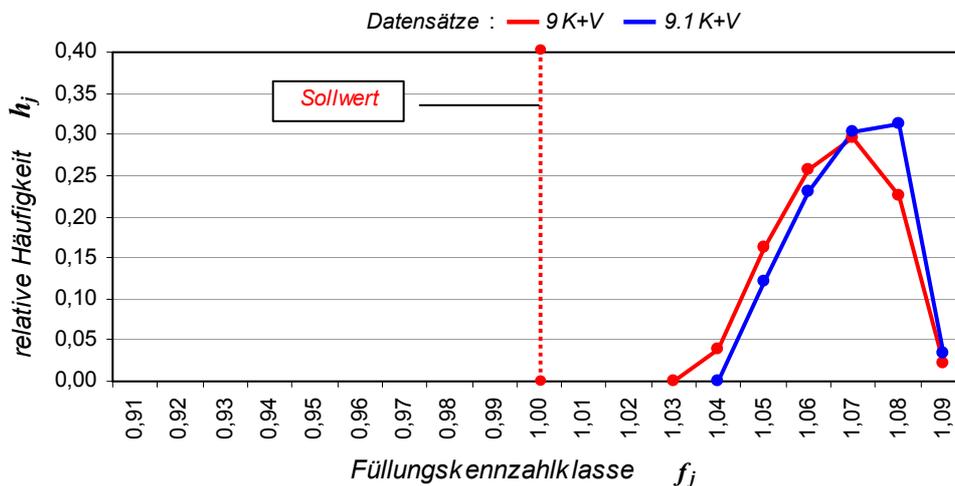


Abbildung 4.30: Vergleich der Häufigkeitspolygone vor (9K) und nach (9.1K) der Modifikation der Füllstandsregelung im Kernfüllwagen – Ergebnis Füllstufen 1 und 2

In der Tabelle 4.5 werden abschließend die empirischen Kennwerte der Verteilungen vor (Datensätze 9) und nach (Datensätze 9.1) der Modifikation gegenübergestellt. Alle nach Umbau der Füllstandsregelung ermittelten Lageparameter sowie Streuungsmaße belegen die Verbesserungen der Füllungsgüte.

Tabelle 4.5: Vergleich der statistischen Kenngrößen vor (9) und nach (9.1) der Modifikation der Füllstandsregelung für den Kernfüllwagen

Daten- sätze	empirische Kennwerte der Füllungskennzahlen f						
	f_{mittel}	$f_{0,5}$	f_{max}	f_{min}	s	R	V
9 K	1,001	1,004	1,044	0,939	0,021	0,105	0,021
9.1 K	1,015	1,017	1,045	0,983	0,011	0,062	0,012
9 K+V	1,060	1,053	1,085	1,030	0,011	0,055	0,010
9.1 K+V	1,064	1,065	1,085	1,043	0,010	0,042	0,009

Mit der Optimierung der Füllstandsregelung konnte beispielsweise der Variationskoeffizient V im Ergebnis der ersten Füllstufe von $0,021$ (2,1 %) auf $0,012$ (1,2 %) näherungsweise halbiert werden. Die ausreichend genaue Regulierung der Füllmenge im Füllwagen von Zyklus zu Zyklus erweist sich als eine wesentliche Voraussetzung für die Minimierung der Massenstreuung innerhalb der zu fertigenden Einheit. Die ermittelten statistischen Parameter stellen den signifikanten Einfluss des Füllstandniveaus im Kernfüllwagen auf die erreichbare Füllungsgüte unter Beweis.

5. Füllungsgüte – Korrelationen und Einflussfaktoren

Nach der Berechnung und Bewertung der Füllungsgüten im industriellen Routinebetrieb werden im vorliegenden Kapitel Korrelationen zwischen den ermittelten Massen und ausgewählten Festbetoneigenschaften der Proben untersucht. Außerdem wird eine Analyse der Einflussgrößen mit dem Ziel vorgenommen, diejenigen zu ermitteln, welche die Masse der Probe signifikant beeinflussen. Von besonderem Interesse sind

- die Wechselbeziehungen zwischen der lagerfeucht bestimmten Masse und den Festbetoneigenschaften der Probe sowie
- die Wechselbeziehungen zwischen der lagerfeucht bestimmten Masse und der Zellen- und Zyklusposition der Probe.

Mit der Quantifizierung der Wechselbeziehungen zwischen der lagerfeucht bestimmten Probemasse und den Festbetoneigenschaften soll die Aussagekraft des Kennwertes m_i für das Prozessergebnis bestätigt werden. Die Betrachtung der räumlichen und zeitlichen Abhängigkeit dient der Feststellung von typischen, systematisch auftretenden Phänomenen. Die angewandten mathematischen Methoden und Ergebnisse dieser Untersuchungen werden ausführlich in [31] beschrieben.

5.1 Wechselbeziehungen zwischen Steinmasse und Festbetoneigenschaften

Wie im Abschnitt 4.5 dargestellt, erfolgt die Verwiegung der Proben für die Bestimmung der Füllungsgüte im lagerfeuchten Zustand. Die Eigenfeuchtigkeit der Proben kann dabei sowohl infolge unterschiedlicher Steinrohdichten als auch in Folge unterschiedlicher Lagerbedingungen variieren. Um die Aussagekraft der empirischen Verteilungsfunktionen zu überprüfen, wird an ausgewählten Datensätzen die Korrelation zwischen den lagerfeucht ermittelten Massen und den Trockenmassen der Proben getestet. Dafür werden die Proben bis zur Massekonstanz getrocknet und erneut verwogen. Darüber hinaus werden alle Proben vermessen und deren Rohdichte berechnet. Um eines der Merkmale zu bestimmen, das die Qualität der Festbetoneigenschaften explizit charakterisiert, werden die Proben nach 28 Tagen auf ihre Festigkeit untersucht. Dafür wird die Druckfestigkeit nach DIN 18501 [32] ermittelt. Die nach DIN EN 1338 [33] aktuell zu bestimmende Spaltzugfestigkeit findet auf Grund der in [34] beschriebenen unzureichenden Korrelation zur Steinrohddichte keine Anwendung.

Im Ergebnis der zusätzlichen Prüfungen liegen die Verteilungen der folgenden Merkmale vor:

- Feuchtmasse,
- Trockenmasse,
- Feuchtigkeit,
- Steinhöhe,
- Rohdichte und
- Druckfestigkeit

Für die Analyse der Korrelation zwischen diesen Merkmalen und den lagerfeuchten Massen bzw. der Wechselbeziehungen untereinander wird die empirische Regression angewendet.

Da die Durchführung verschiedener Korrelationstests voraussetzt, dass der zu untersuchende Datensatz normalverteilte Merkmale aufweist, werden die ausgewählten Stichproben dem des Shapiro-Wilk-Test unterzogen. Anhand des Quotienten

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.1)$$

wird die Nullhypothese überprüft, dass die Stichprobe aus einer Gauß-verteiltern Grundgesamtheit stammt. Ist $W < 0,05$, wird die Normalverteilungshypothese abgelehnt.

Zur Darstellung des funktionalen Zusammenhanges zwischen zwei Merkmalen wird jeweils die Regressionsgerade berechnet. Das Maß für die Wechselbeziehung zwischen zwei Merkmalen ist der empirische Korrelationskoeffizient ρ . Er berechnet sich nach

$$\rho_{(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.2)$$

als Quotient aus der Kovarianz $cov(X,Y)$ und der Wurzel aus dem Produkt der Varianzen $var(X)$ und $var(Y)$. ρ ist eine Zahl mit einem Wert zwischen -1 und 1 . Je näher ihr Absolutwert bei 1 liegt, desto stärker ist die Korrelation; für $\rho = 0$ sind die beiden Größen unkorreliert [35].

Für die umfassenden Berechnungen wurde das Auswerteprogramm "R" genutzt. Dieses Programm ist eine für die statistische Datenanalyse entwickelte freie Software. Das Programm bietet Schnittstellen zu diverser Software, so auch zu MS Office. Die Editierung der in der Produktion ermittelten Daten ist damit problemlos möglich. Mehr Informationen zu dieser Software stehen unter <http://r-project.org/> zur Verfügung.

Die Resultate der Korrelationstests werden im Folgenden am Beispiel der Stichprobe $10K+V$ beschrieben. Dazu werden die Ergebnisse der Tests jeweils in einer Korrelationsmatrix und in einer sogenannten Scatterplot-Matrix gegenübergestellt. Die Korrelationsmatrix zeigt die errechneten Korrelationskoeffizienten in Zuordnung zu den Merkmalspaaren (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1:

Matrix zur Beschreibung der Korrelation zwischen den Merkmalen der Stichprobe $10K+V$ mit $n=48$ (Quelle:[32])

Merkmal	Festigkeit	Feuchtigkeit	Masse lagerfeucht	Masse trocken	Rohdichte	Steinhöhe
Festigkeit	1,000	-0,137	0,253	0,271	0,5431	-0,171
Feuchtigkeit	-0,137	1,000	-0,010	-0,171	-0,309	0,066
Masse lagerfeucht	0,253	-0,010	1,000	0,987	0,788	0,768
Masse trocken	0,271	-0,171	0,987	1,000	0,819	0,781
Rohdichte	0,543	-0,309	0,788	0,819	1,000	0,230
Steinhöhe	-0,171	0,066	0,768	0,781	0,230	1,000

Die Anzahl der Proben zur Untersuchung der Wechselbeziehungen wurde dabei zunächst auf 48 Messwerte je Merkmal begrenzt.

Die Scatterplot-Matrix bildet gegenüberstellend die Streudiagramme mit den Regressionsgeraden aller Merkmalspaare ab. Die Abbildung 5.1 zeigt eine Scatterplot-Matrix für die Datensätze der Stichprobe $10K+V$.

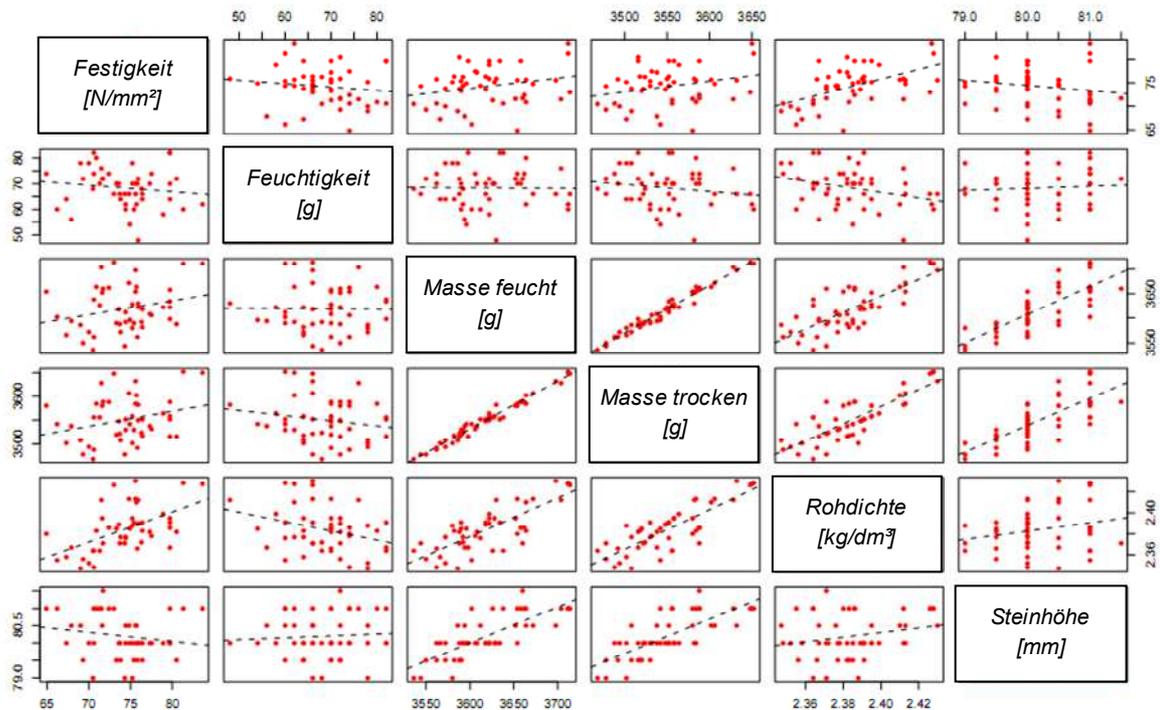


Abbildung 5.1: Scatterplot-Matrix der Stichprobe $10K+V$ mit $n=48$ (Quelle:[32])

Im Ergebnis der Analysen der ausgewählten 48 Messwerte können auf Grund der errechneten Korrelationskoeffizienten (Tabelle 5.1) die Wechselbeziehungen zwischen den Merkmalen wie folgt interpretiert werden:

- Zwischen der lagerfeucht ermittelten Masse und der trocken ermittelten Masse der Proben besteht eine sehr stark ausgeprägte Abhängigkeit.
- Ebenfalls stark positiv korreliert sind die lagerfeucht bestimmte Masse und die Rohdichte der Probe.
- Stark positiv korreliert sind die lagerfeucht bestimmte Masse und die Höhe der Proben.
- Schwach positiv korreliert sind die lagerfeucht bestimmte Masse und die Druckfestigkeit der Proben.
- Schwach negativ korreliert sind die lagerfeucht bestimmte Masse und die Feuchtigkeit der Proben.

Die Vermutung, dass die Lagerfeuchtigkeit der Proben die empirische Verteilungsfunktion der Steinmassen wesentlich manipulieren könnte, hat sich nicht bestätigt. Bei allen untersuchten Merkmalspaaren, Masse - lagerfeucht und Masse - trocken, erreichen die Korrelationskoeffizienten einen Wert von $\rho \geq 0,980$.

Die schwache Korrelation zwischen der lagerfeucht ermittelten Masse und der Druckfestigkeit der Proben ($\rho = 0,253$) stellt die Wechselbeziehung zwischen der

Massenverteilung und der Verteilung der Festbetoneigenschaften zunächst in Frage. Um mehr Sicherheit für den Korrelationstest zu erlangen, wurde der Stichprobenumfang zur Bestimmung der Druckfestigkeit erhöht. Dazu wurde zunächst die Druckfestigkeit aller Proben des Datensatzes ermittelt. Im Ergebnis dessen konnten die jeweils 480 lagerfeucht ermittelten Massen den 480 ermittelten Druckfestigkeiten gegenübergestellt werden. Erneut gegenübergestellt werden auch die lagerfeucht ermittelten Massen und die Rohdichten aller Proben.

Die Korrelationsmatrix in Tabelle 5.2 zeigt alle Korrelationskoeffizienten im Ergebnis der erweiterten Prüfung. Im Resultat des erneuten Tests steigt der Korrelationskoeffizient Masse lagerfeucht – Steindruckfestigkeit deutlich von $\rho = 0,253$ (für $n=48$) auf $\rho = 0,740$ (für $n=480$) an. Der Korrelationskoeffizient Masse lagerfeucht – Steinrohichte hingegen zeigt mit $\rho = 0,788$ (für $n=48$) und $\rho = 0,762$ (für $n=480$) keine signifikante Veränderung mit der Erhöhung des Stichprobenumfanges an.

Tabelle 5.2: Korrelationsmatrix für die Merkmale lagerfeuchte Masse, Rohdichte und Druckfestigkeit der Stichprobe 10K+V mit $n=480$

Merkmal	Festigkeit	Masse lagerfeucht	Rohdichte
Festigkeit	1,000	0,740	0,813
Masse lagerfeucht	0,740	1,000	0,762
Rohdichte	0,813	0,762	1,000

Mit den Ergebnissen der durchgeführten Korrelationstests wird unter Beweis gestellt, dass die unter Einschluss der Lagerfeuchtigkeit ermittelten Massen m_i sehr stark mit den Massen der getrockneten Proben korrelieren. Darüber hinaus wird bewiesen, dass zwischen den lagerfeucht ermittelten Massen und den Festbetoneigenschaften Rohdichte und Druckfestigkeit eine ausgeprägte Korrelation vorhanden ist. Die an einer Steinformmaschine auf der Grundlage der im Kapitel 3 beschriebenen Methode ermittelte Füllungsgüte kann daher als ein Indikator für die erreichte Qualität der erzeugten Betonsteine betrachtet werden.

5.2 Einflussfaktoren auf die Verteilung der Steinmassen

Der Einfluss auf die Verteilung der Steinmassen wird mit Hilfe der Varianzanalyse (ANOVA Analysis of Variance) untersucht. Die Varianzanalyse ist ein Verfahren der mathematischen Statistik zur quantitativen Untersuchung von Einflussfaktoren auf Merkmalsverteilungen.

Die Verfahren der Varianzanalyse beruhen auf der in der Tabelle 5.3 dargestellten additiven Zerlegung der Summe der quadratischen Abweichungen der Beobachtungswerte von ihrem Mittelwert. Eine der Teilsummen, die so genannte Reststreuung, erfasst die nicht erklärten Abweichungen als zufällige oder Störfaktoren. Die restlichen Teilsummen erfassen den Einfluss je eines Faktors oder deren Wechselwirkungen als erklärte Abweichung untereinander.

Tabelle 5.3: Streuungszerlegung zur Ermittlung der Abweichungsquadrate

Gesamtabweichung	=	Erklärte Abweichung	+	Nicht erklärte Abweichung (Reststreuung)
Summe der quadratischen Gesamtabweichung (<u>s</u> um of <u>s</u> quares)	=	Summe der quadratischen Abweichungen zwischen (between) den Faktoren	+	Summe der quadratischen Abweichungen innerhalb (within) den Faktoren
$SS_{t(otal)}$	=	$SS_{b(etween)}$	+	$SS_{w(ithin)}$
$\sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j (x_{ij} - \bar{x}_g)^2$	=	$\sum_{i=1}^i j(x_j - \bar{x}_g)^2$	+	$\sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$

Für die Auswertung der Einflüsse auf die empirische Massenverteilung werden zellenbezogenen Mittelwerte \bar{m}_{Ze} gebildet und dem Mittelwert der gesamten Stichprobe \bar{m} gegenübergestellt. Die Gesamtabweichung wird nach dem in der Abbildung 5.2 gezeigten Schema zerlegt.

**Abbildung 5.2:** Streuungszerlegung zur Berechnung der Variationsursache

Es ergibt sich die vereinfacht dargestellte Gleichung mit 5 Teilsummen

$$SS_t = SS_{Zeile} + SS_{Spalte} + SS_{Zeile*Spalte} + SS_{Zyklus} + SS_w. \quad (5.3)$$

Die Zeilenlage (SS_{Zeile}) innerhalb der zu fertigenden Einheit quantifiziert den Einfluss der Zellenposition senkrecht zur Fertigungsrichtung auf die erreichte Masse m_i . Die Spaltenlage (SS_{Spalte}) innerhalb der zu fertigenden Einheit quantifiziert den Einfluss der Zellenposition parallel zur Fertigungsrichtung auf die erreichte Masse m_i . Die Wechselwirkung zwischen Zeilen- und Spaltenlage ($SS_{Zeile*Spalte}$) quantifiziert den Einfluss der Kombination aus Zeilen- und Spaltenlage auf die gefüllte Masse m_i . Die Zyklusfolge (SS_{Zyklus}) quantifiziert den Einfluss der Zyklusmasse m_Z auf die erreichte Masse m_i . Die Reststreuung (SS_w) quantifiziert den Einfluss anderer nicht berücksichtigter Faktoren auf die erreichte Masse m_i .

In [31] erfolgt eine umfassende Varianzanalyse nach Streuungszerlegung der im Rahmen der Studie erzeugten Datensätze. Für eine zusammenfassende Einschätzung werden im Folgenden die Mittelwerte der 5 untersuchten Einflussfaktoren über alle Datensätze K und $K+V$ errechnet und in den Diagrammen der Abbildung 5.3 (Füllstufe 1) und der Abbildung 5.4 (Füllstufe 1+2) gegenübergestellt.

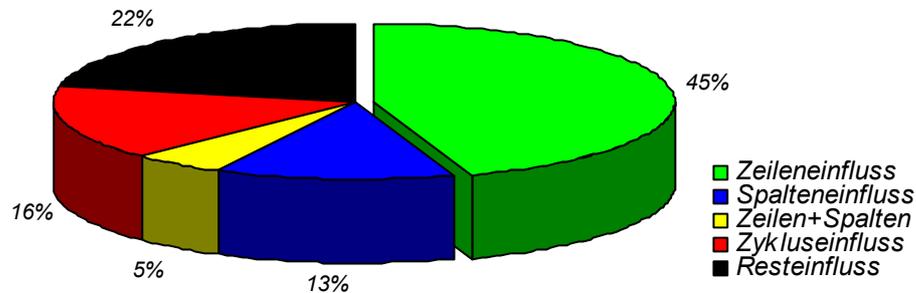


Abbildung 5.3: Streuungszerlegung nach berechneter Variationsursache für die Mittelwerte über alle untersuchten Datensätze im Ergebnis der ersten Füllstufe

Für die erste Füllstufe ergibt sich folgende Rangfolge der Einflussfaktoren auf die Massen der Proben m_i :

- | | | |
|----|---|-------|
| 1) | Zeileneinfluss mit durchschnittlich | 45 %; |
| 2) | Resteinfluss mit durchschnittlich | 22 %; |
| 3) | Zykluseinfluss mit durchschnittlich | 15 %; |
| 4) | Spalteneinfluss mit durchschnittlich | 13 %; |
| 5) | Wechselwirkung zwischen Zeile und Spalte mit durchschnittlich | 5 %. |

Der Einfluss der Zellenlage innerhalb der zu fertigenden Einheit (Zeilen- und Spalteneinfluss sowie die Wechselwirkung zwischen Zeilen- und Spalteneinfluss) nimmt einen Wert von insgesamt **63 %** an.

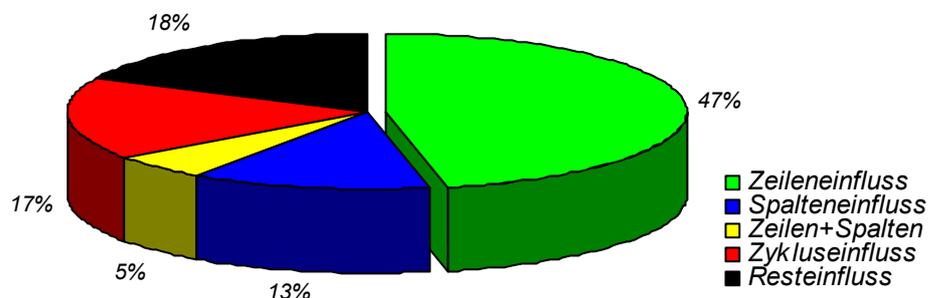


Abbildung 5.4: Streuungszerlegung nach berechneter Variationsursache für die Mittelwerte über alle untersuchten Datensätze im Ergebnis beider Füllstufen

Werden beide Füllstufen betrachtet, ergibt sich im Vergleich zur ersten Füllstufe eine geringfügige Erhöhung von Zeileneinfluss und Zykluseinfluss. Der Einfluss der nicht erklärten Abweichung (Resteinfluss) nimmt ab. Der Spalteneinfluss und der Einfluss aus der Wechselwirkung zwischen Zeilen- und Spaltenlage bleiben gegenüber der ersten Füllstufe unverändert. Es ergibt sich folgende Rangfolge der Einflussfaktoren auf die Massen der Proben m_i :

- | | | |
|----|--|-------|
| 1. | Zeileneinfluss mit durchschnittlich | 47 %; |
| 2. | Resteinfluss mit durchschnittlich | 18 %; |
| 3. | Zykluseinfluss mit durchschnittlich | 17 %; |
| 4. | Spalteneinfluss mit durchschnittlich | 13 %; |
| 5. | Wechselwirkung zwischen Zeile und Spalte
mit durchschnittlich | 5 %. |

Der Einfluss der Zellenlage innerhalb der zu fertigenden Einheit (Zeilen- und Spalteneinfluss sowie die Wechselwirkung zwischen Zeilen- und Spalteneinfluss) nimmt einen Wert von insgesamt **65 %** an.

Die Lage der Zelle innerhalb der Fertigungseinheit übt folglich im Ergebnis beider Füllstufen einen exponierten Einfluss auf die erreichbare Masse in der Zelle m_i aus. Der Einfluss der Zeilenlage hat dabei mit fast 50 % die mit Abstand größte Wertigkeit. Dies stellt die im Kapitel 4 detektierten Massenabfälle in Fertigungsrichtung noch einmal mathematisch unter Beweis. Die in der Kinematik des Füllwagens begründete Inhomogenität der Füllung bedarf besonderer Aufmerksamkeit bei der weiteren Analyse des Füllprozesses. Das folgende Kapitel wird daher Bewegungsabläufe und Phänomene während des Füllprozesses für eine erste Modellbildung analysieren.

5.3 Nachweis von Zykluseffekten

Der in Abschnitt 4.7 untersuchte Einfluss der Zyklusmasse auf die Füllungsgüte wird ebenfalls einer Varianzanalyse nach Streuungszerlegung unterzogen. In Auswertung der Stichproben an der Steinformmaschine 9 vor und nach der Modifikation der Füllstandsregelung wurden entsprechende Varianzanalysen durchgeführt. Die Abbildungen 5.5 (vor der Modifikation) und 5.6 (nach der Modifikation) stellen die Entwicklung des Zykluseinflusses auf die Massen m_i dar.

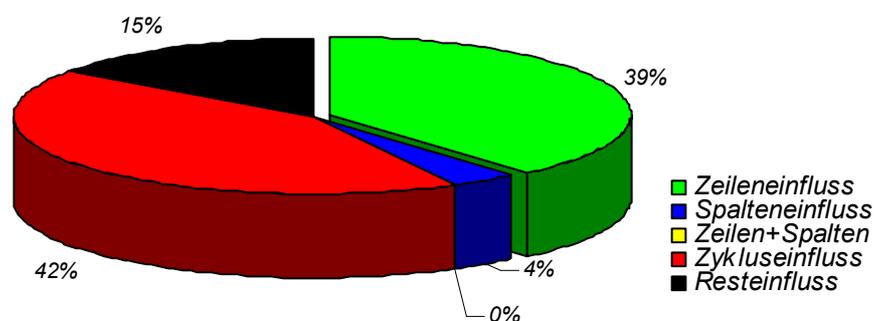


Abbildung 5.5: Streuungszerlegung nach berechneter Variationsursache für den Datensatz 9K nach der Modifikation der Füllstandsregelung am Kernfüllwagen

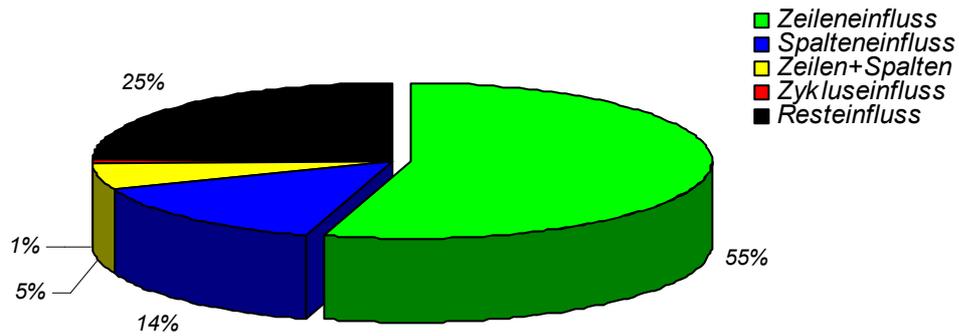


Abbildung 5.6: Streuungszерlegung nach berechneter Variationsursache für den Datensatz 9.1 K nach der Modifikation der Füllstandsregelung am Kernfüllwagen

Mit dem Vergleich der beiden Kreisdiagramme wird der deutliche Rückgang des Zykluseinflusses von 42 % auf 1 % quantifiziert. Nach der Modifikation des Füllvorganges zeigt sich auch an dieser Steinformmaschine die Dominanz des Zelleneinflusses. Der Zelleneinfluss (Zeileneinfluss, Spalteneinfluss und Wechselbeziehung zwischen Zeilen- und Spalteneinfluss) nimmt einen Wert von 74 % an.

6. Analyse des Füllprozesses und erste Modellbildung

Die Füllung der Form mit Betongemenge ist ein äußerst komplexer dynamischer Prozess mit einer Vielzahl von maschinentechnischen und stofflichen Einflussgrößen. Einerseits wirken die Elemente der Füllausrüstung auf das im Füllraum zu verteilende Gemenge. Andererseits beeinflussen Kornzusammensetzung, Kornoberfläche, Kornform und Feuchtigkeit sowie Betonzusatzmittel die rheologischen Eigenschaften des einzufüllenden Betongemenges.

Die Bedingungen während der Füllung verändern sich fortwährend. Die zunehmende Masse und Dichte im Füllraum, die dadurch bewirkte Abnahme der Masse im Transportraum sowie die Bewegungsfunktion des Füllwagens lassen die Einwirkungskenngrößen variieren. In Abhängigkeit von der zu realisierenden Füllaufgabe ergeben sich unterschiedliche Reibungsverhältnisse und Barrieren im zu füllenden Raum. Bei mehreren Füllstufen ist darüber hinaus die Ausgangssituation im Füllraum von der ersten Stufe zur zweiten Stufe sehr unterschiedlich.

Das vorliegende Kapitel hat das Ziel, die Vielzahl der Einflussgrößen systematisch zu erfassen und zu strukturieren. Darüber hinaus werden einige während der Füllung auftretende Phänomene beschrieben und ein erster, stark vereinfachter Modellansatz entwickelt. Auf Grund der Komplexität konzentrieren sich die Untersuchungen zunächst ausschließlich auf die Füllstufe 1.

6.1 Einflüsse auf den Füllprozess

Zur Beschreibung und Klassifizierung der Einflussgrößen werden jeweils eine maschinentechnische und eine technologische Betrachtungsweise herangezogen. Beide Betrachtungsweisen strukturieren Einflüsse nach unterschiedlichen Schemata. Im Ergebnis werden für einen zusammenfassenden Überblick beide Schemata in der Anlage 6.1 mit einander verbunden.

6.1.1 Maschinentechnische Betrachtung

In [37] werden Einflüsse und Einflussgrößen auf die Formgebung und Verdichtung bei der Herstellung von Betonwaren beschrieben und strukturiert. Dabei werden 4 Klassen gebildet,

- Maschinentechnische Einflussgrößen,
- Bewegungskenngrößen der Arbeitsmassen,
- Einwirkungskenngrößen,
- Interne Verdichtungskenngrößen,

die die Einflüsse nach ihrem Wirkungsbereich im Prozessraum der Steinformmaschine differenzieren. Diese Systematik ist ursprünglich auf die Beschreibung des schwingungstechnischen Verhaltens der Steinformmaschine als Mehrmassensystem ausgerichtet. Das zu verdichtende Betongemenge wird dabei mit seiner Masse, Federsteifigkeit und Dämpfung als ein Element im Schwingungssystem der Steinformmaschine betrachtet [13].

Dieses Schema ist grundsätzlich auch für die Klassifizierung der Einflüsse und Kenngrößen der beiden anderen Phasen des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses geeignet. Es bedarf aber einer Modifizierung, was den Bereich und zum Teil auch den Mechanismus der Wirkungen angeht. In der Abbildung 6.1 sind die vier

Wirkungskategorien für den Füllprozess mit entsprechend farblicher Zuordnung dargestellt.

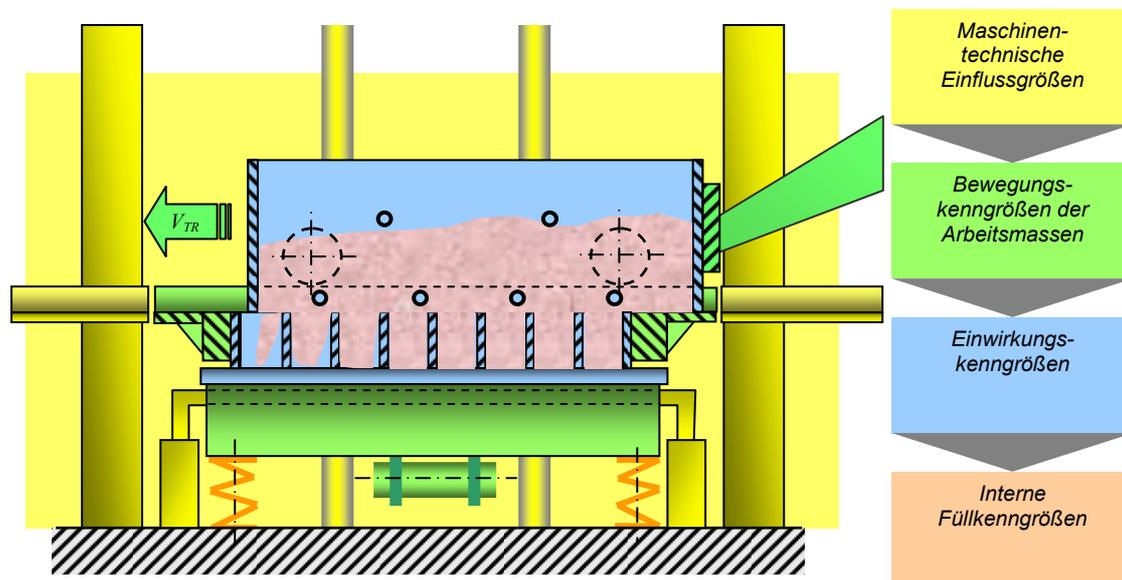


Abbildung 6.1: Wirkungsbereiche der Kenngrößenklassen während der Füllung

Die einzelnen Kategorien umfassen folgende Vorgänge und Kenngrößen:

- Maschinentechnische Einflussgrößen sind alle Parameter, die das Bewegungsverhalten der Füllereinrichtung beeinflussen. Diese sind beispielsweise Massen, Steifigkeiten, Dämpfungen, Verspannkraften, Kolbenstangenkräfte und Erregerkräfte.
- Als Arbeitsmassen werden alle in Bewegung versetzten Elemente und Baugruppen der Füllereinrichtung bezeichnet. Diese sind Füllwagen, Schüttelrost und Abstreifer. Wird die Füllung durch Vibration unterstützt, sind dies zusätzlich auch Schwingtisch, Fertigungsunterlage und Formunterteil. Die Bewegungskenngrößen der Arbeitsmassen werden durch Größe, Zeitverlauf und Frequenzspektrum beschrieben.
- Die Einwirkungskenngrößen sind Bewegungs- und Spannungsgrößen in der Randzone des Betongemenges, also an der Schnittstelle zwischen Beton und Maschine. Schnittstellen sind im Transportraum die Innenwände des Füllkastens, die Abstreifkante des Füllkastens und die Oberfläche des Schüttelrosts. Die Schnittstellen im Füllraum werden durch die Oberfläche der Fertigungsunterlage und durch die Oberfläche im Formeinsatz gebildet.
- Die Internen Füllkenngrößen beschreiben einerseits die Spannungen und Bewegungsgrößen innerhalb des in den Füllraum einfließenden Betongemenges. Andererseits quantifizieren sie den erreichten Füllungsgrad im Füllraum.

6.1.2 Technologische Betrachtung

Abgeleitet aus den bisherigen Ergebnissen der Untersuchungen zur Füllung der Form mit Betongemenge werden Verlauf und Ergebnis des Prozesses im Wesentlichen durch

- die Geometrie- und Massenverhältnisse im Transport- und Füllraum,
- die Eigenschaften des einzubringenden Betongemenges und
- die auf das Betongemenge einwirkenden Interaktionen der Füllrüstung

bestimmt. Im Gegensatz zu der unter 6.1.1 beschriebenen Betrachtungsweise werden die Einflussgrößen nach Stoff und Maschine getrennt. Darüber hinaus werden Kennzahlen zur Beschreibung der Größenverhältnisse im Prozessraum als wichtige Einflussfaktoren eingeführt.

Die Geometrie - und Massenverhältnisse im Prozessraum werden durch die Konstruktion des Formunterteils und des Füllkastens bestimmt. Die Definition erfolgt durch die transport- und füllraumbezogenen Flächen-, Volumen- und Massenkennzahlen. Die Eigenschaften des einzubringenden Betongemenges werden durch stoffliche Einflussgrößen beschrieben. Die Interaktionen der Elemente der Füllrüstung werden durch die maschinentechnischen Einflussgrößen sowie durch die Aktionsfolge und Aktionsdauer der Elemente charakterisiert.

6.1.2.1 Flächen-, Volumen- und Massenkenngrößen

Die Oberfläche innerhalb des zu füllenden Raumes kann je nach Füllaufgabe unterschiedlich groß sein. Ebenfalls unterschiedlich können die Größenverhältnisse zwischen dem zu füllenden Volumen der Form und dem Transportvolumen des Füllkastens sein. Unterschiedliche Reibungs- und Druckverhältnisse, welche Verlauf und Ergebnis des Füllens maßgeblich beeinflussen, stehen im Ergebnis. Zur Quantifizierung der unterschiedlichen Gegebenheiten werden folgende Kennzahlen genutzt:

Die *Füllraumkennzahl* [m^{-1}] quantifiziert das Verhältnis zwischen der Oberfläche im Füllraum A_{FR} und dem Volumen des Füllraumes V_{FR} mit dem Quotienten aus A_{FR}/V_{FR} . Je größer der Quotient A_{FR}/V_{FR} ist, umso mehr Reibung und Adhäsion wirkt zwischen Gemenge und Oberfläche des zu füllenden Raumes. Im Abschnitt 2.3.1 werden unterschiedliche Füllaufgaben und Füllraumkennzahlen gegenüber gestellt. Die Dauer des Füllprozesses steigt im Regelfall mit der Größe der Füllkennzahl an.

Die *Transportmassenkennzahl* quantifiziert das Verhältnis zwischen der zu transportierenden Betonmasse im Füllkasten, im Folgenden als Transportmasse m_{TR} bezeichnet, und der je Zyklus in den Füllraum einzubringen Betonsollmasse m_{Zsoll} mit dem Quotienten aus m_{TR}/m_{Zsoll} . Die in [14] beschriebenen Untersuchungen haben gezeigt, dass während der ersten Füllstufe bei der Herstellung von Rechtecksteinen die Transportmassenkennzahl je nach Steinformmaschine Werte von 4 bis 7 einnehmen kann. Während der zweiten Füllstufe werden Werte zwischen näherungsweise 10 bis 20 erreicht. Unterschiedliche Transportmassenkennzahlen werden auch durch von Zyklus zu Zyklus variierende Füllstände im Füllkasten erzeugt. Diese beeinflussen die Druckverhältnisse im Transportraum und im Füllraum. Die im Kapitel 5 beschriebenen Ergebnisse der Varianzanalyse weisen einen signifikanten Einfluss der Transportmasse m_{TR} auf die Güte der Füllung nach. Die Abbildung 6.2 zeigt zwei Beispiele mit unterschiedlichem Füllungsgrad im Kernfüllwagen bei gleicher Füllaufgabe. Die unterschiedlichen Druckverhältnisse im Füllwagen werden den Verlauf und das Ergebnis der Füllung beeinflussen.

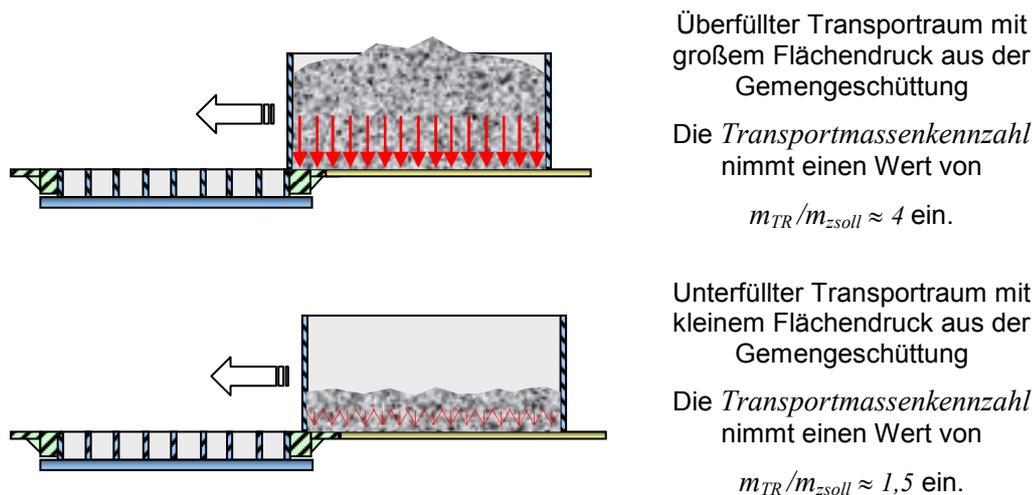


Abbildung 6.2: Beispiele unterschiedlicher Transportmassenkennzahlen bei gleicher Füllaufgabe

Die *Füllflächenkennzahl* quantifiziert das Verhältnis zwischen der Grundfläche des Füllkastens, im Folgenden als Grundfläche des Transportraumes A_{TR} bezeichnet, und der Grundfläche des zu füllenden Raumes A_{FR} mit dem Quotienten aus A_{TR}/A_{FR} . Die Füllflächenkennzahl beeinflusst die Druckverhältnisse im Transportraum und im Füllraum sowie die Größe der Scherfläche zwischen dem Gemenge im Füllraum und dem Gemenge im Transportraum. Die Abbildungen in der Tabelle 6.1 stellen vier unterschiedliche Varianten gegenüber. Die schematischen Darstellungen zeigen Füllwagen (ohne Schüttelrost) und Formunterteil in einer vereinfachten Draufsicht.

Füllwagen mit im Vergleich zum Formeinsatz kleinerer Grundfläche können den Füllraum während der Füllung nicht permanent überdecken. Für Füllaufgaben mit großer, je Zyklus zu füllender Betonmasse sind Füllwagen dieser Art auf Grund ihres geringen Transportraumes nur bedingt geeignet.

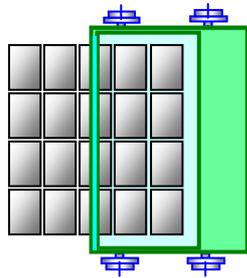
Füllwagen mit gleichflächigem Füllkasten bilden den Standardfall in der Produktion ab. Länge und Breite des Füllkastens werden an der Fläche der verwendeten Unterlagsbretter ausgerichtet. Die Höhe des Füllkastens wird so gewählt, dass für alle Füllaufgaben ein ausreichendes Volumen sichergestellt werden kann.

Die Überflächigkeit des Füllkastens ergibt sich bei Füllaufgaben mit sehr kleiner Grundfläche. Bei stark überflächigem Füllkasten ist kein kontinuierlicher Masseabzug aus den kritischen, farbig gekennzeichneten Zonen des Füllkastens gegeben. Teilmassen des Betongemenges verweilen über viele Fertigungszyklen im Transportraum und können bedingt durch die fortschreitende Hydratation nicht mehr ausreichend verarbeitet werden. Störungen des Betongefüges stehen im Ergebnis.

Ist eine überflächige Konfiguration für die Produktion nicht zu vermeiden, empfiehlt sich der Einbau von trichterförmigen Leitblechen zur Ausfüllung bzw. Überbrückung der kritischen Zonen.

Der Füllwagen mit einer variablen Füllkastenrückwand ist das Ergebnis neuester Forschungen [48]. In der Grundstellung der Steinformmaschine ist der Füllkasten zunächst gleichflächig. Mit der fortschreitenden Fahrt des Füllwagens zum vorderen Umkehrpunkt wird die Rückwand des Füllkastens hydraulisch zusätzlich in Fahrtrichtung geschoben. So wird die Grundfläche des Füllkastens zunehmend reduziert.

Tabelle 6.1: Flächenverhältnisse zwischen der Grundfläche des Füllkastens (Transportraum) und der Grundfläche des Füllraumes

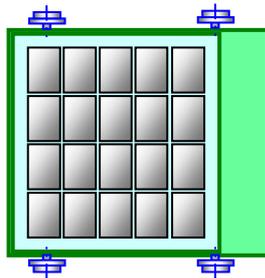


Füllwagen mit unterflächigem Füllkasten

Die Länge des Transportraumes ist deutlich kleiner als die Länge des Füllraumes.

Die Breite des Transportraumes muss in jedem Fall größer sein als die Breite des Füllraumes.

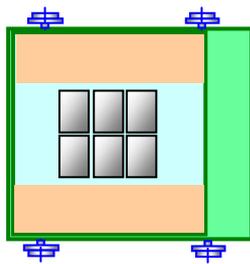
$$A_{TR} / A_{FR} < 1$$



Füllwagen mit gleichflächigem Füllkasten (Regelfall)

Der Transportraum ist geringfügig länger und breiter als der Füllraum.

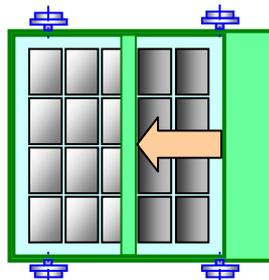
$$A_{TR} / A_{FR} \sim 1$$



Füllwagen mit überflächigem Füllkasten

Länge und Breite des Transportraumes sind deutlich größer als Länge und Breite des Füllraumes. Die kritischen Zonen im Transportraum, in denen Gemenge zu lange verweilt, sind farbig gekennzeichnet.

$$A_{TR} / A_{FR} > 1$$



Füllwagen mit variabler Füllkastenrückwand

Während der geradlinigen Vorwärtsbewegung des Füllwagens wird die Rückwand des Füllkastens nach vorne geschoben.

Grundfläche und Volumen des Transportraumes werden somit reduziert.

$$A_{TR} / A_{FR} \leq 1, \text{variabel}$$

Hat der Füllwagen seinen vorderen Umkehrpunkt erreicht, ist der Füllkasten unterflächig. Die Rückwand bleibt in dieser Position bis zum Abschluss des Füllens fixiert. Erst vor der erneuten Beschickung des Füllwagens mit Betongemenge wird die Rückwand wieder in ihre Ausgangsposition zurückgeschoben. Mit der so variabel gestalteten Grundfläche des Transportraumes wird die Höhenreduzierung der Gemengesäule im Füllkasten während des Füllens reduziert. Gleichzeitig wird die Überdeckung der hinteren Zeilen des Füllraumes durch den Füllkasten verkürzt. Im Ergebnis steht die Vergleichmäßigung der koordinaten- und zeitbezogenen Druckfunktion am Boden des Füllraumes.

6.1.2.2 Maschinentechnische Einflussgrößen

- Füllwagen

Neben der Dimension des Transportraumes bestimmen die Form und die Aktionen des Füllwagens sowie dessen Einbauten den Transport- und Verteilungsprozess während des Füllens. Größen und Formen können mit den geometrischen Maßen und Formfaktoren beschrieben werden. Die Aktionen des Füllwagens und dessen Einbauten werden durch die Bewegungsgrößen Weg s , Geschwindigkeit v und Beschleunigung a definiert. Folge und Dauer der Aktionen können in Interaktionsdiagrammen zusammengefasst werden.

- Vibrationssystem

Starzeitpunkt, Bewegungsfunktion und Dauer der Vibration beeinflussen die Homogenität der Füllung. Wesentliche Stellgrößen in der Produktion sind Erregerfrequenz und Erregerkraft. In Abhängigkeit von mitschwingender Masse, Spaltmaß und Formaufspanndruck stellen sich unterschiedliche Bewegungsfunktionen an Unterlagsbrett, Formunterteil und gegebenenfalls am Füllwagen ein. Die Quantifizierung der Bewegungsfunktionen erfolgt im Wesentlichen durch die Darstellung der Beschleunigungs-Zeit-Funktionen und der Frequenzanalyse. Kenngrößen zur Beschreibung der Vibrationsverdichtung werden ausführlich in [36] beschrieben.

6.1.2.3 Stoffliche Einflussgrößen

Die stofflichen Einflussgrößen auf das Verarbeitungsverhalten von steifen Betongemengen sind weitestgehend bekannt. Die Art der Ausgangsstoffe, deren Mengenanteile, die Mischgüte und der Grad der Hydratation beeinflussen das Verarbeitungsverhalten des Betongemenges. Die Einwirkung der Gemengeeigenschaften auf die erreichbare Homogenität der Füllung ist unstrittig. Kenngrößen zur Charakterisierung des Verarbeitungsverhaltens hingegen sind mangels geeigneter Prüfverfahren insbesondere für steife Gemenge nicht ausreichend verfügbar. Bekannte Messmethoden zur Bestimmung von Stoffkennwerten und Modelle zur Beschreibung des Verarbeitungsverhaltens von Betongemenge werden ausführlich in [37],[38] beschrieben.

Im industriellen Routinebetrieb zeigt sich ausschließlich der Wassergehalt des Betongemenges als näherungsweise verlässliche Kenngröße zur Regulierung der Verarbeitbarkeit. Insbesondere jedoch bei Korngrößenschwankungen der Bindemittel und Zusatzstoffe variiert die Oberfläche innerhalb des Betongemenges äußerst stark und relativiert die Eignung des Wassergehaltes zur Beschreibung der Verarbeitbarkeit. In diesem Fall übernimmt die subjektive Beurteilung des Anlagenbedieners die Regelung der Gemengekonsistenz. Die Entwicklung von Verfahren zur reproduzierbaren Messung und Regelung der Verarbeitbarkeit während der Produktion von Betonwaren ist Gegenstand der derzeitigen Forschung.

Der Einfluss der Zusammensetzung, des Wassergehaltes und des Hydratationsgrades des Gemenges sowie der Einfluss von Betonzusatzmitteln auf die Füllgüte bleiben in der vorliegenden Arbeit unter Voraussetzung eines optimalen Betongemenges unbeachtet.

6.2 Phänomenologische Betrachtungen

In der industriellen Produktion können verschiedene Phänomene beobachtet werden. Nachfolgend werden die Wirkungen von Barrieren und vibrationsverursachte Phänomene im Füllraum beschrieben.

- Formstege und Formeinbauten als Barrieren im Füllraum

Stege im Formunterteil parzellieren den Füllraum. Formeinbauten wie beispielsweise Kerne und Kernhalter im Füllraum generieren definierte Hohlräume im Frischbetonkörper. Die Stege und Einbauten senkrecht zur Fahrtrichtung des Füllwagens bilden Barrieren im Füllraum.

Mit der linearen Vorwärtsbewegung des Füllwagens wird das Gemenge auf eine Transportgeschwindigkeit v_{TR} beschleunigt. Erreicht der Füllkasten den Füllraum, drängt das Gemenge unter Gravitation in die Form. Die horizontalen und vertikalen Bewegungen überlagern sich in dieser Phase. Es ergibt sich für das einfallende Gemengeagglomerat die in Abbildung 6.3 dargestellte Wurfparabel.

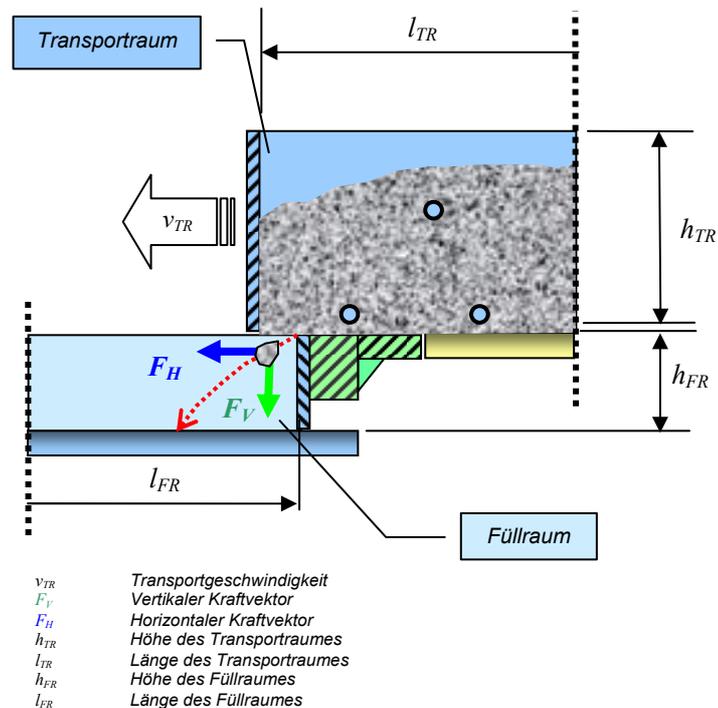


Abbildung 6.3: Darstellung der Bewegungsbahn eines Gemengeagglomerates beim Eintritt in den leeren zu füllenden Raum

Treffen die Gemengepartikel im oberen Bereich des Füllraumes auf eine Barriere, kommt es zum Stau an diesem Hindernis. Das Gemenge wird durch die fortschreitende Bewegung des Füllwagens an der Barriere verdichtet. Die Abbildung 6.4 stellt diese Situation im Grenzbereich zwischen Füll- und Transportraum dar. Ähnliche Phänomene sind aus Untersuchungen und Simulationen zur Dynamik granularer Systeme bekannt. In [39] werden diese als Wechselwirkung eines granularen Stromes mit einem Hindernis bezeichnet.

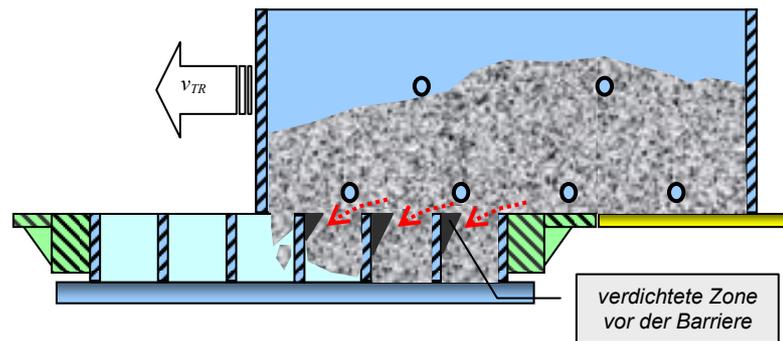


Abbildung 6.4: Wechselwirkung zwischen Füllkasten, Formsteg und Betongemenge während des Überfahrens des zu füllenden Raumes

- Scherebene zwischen dem eingefüllten und dem ausfahrenden Betongemenge

Bei großflächigen, flachen Füllräumen ohne Barriere können Teile des bereits in den Füllraum eingebrachten Gemenges mit dem noch gefüllten, ausfahrenden Füllkasten wieder herausgelöst werden. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Transportmassenkennzahl und zunehmender Gemengefeuchtigkeit. Dichteunterschiede verbunden mit Strukturstörungen stehen vor allen bei der Produktion von Platten im Ergebnis. Barrieren im Füllraum vermindern diesen Effekt. Die Abbildungen 6.5 und 6.6 stellen zwei unterschiedliche Konstellationen, mit und ohne Barriere, bei näherungsweise gleichem Füllraum gegenüber.

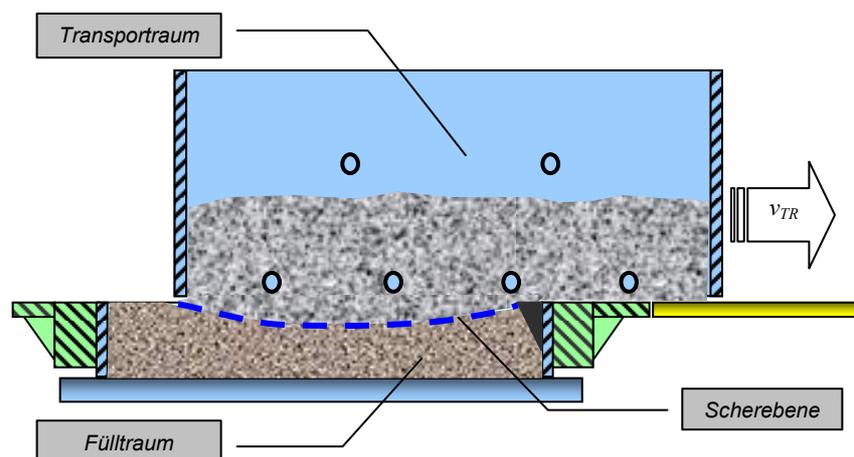


Abbildung 6.5: Großflächiger Füllraum ohne Barriere – Füllwagen auf der Rückfahrt in die Grundstellung

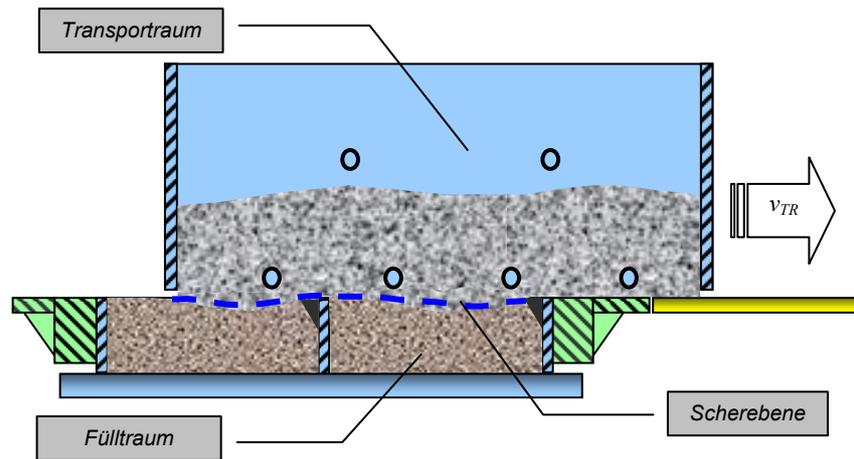


Abbildung 6.6: Füllraum mit einer Barriere – Füllwagen auf der Rückfahrt in die Grundstellung

Im Füllraum ohne Barriere, siehe Abbildung 6.5, kann die Scherebene partiell deutlich unter die Füllraumhöhe absinken. Enthält der gleiche Füllraum formatbedingt eine Barriere, wird das Absinken der Scherebene reduziert.

Die systematische Untersuchung dieser Phänomene steht noch aus. Die Analyse der Wechselbeziehungen zwischen dem bereits in den Füllraum eingebrachten, vorverdichteten Betongemenge und dem im Transportraum bewegten Betongemenge sowie die Wechselbeziehungen zwischen dem Betongemenge und den Interaktionen des Füllwagens, des Schüttelrostes und des Abstreifers sind Aufgabe zukünftiger Forschung. Ihre Kenntnis ist Voraussetzung für die zielgerichtete Optimierung von Design und Bewegungsfunktionen des Füllwagens.

- Vibrationsverursachte Phänomene

Die über die verschieden ausgeformten Stege und/oder Formeinbauten in den Füllraum eingetragenen Schwingungen können rotationsartige Transportströmungen verbunden mit Entmischung im Gemenge erzeugen, dies insbesondere dann, wenn ein bestimmter Füllungsgrad innerhalb der Zelle erreicht wurde. Strukturstörungen im Frischbeton stehen im Ergebnis. Ähnliche Phänomene sind aus Untersuchungen und Simulationen zur Dynamik granularer Systeme bekannt. In [39] werden diese Phänomene als Konvektion und Korngrößenegregation bei vertikaler oder horizontaler Vibration bezeichnet. Die Abbildung 6.7 zeigt Konvektionsmuster, die mit Hilfe einer Molekulardynamiksimulation erzeugt wurden. Die sich im Umfeld des Formsteges ausbildende Struktur der Materialrotation stimmt mit dem in Betonsteinformen beobachteten Phänomen überein.

Aufgabe der zukünftigen Forschung wird es insbesondere sein, optimale Bewegungsfunktionen für die Vibration bei unterschiedlichen Füllaufgaben zu ermitteln. Darüber hinaus sind die Formunterteile konstruktiv so zu gestalten, dass ein definiertes Schwingungsverhalten sichergestellt wird. Nur so kann ein reproduzierbarer Eintrag der Vibration in den Füll- bzw. Verdichtungsraum sichergestellt werden. Einen beispielgebenden Ansatz zur Homogenisierung des Schwingungsverhaltens von Formunterteilen stellt die Entwicklung des in [40] beschriebenen Formdesigns dar.

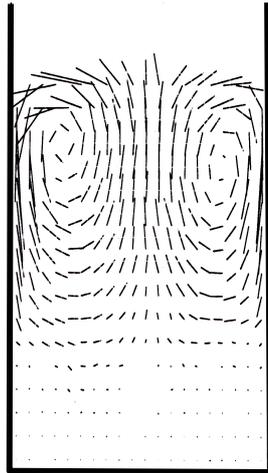


Abbildung 6.7:

Konvektionsmuster im Ergebnis vertikaler Vibration im Rahmen einer zweidimensionalen Molekulardynamiksimulation (Quelle: PÖSCHEL [39])

6.3 Erste Modellbildung an Hand der beobachteten Phänomene

Unabhängig von der Vielzahl der möglichen Einflussfaktoren zeigen die Ergebnisse des Kapitels 5, die größte Signifikanz für die Korrelation zwischen Füllmasse m_i und den Zellenkoordinaten (Zeilen- und Spaltenlage) an. Die Lage der Zelle innerhalb der Matrix bestimmt dabei im Wesentlichen die Größe der erreichten Füllmasse. Die Ursache dafür ist in der geradlinig fortschreitenden Bewegung des Füllwagens und dem dabei absinkenden Füllstand im Füllkasten begründet. Die in [14] beschriebenen Untersuchungen haben ergeben, dass zwischen dem Start des Kernfüllwagens aus der Grundstellung bis zur Rückkehr in die Grundstellung durchschnittlich 3,34 Sekunden vergehen. Der maximal ermittelte Wert beträgt 3,90 Sekunden. Die Gemengeschtüttung im Füllkasten drückt während der Zeit des Überfahrens in die Zellen des zu füllenden Raumes. Der Weg des Füllwagens, die Zeit der Überdeckung und der aus der Überdeckung resultierende Druck werden im Folgenden als

- Überfahrweg $s_{\bar{v}}$,
- Überdeckungszeit $t_{\bar{v}}$,
- Überdeckungsdruck $p_{\bar{v}}$

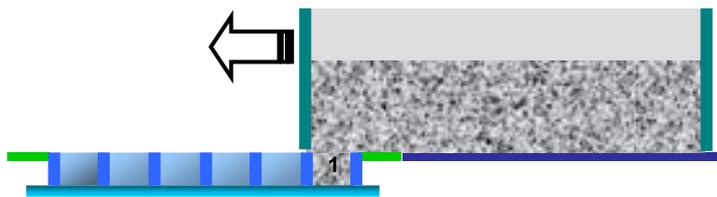
bezeichnet. In Abhängigkeit vom Füllstand und der Überdeckungszeit gestaltet sich je nach Lage der Zelle die Druck- Zeit- Funktionen sehr unterschiedlich.

6.3.1 Zellendruckmatrix (ZDM)

Im Folgenden wird ein erster, stark vereinfachter zweidimensionaler Modellansatz zur Detektierung der unterschiedlichen Überdeckungszeiten und unterschiedlichen Überdeckungsdrücke am Boden der unterschiedlichen Zellenzeilen entwickelt. Das in der Tabelle 6.3 dargestellte Modell geht zunächst idealisiert davon aus, dass sich das einzufüllende Gemenge wie eine ruhende Newtonsche Flüssigkeit verhält. Ein gleichflächiger Füllwagen wird in mehreren Schritten aus seiner Grundstellung heraus über einen einfach parzellierten Füllraum bewegt. Die Transportmassenkennzahl wird für das virtuelle Experiment mit 4 gewählt. Jede dargestellte Position des Füllkastens über dem Füllraum wird als eine statische Momentaufnahme betrachtet. In der Zellendruckmatrix wird für jede Füllkastenposition das Druckprofil in den Zellenzeilen erfasst. Wird eine Zelle vom Transportraum überdeckt, wird dies in der Matrix phasen-

und zellenbezogen blau gekennzeichnet. Mit abnehmendem Druck wird die Farbe aufgehellt. Mit den in der Tabelle 6.2 gezeigten Beispielen werden exemplarisch 3 von insgesamt 15 betrachteten Füllwagenpositionen mit den entsprechenden Zellendruckmatrizen abgebildet. Die Übersicht in der Anlage 6.1 zeigt alle Positionen und Matrizen im Überblick.

Tabelle 6.2: Schema zur idealisierten Beschreibung der ersten Füllstufe

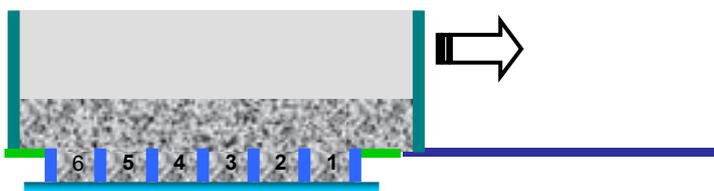


Phase	0	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	z8	z9	z10	z11	z12	z13	z14	E
Zelle																
1																
2																
3																
4																
5																
6																

Position 1

Der Füllkasten ist aus seiner Grundstellung heraus über die 1. Zeilenzeile gefahren. Das Gemenge ist in die Zelle eingeflossen und füllt diese vollständig aus.

Die Zellendruckmatrix zeigt für diese Position des Füllkastens die überdeckte Zeilenzeile 1 mit maximalem Überdeckungsdruck an.

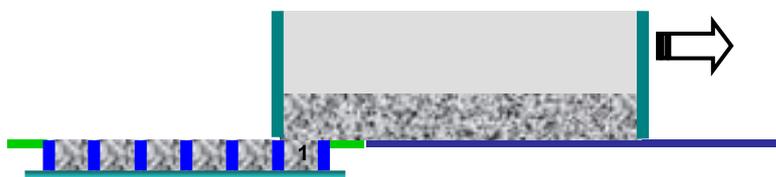


Phase	0	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	z8	z9	z10	z11	z12	z13	z14	E
Zelle																
1																
2																
3																
4																
5																
6																

Position 7

Der Füllkasten überfährt die 6. Zeilenzeile bis zum vorderen Umkehrpunkt.

Die Zellendruckmatrix zeigt in dieser Position alle Zellen überdeckt an. Da der Füllstand im Füllkasten nicht mehr abnimmt, bleibt der Überdeckungsdruck gegenüber der Position 6 auf dem gleichen Niveau.



Phase	0	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	z8	z9	z10	z11	z12	z13	z14	E
Zelle																
1																
2																
3																
4																
5																
6																
Zeit									~ 3,5 s							

Position 13

Der Füllkasten ist auf dem Rückweg in seine Grundstellung. Er überdeckt in dieser Position nur noch die 1. Zeilenzeile.

Die Zellendruckmatrix verdeutlicht zusammengefasst die äußerst unterschiedlichen Überdeckungszeiten und Überdeckungsdrücke in den unterschiedlichen Zeilenzeilen.

Die im Ergebnis der virtuellen Füllung entstandene Zellendruckmatrix detektiert die orts- und zeitabhängig unterschiedlichen Bedingungen innerhalb des zu füllenden Raumes. Dabei wird unter anderem deutlich, dass die Überdeckungszeit der in Fertigungsrichtung zuletzt erreichten Zeilenzelle 6 nur etwa ein Viertel der Überdeckungszeit der Zeilenzelle 1 beträgt.

6.3.2 Zellendruck-Zeit-Funktion (ZDZF)

Mit dem gewählten, stark vereinfachten Modell wird der Druck am Boden des Füllraumes ausschließlich durch die Höhe der Gemengesäule bestimmt. Mit der Reduzierung des Füllstandes im Füllkasten sinkt der Druck am Boden der Zellen proportional ab. Das Diagramm in der Abbildung 6.8 stellt die Entwicklung des Füllungsgrades in dem gleichflächigen Füllwagen für alle Positionen der ersten Füllstufe dar. Die Ordinate zeigt zusätzlich das Verhältnis zwischen der Füllhöhe im Füllkasten und der Füllraumhöhe an.

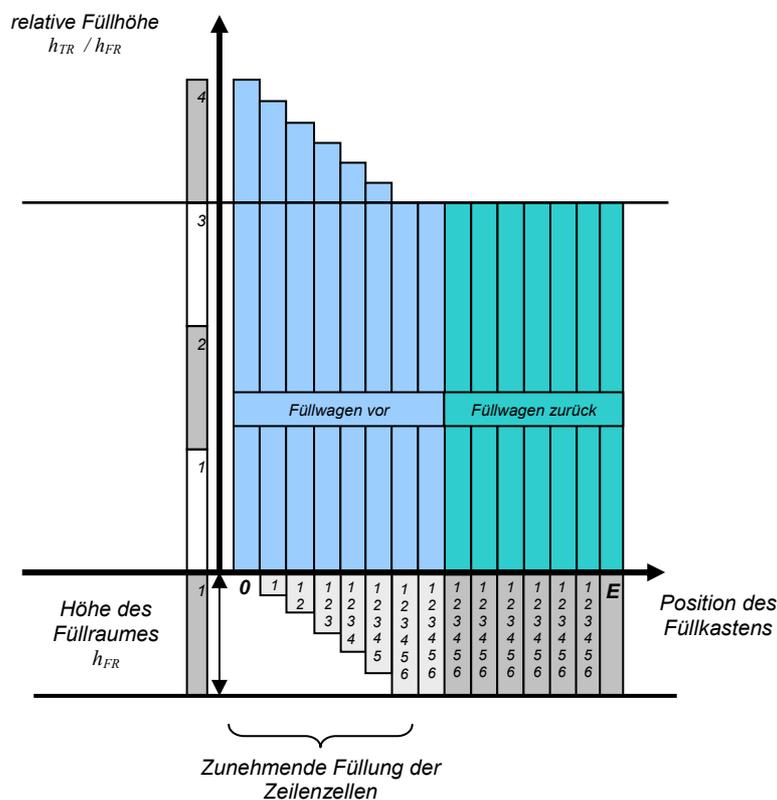


Abbildung 6.8: Darstellung der Füllhöhe im Transportraum in Abhängigkeit von der erreichten Position des Füllkastens

Der Verlauf der ZDZF am Boden des zu füllenden Raumes wird bei gleichflächigen Füllwagen durch die drei Abschnitte gekennzeichnet.

Abschnitt 1:

Der Füllkasten überdeckt zunehmend den Füllraum während der Fahrt in Fertigungsrichtung. Der Füllungsgrad im Transportraum fällt ab.

Abschnitt 2:

Der Füllkasten überdeckt abnehmend während der Rückfahrt in Grundstellung. Der Füllungsgrad im Transportraum bleibt näherungsweise konstant.

Abschnitt 3:

Der Füllkasten überdeckt nicht mehr den Füllraum. Der Druck am Boden des Füllraumes fällt sprunghaft ab und wird ausschließlich durch die gefüllte Masse m_i bestimmt.

Die Abbildung 6.9 zeigt die mit Hilfe des virtuellen Modells erzeugten ZDZF der Zeilenzellen 1, 4 und 6 mit sehr unterschiedlichen Druckverläufen im Folgenden auch als Druckprofile bezeichnet.

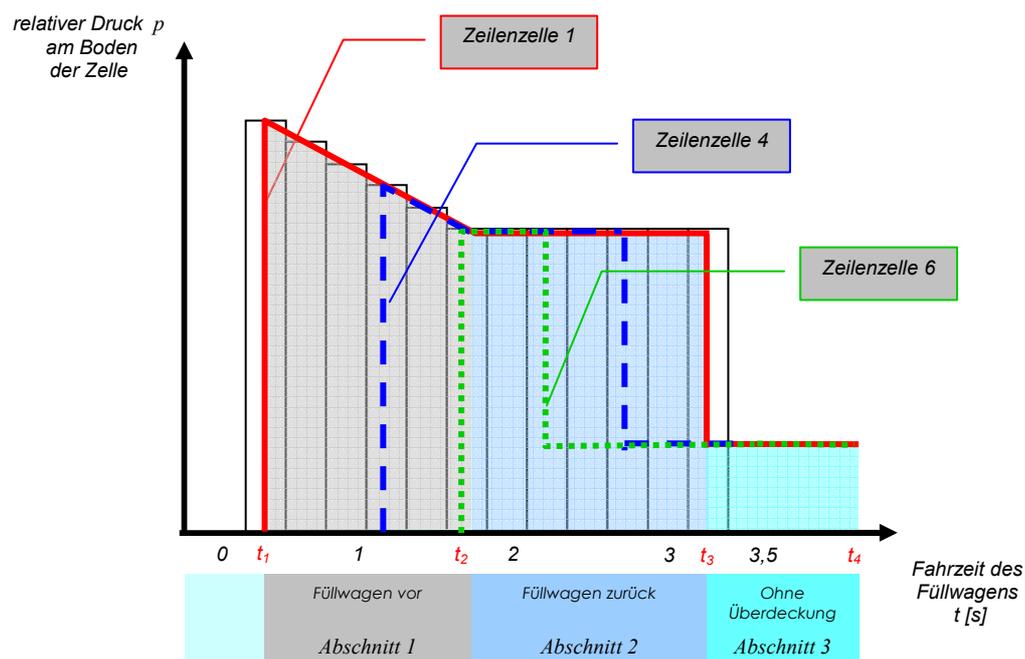


Abbildung 6.9: Darstellung der Zelledruck-Zeit-Funktion für die Zeilenzellen 1, 4 und 6 des Modells

Die Gegenüberstellung der Funktionen detektiert die äußerst unterschiedlichen Verhältnisse während des Füllprozesses in den verschiedenen Zeilen. Überdeckungsdrücke und Überdeckungszeiten variieren im Ergebnis der Kinematik des Füllwagens ort- und zeitbezogen. Zur Quantifizierung der unterschiedlichen Funktionsverläufe kann der Flächeninhalt A_{ZDZF} zwischen dem Funktionsgraphen $p(t)$ und der Abszisse bei $p=0$, im Folgenden auch als mittleres Druckprofil bezeichnet, genutzt werden. Diese berechnet sich für die aus dem virtuellen Modell erzeugten Funktionen aus der Summe der 3 bestimmten Integrale, die für jeweils einen Füllungsabschnitt stehen. Zur Berechnung des mittleren Druckprofils für die in der Abbildung 6.8 gezeigte Zelle 1 ergibt sich die folgende Gleichung

$$A_{ZDZF} = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt + \int_{t_2}^{t_3} p(t) dt + \int_{t_3}^{t_4} p(t) dt . \quad (6.1)$$

6.3.3 Wechselbeziehungen zwischen Zellendruck-Zeit-Funktion und Füllmasse

Die in einer Zelle erreichte Füllmasse m_i ist das Produkt aus dem einfließenden Massenstrom \dot{m}_G und der Einfließzeit t_G des Gemenges

$$m_i = \dot{m}_G \cdot t_G \quad (6.2).$$

Der einfließende Massenstrom berechnet aus

$$\dot{m}_G = \rho_G \cdot v_G \cdot A_{Ze} \quad (6.3).$$

Dabei steht ρ_G für die Dichte des Gemengestromes, v_G für die Fließgeschwindigkeit des Gemengestromes und A_{Ze} für die Grundfläche der zu füllenden Zelle.

Die Einfließgeschwindigkeit berechnet sich nach Torricelli aus

$$v_G = \sqrt{2gh_{TR}} \quad (6.4).$$

Dabei steht g für die Erdbeschleunigung und h_{TR} für die Füllhöhe im Transportraum über der Formzelle. Mit der Zusammenfassung der Gleichungen (6.2) bis (6.4) ergibt sich für die Berechnung der Füllmasse

$$m_i = \rho_G \cdot \sqrt{2gh_{TR}} \cdot A_{Ze} \cdot t_G \quad (6.5).$$

Einfließzeit und Überdeckungsdruck beeinflussen signifikant das Ergebnis.

Bei realen Füllprozessen in Steinformmaschinen wirken zusätzlich Reibung und Viskosität des Betongemenges. Diese werden die Einfließgeschwindigkeit des Gemenges deutlich reduzieren. Darüber hinaus werden Schubspannungen durch Füllkasten und Schüttelrost in das einzufüllende Gemenge eingetragen. Die Füllhöhe innerhalb des Transportraumes variiert und gestaltet den Überdeckungsdruck unterhalb des Füllkastens entsprechend unterschiedlich. Diese Einflüsse werden die Fließprofile innerhalb des Transport- und Füllraumes während der Füllung variieren lassen und den Verlauf der zellen- und zeitbezogenen Druckfunktion zusätzlich überlagern.

ZDZF als Indikator für die Güte des Prozessverlaufs

Ausgehend von der ersten Modellbildung sind für eine optimale Füllung, Geometrie und Bewegungsfunktion(en) des Füllkastens so zu gestalten, dass der Überdeckungsdruck und die Überdeckungszeit für alle zu füllenden Zellen möglichst gleich sind. Im Idealfall bilden alle Zellen die gleiche Druck-Zeit-Funktion ab.

Die Druck-Zeit-Funktion am Boden der Zellen kann im Verlauf von numerischen und realen Experimenten erfasst werden. Im Rahmen der in den Kapiteln 7 und 8 beschriebenen Experimente zur Bestimmung der Massen- und Druckverteilungen wird auch die Korrelation zwischen der erreichten Füllmasse m_i und der Druck-Zeit-Funktion in den Zellen untersucht. Es wird sich zeigen, ob die Aufnahme der ZDZF während des Füllens von Betongemenge bei der Herstellung von Betonsteinen tatsächlich als Indikator für die Güte des Prozessverlaufs und damit für die Prozessoptimierung geeignet ist.

7. Numerische Modellierung des Füllprozesses unter Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode (DEM)

7.1 Grundgedanke und Anwendungen

Das Verhalten des Betongemenges während des Füllprozesses konnte bisher nur durch Beobachtungen der realen Prozesse untersucht werden. Die komplexen mechanischen Vorgänge während der Füllung schließen eine vollständige analytische Berechnung aller im Prozessraum entstehenden Massenströme nahezu aus. Zur systematischen Analyse sind äußerst umfangreiche und aufwändige experimentelle Untersuchungen notwendig. Diese würden zusätzlich dadurch erschwert, dass es während des realen Füllprozesses kaum Einblick in den Transport- und Füllraum einer Steinformmaschine gibt.

Die numerische Modellierung von Transport- und Lagerprozessen unter Anwendung der DEM etabliert sich zunehmend als Alternative zu aufwändigen experimentellen Untersuchungen. Ein besonderer Schwerpunkt in der Nutzung und Weiterentwicklung der DEM hat sich im letzten Jahrzehnt auf dem Gebiet der Schüttguttechnik entwickelt. Die virtuellen Modelle machen die Prozesse transparent. So können die Wechselbeziehungen zwischen den Lager- und/oder Fördereinrichtungen und den Strömen der als diskrete Elemente betrachteten Partikel realitätsnah abgebildet werden. Dabei wird die DEM im zunehmenden Maße nicht nur für die Beschreibung der Partikelströme, sondern auch für die Konstruktion und Dimensionierung der Maschinen und Anlagentechnik genutzt. Die in diesem Zusammenhang veröffentlichte, im Folgenden beispielhaft genannte Literatur gibt eine ausführliche und übersichtliche Beschreibung zur Methode der DEM und deren Anwendung [40],[41],[42],[43],[44],[45],[46].

Die Erschließung der DEM für die Simulation der Verarbeitungsprozesse von Betongemengen ist Gegenstand der derzeitigen Forschung. Wesentliche Grundlage bilden umfangreiche Untersuchungen zur Modellierung der rheologischen Eigenschaften des Betongemenges [47],[48]. Die Definition geeigneter Kenngrößen und die richtige Wahl der Beträge sind die Voraussetzung für ein realitätsnahes Simulationsergebnis.

Die Anwendung der DEM für die Simulation der Verarbeitung von Betongemengen war auf Grund der begrenzten Rechenkapazität noch bis Mitte der 90er Jahre stark eingeschränkt. Bis dahin war insbesondere die Partikelanzahl für die numerische Simulation so stark limitiert, dass keine brauchbaren Ergebnisse generiert werden konnten. Erst mit der Entwicklung schneller, hochleistungsfähiger handelsüblicher Rechentechnik konnte die DEM auch für die Simulation des Verarbeitungsverhaltens von Betongemengen erschlossen werden. Eine vollständige Abbildung des realen Partikelsystems während der Befüllung einer Betonsteinform ist jedoch auch mit der gegenwärtig zur Verfügung stehenden, konventionellen Rechentechnik nicht möglich. Viel zu groß ist die Partikelzahl innerhalb des zu transportierenden und zu füllenden Betongemenges während eines Fertigungszyklus. Für die Erstellung eines Rechenmodells zur Beschreibung des Füllverhaltens ist es daher zwingend notwendig, eine Abstraktion zu wählen, bei welcher das Rechenergebnis bei akzeptabler Rechenzeit eine ausreichende Realitätsnähe erreicht.

7.2 Grundlagen der Diskrete-Elemente-Methode

Die am meisten verbreitete Methode zur Berechnung der Dynamik von Partikelsystemen ist die Molekulardynamiksimulation (MD). Unter MD versteht man die zeitabhängige Lösung der Newtonschen Bewegungsgleichungen für alle Elemente eines ruhenden oder bewegten Systems [39]. Basierend auf der Molekulardynamiksimulation wurde

von Cundell und Strack [49] die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) Ende der 70er Jahre entwickelt. Zur Beschreibung

- der Stoffeigenschaften der Elemente,
- der Wechselwirkungen der Elemente untereinander und
- der Kopplung der Elemente mit anderen Feldern

werden Gesetze der Mechanik genutzt.

Für jedes der N Elemente des Systems werden der Gesamtheit aller angreifenden Kräfte eine Bilanz aufgestellt und die resultierenden Bewegungsgleichungen

$$m_i \vec{a}_i = \vec{F}_i \quad (i=1 \dots N) \quad \text{für Translation} \quad (7.1)$$

$$J_i \vec{\alpha}_i = \vec{M}_i \quad (i=1 \dots N) \quad \text{für Rotation} \quad (7.2)$$

gelöst. Die zeitliche Integration der Gleichungen (7.1) und (7.2) kann mit unterschiedlichen numerischen Verfahren erfolgen. Im Ergebnis der Integration werden für jedes Element die Trajektorien berechnet. Diese beschreiben mit den als Funktion der Zeit gegebenen Koordinaten und Bewegungsgrößen die Bewegung eines Elementes im Raum. Mit der stetigen zahlreichen Wiederholung dieser Berechnungen können komplexe Transportprozesse simuliert werden. Die schematische Darstellung in der Abbildung 7.1 stellt den Berechnungszyklus in einem DEM-Programm dar.

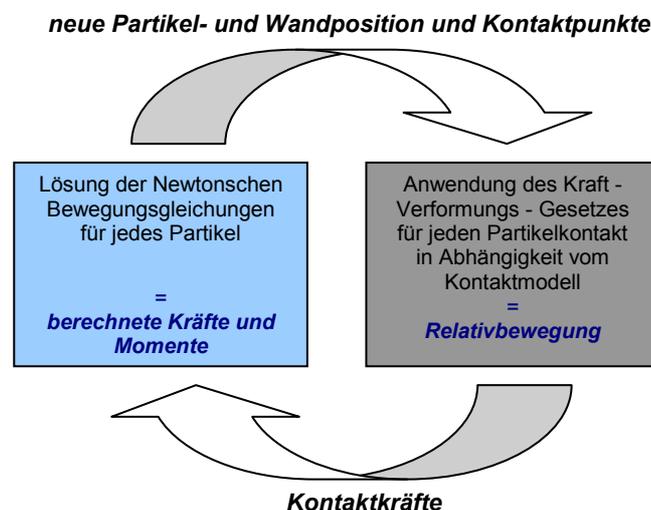


Abbildung 7.1: Berechnungszyklus in einem DEM-Programm (Quelle: [50])

Auf kontinuumsmechanischen Ansätzen basierende Simulationsmethoden sind bei der Darstellung schüttgutmechanischer Vorgänge Grenzen gesetzt, da sie wichtige Einflussgrößen wie Packungsstruktur und Partikelform und damit den quasi diskreten Charakter beispielsweise erdfeuchter Betongemenge nicht ausreichend berücksichtigen können. Ein ruhendes Gemenge, das zunächst festkörperähnliche Eigenschaften aufweist, verhält sich nach dem Übergang zum schnellen Fließen eher wie eine Flüssigkeit. Dieser Übergang lässt sich mit den klassischen auf kontinuumsmechanischen Modellansätzen basierenden Methoden nur sehr unbefriedigend erfassen [39]. Im Gegensatz zu den kontinuumsmechanischen Betrachtungsweisen ist es

bei der DEM darüber hinaus nicht notwendig, das mikroskopische Fließverhalten des Partikelsystems zu kennen.

Im Diskreten-Elemente-Modell werden Partikel eines Gemenges näherungsweise durch einfache Körpergeometrien, wie z.B. Kugeln, dargestellt. Komplexere Elementeformen können durch die starre Verbindung mehrerer Partikel zu einem Element erzeugt werden. Mechanische Modelle zur Beschreibung der grundlegenden Stoffeigenschaften der Elemente, der Wechselwirkungen zwischen den Elementen und Kopplungen der Elemente mit anderen Kraftfeldern können durch eine Feder, einen Dämpfer oder ein Reibelement dargestellt werden. Die Abbildung 7.1 stellt die unterschiedlichen mechanischen Modelle gegenüber.

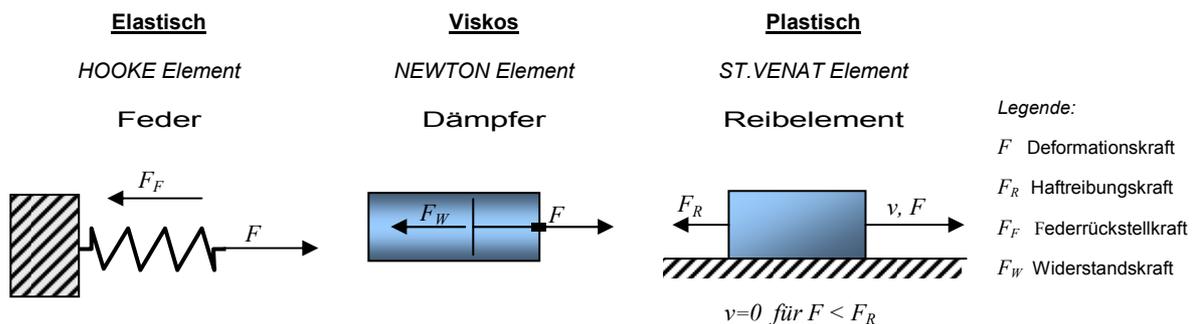


Abbildung 7.2: Mechanische Modelle für die Beschreibung der Deformationseigenschaften (Quelle: [51])

Die unterschiedlichen mechanischen Modelle können in der DEM miteinander zu komplexen Kontaktmodellen kombiniert werden. Die schematische Darstellung in der Abbildung 7.3 zeigt exemplarisch die Kombination der oben genannten mechanischen Modelle in Parallel- und Reihenschaltung an den Kontaktpunkten zweier Kugeln.

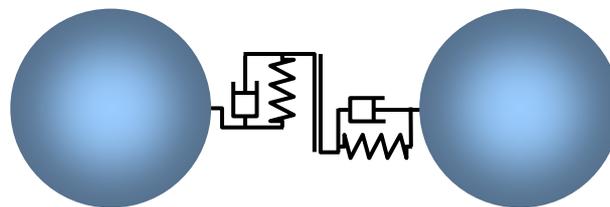


Abbildung 7.3 : Beispiel eines Kontaktmodells für die DEM mit Federn, Dämpfer und Reibelement

7.3 Simulationssoftware Particle Flow Code in 3Dimensions (PFC3D)

Particle Flow Code in 3 Dimensions ist ein klassisches, auf der DEM basierendes Programm zur numerischen Modellierung von komplexen Systemen. Hersteller ist die Firma Itasca aus Minneapolis (USA). Die Grundelemente des Programms sind 3 dimensionale kugelförmige Elemente und 2 dimensionale Wandelemente. Geometrisch

komplizierte Strukturen können durch den Zusammenschluss mehrerer Kugel- oder Wandelemente erzeugt werden, welche wiederum eigenständige Grundelemente abbilden.

Die Elemente selbst sind in der PFC3D nicht deformierbar. Spannungsbedingte plastische oder elastische Deformationen werden durch Relativbewegungen der Elemente zueinander abgebildet. Dabei verschieben sich die Kugeln gegebenenfalls ineinander. Es kommt zu einer Raumüberschneidung mit einer entsprechenden Volumenreduzierung. Die Abbildung 7.4 beschreibt die Verschiebung zweier Kugeln infolge Normalkraft. Die Summe der Massen beider Kugeln bleibt nach der Verschiebung erhalten. Die Summe des Volumens beider Kugeln wird um das gemeinsame Teilvolumen reduziert. Die Größe des Verschiebungsmaßes Δh infolge der Normalkraft wird durch die im Modell für die Kugeln vereinbarten Stoffparameter bestimmt.

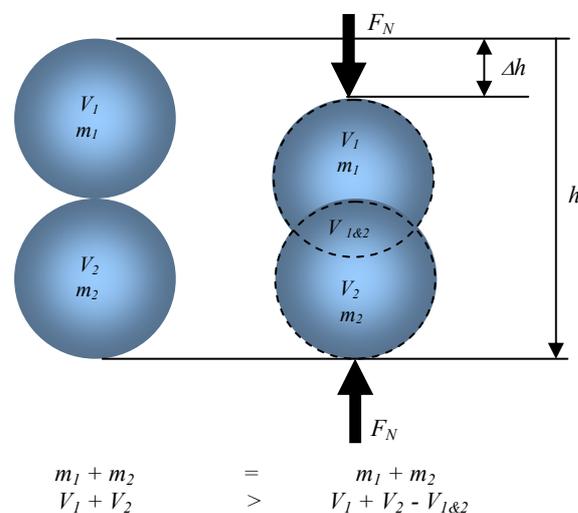


Abbildung 7.4: Darstellung des Deformationsverhaltens von kugelförmigen Partikeln im PFC3D

Neben der Anwendung vordefinierter Kontaktmodelle des PFC3D besteht die Option, unter Nutzung der internen Programmiersprache zusätzliche Mikroparameter zu implementieren. Durch die frei wählbare Anordnung, Verbindung und Wechselwirkung der Grundbausteine wird es möglich, die unterschiedlichsten physikalischen Systeme zu modellieren. Eine komprimierte, gut verständliche Beschreibung des PFC3D als Werkzeug für numerische Modellierung wird durch CUNDELL [52] gegeben. Die ausführliche Beschreibung der theoretischen Grundlagen sowie der Parametrierung erfolgt in [50].

7.4 Entwicklung und Kalibrierung des Basismodells

Am IFF Weimar e.V. wurde unter Anwendung der DEM-Software PFC3D erstmals ein Simulationsmodell zur Visualisierung des Füllprozesses entwickelt. Ziel dabei war es insbesondere, geeignete Methoden zur Parametrierung der mikromechanischen Eigenschaften zu entwickeln, die eine realitätsnahe Abbildung des Betongemenges mit seinen thixotropen Eigenschaften erlauben. Dies setzt ein umfangreiches Grundwissen über die rheologischen Eigenschaften von Betongemengen und entsprechende geeignete Kenngrößen zu deren Quantifizierung voraus. Im Vorfeld der

Untersuchungen wurden umfangreiche Grundlagenforschungen am IFF zu diesem Thema durchgeführt. In [47] werden ausführlich Einflussgrößen sowie Methoden zur Beschreibung und Messung des Verarbeitungsverhaltens von Betongemengen dargestellt.

Eine ausreichend realitätsnahe Abbildung des Fließverhaltens des Betongemenges unter ausschließlicher Nutzung der im PFC vordefinierten Kontaktgesetze ist nicht möglich. Daher werden unter Nutzung der internen Programmiersprache des PFC3D zusätzlich Module zur Parametrierung erarbeitet und in die Simulationssoftware implementiert. In Simulationstests werden ausgewählte mikromechanische Parameter schrittweise variiert. Die virtuellen Ergebnisse werden den realen Ergebnissen, die mit einer eigens für die Kalibrierung der Simulationsparameter entwickelten Versuchsfülleinrichtung erzielt wurden, gegenübergestellt. Die Parameter werden so lange variiert, bis das makromechanische Verhalten hinreichend durch die Simulation wiedergegeben wird. Die Abbildung 7.5 und 7.6 zeigen die Füllversuchseinrichtung zur Kalibrierung der Simulationsparameter. Zur präzisen Realisierung der im PFC3D definierten Bewegungsfunktionen, ist der lineare Antrieb des Füllkastens servomotorisch ausgeführt. Um das Fließverhalten während des Füllens besser beobachten zu können, wird das Gemenge unterschiedlich eingefärbt und separiert in den Transportraum eingebracht. Die vordere Wand des Füllkastens ist transparent und ermöglicht eine visuelle Begutachtung der sich während des Prozesses ausprägenden Fließprofile. Die einzelnen Zellen des parzellierten Füllraumes bilden geschlossene Behälter, welche zur Verwiegung der eingefüllten Massen aus dem Formenkasten herausgenommen werden können. Die Kalibrierung erfolgt durch Vergleich der sich im numerischen und im realen Experiment ausbildenden Fließprofile und der erreichten Füllungskennzahlen.

Die mikromechanischen Parameter, welche eine ausreichende makromechanische Übereinstimmung zwischen numerischem und realem Experiment generieren, werden für die nachfolgenden Simulationen des Füllprozesses und der Füllgüte übernommen. Eine ausführliche Beschreibung der Parametrierung und eine Zusammenstellung der Wertebereiche, die für die folgenden numerischen Experimente zum Füllprozess verwendet wurden, findet sich in [53].

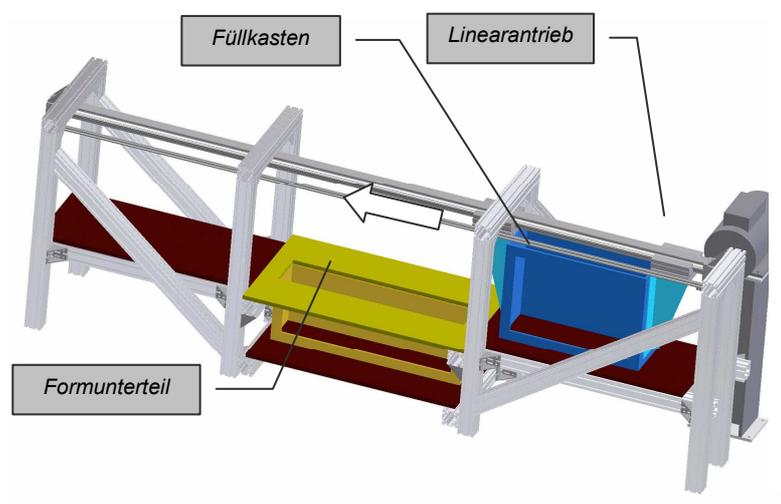


Abbildung 7.5: Versuchseinrichtung zur Kalibrierung des Fließverhaltens von Betongemenge während des Füllens

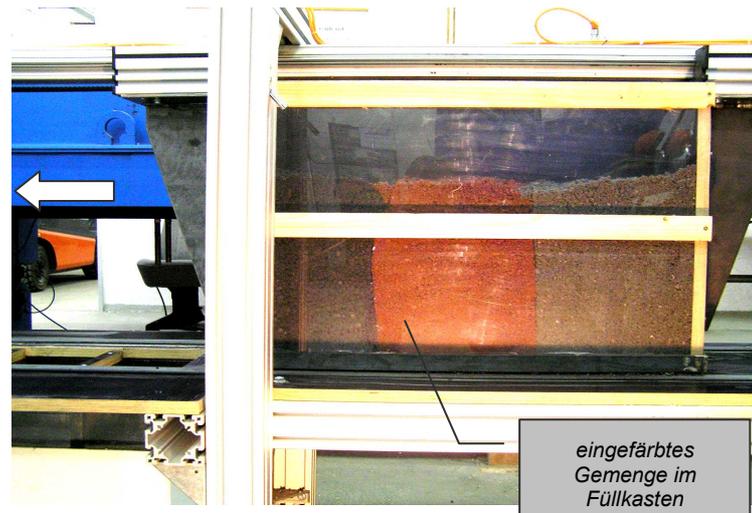


Abbildung 7.6: Detail der Versuchseinrichtung mit transparentem Füllkasten

7.5 Abbildung des realen Füllsystems im numerischen Modell

Auf der Grundlage des am IFF Weimar e.V. entwickelten Basismodells, welches das Verhalten des Frischbetons approximiert, wird die Simulation des Gesamtprozesses bei weiterer Annäherung an die Praxisbedingungen durchgeführt. Die Aufgaben der Simulation sind es,

- den Verlauf des Füllprozesses durch eine Computeranimation detailliert und transparent darzustellen,
- mit der Berechnung der Druck-Zeit-Funktion für alle Zellen erstmals den Prozessverlauf zu quantifizieren und
- die numerische Füllungsgüte der im industriellen Routinebetrieb bzw. der im Verifizierungsexperiment gemessenen Füllungsgüte gegenüberzustellen.

Die Nachbildung des realen Prozesses hat das Ziel, eine Grundlage für die Untersuchung kausaler Wechselbeziehungen zwischen der Füllaufgabe, der Füllausrüstung und dem Prozessverlauf bzw. dem Prozessergebnis zu schaffen. Die Simulation wird dabei zunächst auf die Abbildung der Füllstufe 1 ohne Füllvibration beschränkt.

7.5.1 Betongemenge

Die vollzählige Abbildung aller Partikel des einzubringenden Betongemenges, bestehend aus Bindemittel, Zusatzstoffen und Gesteinskörnungen, ist für das numerische Experiment nicht möglich. Zu groß ist die Partikelzahl des innerhalb eines Füllzyklus zu bewegenden Gemenges. Bei der gewählten Transportmassenkennzahl von 5 beträgt die Gemengemasse im Füllkasten für die gewählte Füllaufgabe in der Realität etwa 700 kg. Das entspräche bei einer Kernbetonrezeptur mit 300 kg Bindemittel und einer Sieblinie der Gesteinskörnungen mit $d_{max} = 16 \text{ mm}$ einer Partikelzahl von 42 Billionen! Partikelzahlen in dieser Größenordnung sind gegenwärtig nicht mit auf der DEM basierenden Programmen darstellbar.

Um das Gemenge trotzdem ausreichend realistisch im numerischen Experiment abbilden zu können, wird die Gemengematrix gemäß Abbildung 7.7 in ein grobes Korngerüst und einen imaginären Mörtel differenziert. Das Korngerüst wird durch

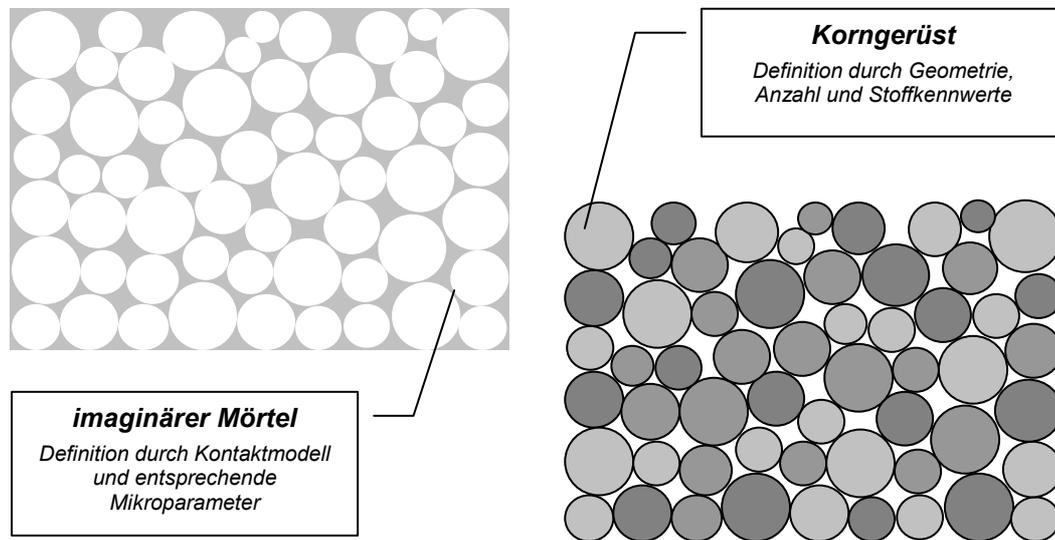


Abbildung 7.7: Teilung der Gemengematrix in Korngerüst und imaginären masselosen Mörtel

Kugeln mit definierter Größe und Anzahl sowie definierten Stoffeigenschaften parametrisiert. Der Mörtel wird durch die mikromechanischen Parameter des gewählten Kontaktmodells (Abbildung 7.3) definiert. Er besitzt im Modell keine Masse. Das im Korngerüst eingeschlossene Hohlraumvolumen bleibt vollständig leer. Dementsprechend verringert sich die Dichte der Packung im Füllraum gegenüber dem realen Experimenten. Die zur Beschreibung des Frischbetongemenges gewählten Simulationsparameter sind im oberen Abschnitt der Tabelle 7.1 zusammengestellt.

7.5.2 Füllausrüstung

Zur Abbildung der realen Füllausrüstung werden Füllwagen, Tischblech, Fertigungsunterlage und das Formunterteil auf der Eingabeoberfläche des Simulationsprogramms konstruiert. Als Füllaufgabe wird analog zu den Untersuchungen im industriellen Routinebetrieb die Fertigung von 48 Stück Rechtecksteinen im Format 20/10/8 gewählt. Zur Schaffung der komplexen Geometrien von Form und Füllkasten werden mehrere zweidimensionale Wandelemente im Baukastensystem miteinander verbunden.

Die bisher beschriebenen Untersuchungen haben gezeigt, dass bei gleicher Füllaufgabe Ausgangspositionen und/oder Dimensionen der Füllausrüstungen sehr unterschiedlich ausgelegt sein können. Die Abbildung 4.6 stellt maßstäblich unterschiedliche Ausgangssituationen an verschiedenen Steinformmaschinen mit gleicher Füllaufgabe dar. Die Dimensionierung des Systems für das numerische Experiment orientiert sich näherungsweise an den in [14] aufgenommenen Systemmaßen. Die Abbildung 7.8 stellt die für die Simulation gewählten Geometrieparameter in der Startposition des Füllwagens dar. Die Füllwagenkonstruktion wird für das numerische Experiment vereinfacht und auf den Füllkasten mit einem starren Rost und ohne Abstreifer reduziert.

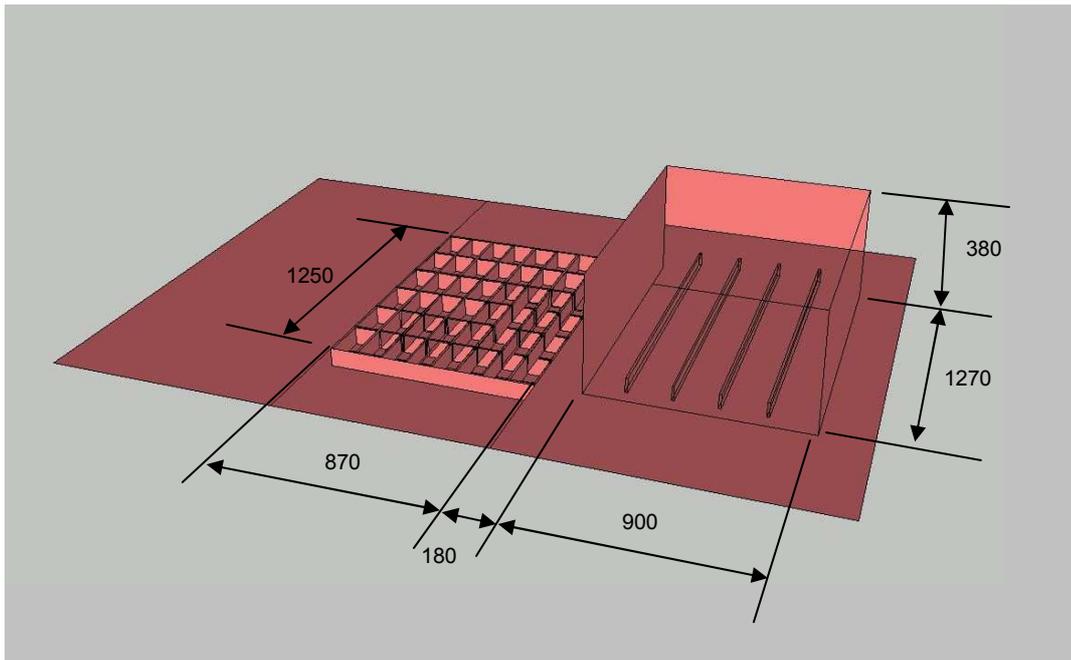


Abbildung 7.8: Gewählte Systemmaße der Füllanlage für das numerische Experiment (Bemaßung in mm)

7.5.3 Bewegung des Füllkastens

Die linearen Bewegungen des Füllkastens werden durch die Definition der Verschiebungsbeschleunigung, der Verschiebungsgeschwindigkeit und des Verschiebungsweges parametrisiert. Für die Wahl der Simulationsparameter werden die im industriellen Routinebetrieb ermittelten Bewegungsfunktionen zu Grunde gelegt. Das Diagramm in der Abbildung 7.9 zeigt die für das numerische Experiment definierte Weg-Zeit-Funktion des Füllkastens. In der Tabelle 7.1 sind die Bewegungsparameter zusammengestellt.

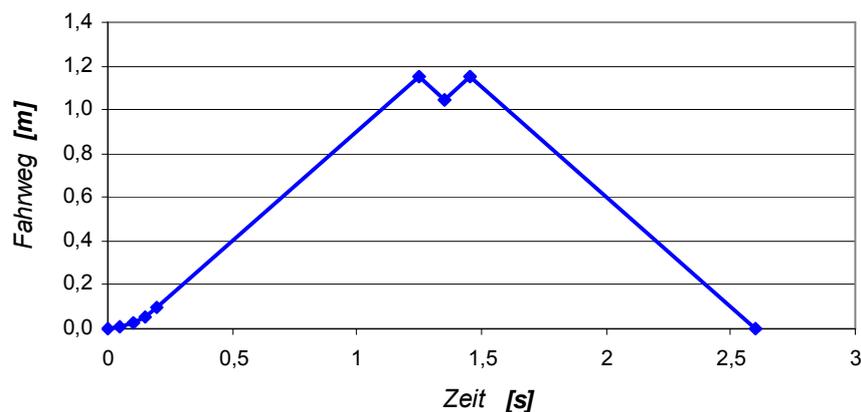


Abbildung 7.9: Bewegungsfunktion des Füllkastens für das numerische Experiment (Quelle:[53])

In dem numerischen Experiment wird im Bezug auf die bisherigen Untersuchungen mit einem Berechnungszyklus die Herstellung von 48 Betonsteinen in einem Fertigungszyklus simuliert. Zur Abbildung einer Versuchsreihe von aufeinander folgenden Zyklen wird das numerische Experiment 10 mal unter Variation des Füllungsgrades im Füllkasten

wiederholt. Ausgehend von der Transportmasse m_{TR} des 1. Zyklus (Tabelle 7.1) wird vor jedem weiteren, folgenden Zyklus die Transportmasse um 2 % reduziert. So sollen Schwankungen der Transportmasse von Zyklus zu Zyklus in die Simulation eingehen, die bei der Herstellung von 480 Steinen auftreten.

Tabelle 7.1: Übersicht ausgewählter Simulationsparameter

	Simulationsparameter	Kurzzeichen	Betrag	Maßeinheit
Gemenge	Kugeldichte	ρ_{Kugel}	2300	[kg/m ³]
	Kugeldurchmesser	d_{Kugel}	12 -16	[mm]
	Kugelanzahl	n_{Kugel}	18.026	
	Normalsteifigkeit	c_N	10.000	[N/m]
	Quersteifigkeit	c_Q	1.000	[N/m]
	Normaldämpfung	D_N	0,7	
	Querdämpfung	D_Q	0,7	
	Querreibungskoeffizient	μ_Q	0,7	
Füllausrüstung	Grundfläche des Transportraumes (Füllkasten)	A_{TR}	1,143	[m ²]
	Volumen im Transportraum	V_{TR}	0,43	[m ³]
	Schüttvolumen im Transportraum	V_{STR}	0,40	[m ³]
	Füllungsgrad im Transportraum	V_{TR} / V_{STR}	0,92	[m ³]
	Transportmasse	m_{TR}	374	[kg]
	Grundfläche des Füllraumes	A_{FR}	1,0875	[m ²]
	Höhe des Füllraumes (Formhöhe)	h_{FR}	0,08	[m]
	Füllraumvolumen	V_{FR}	0,0768	[m ³]
	je Zyklus zu füllende Masse	m_{Zsoll}	61,4	[kg]
	Füllflächenkennzahl	A_{TR} / A_{FR}	1,1	
	Transportmassenkennzahl	m_{TR} / m_{Zsoll}	6,1	
	Füllraumkennzahl	A_{FR} / V_{FR}	42,5	[m ⁻¹]
	Bewegung des Füllkastens	Fahrtweg des Füllwagens	s_{FK}	1,15
Pendelweg des Füllwagens		s_{PFK}	0,1	[m]
Beschleunigung des Füllwagens		a_{FK}	5	[m/s ²]
Fahrtgeschwindigkeit des Füllwagens		v_{FK}	1	[m/s]

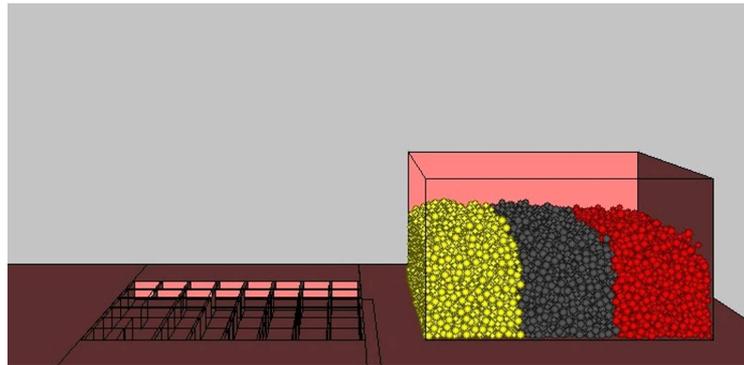
7.6 Simulationsergebnisse

7.6.1 Animation des Füllprozesses

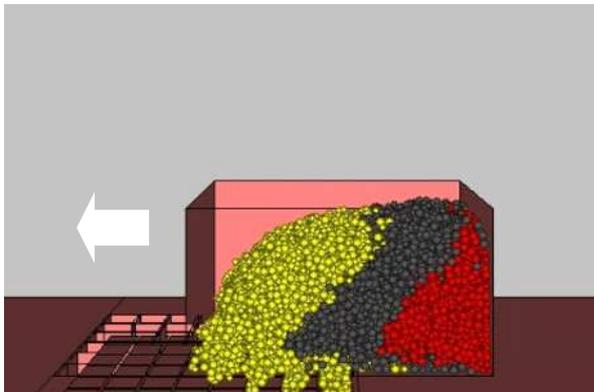
Um das Bewegungsverhalten der diskreten Elemente während des Füllprozesses besser detektieren zu können, werden die Kugeln in der Ausgangsposition des Füllkastens vertikal in drei gleich große Gruppen differenziert. Durch die Zuweisung unterschiedlicher Farben (Gelb, Schwarz, Rot) sollen im Prozessraum entstehende Fließprofile besser sichtbar gemacht werden. Um die sich im Prozessraum (Transportraum + Füllraum) ausbildenden Fließprofile gut beobachten zu können, werden die Strukturen von Form und Füllwagen partiell transparent gestaltet oder völlig ausgeblendet. Die Tabelle 7.2 zeigt ausgewählte Momentaufnahmen des numerischen Experimentes. Die Anlage 7.1 gibt darüber hinaus einen chronologisch geordneten Überblick der ermittelten Fließprofile über die gesamte Prozessdauer.

Die im Abschnitt 7.4 beschriebene Kalibrierung des Modells wurde insbesondere auf die Abbildung des Fließverhaltens des Gemenges während des Füllens ausgerichtet. Im Ergebnis stellt die Animation die Bewegungen des Betongemenges sehr wirklichkeitsnah dar. Trägheits- und schwerkraftverursachte Verschiebungen und Flüsse werden

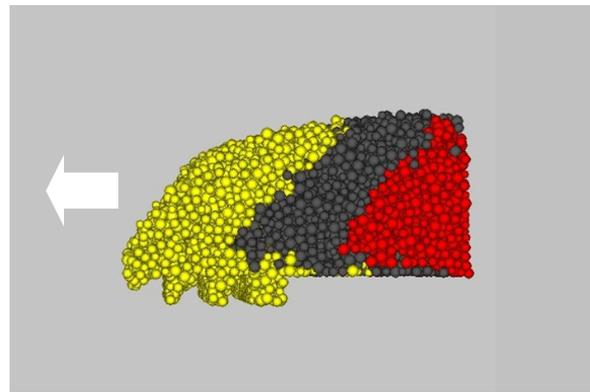
Tabelle 7.2: Übersicht ausgewählter Momentaufnahmen der Animation



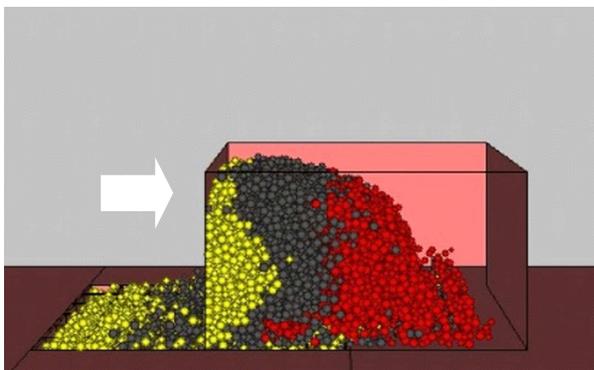
Figur 1: Grundstellung - Füllwagen vor dem Start des Füllens in 3D Darstellung



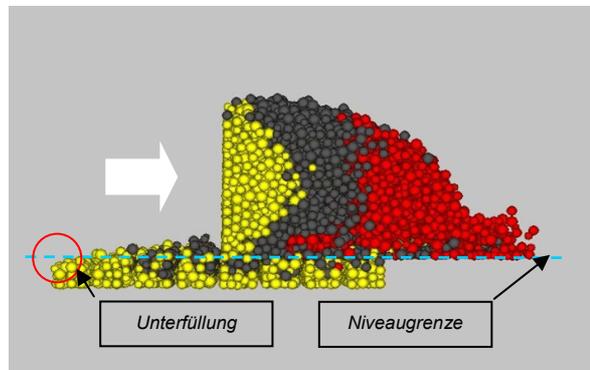
Figur 2: Füllwagen auf dem Weg nach vorn in 3D Darstellung



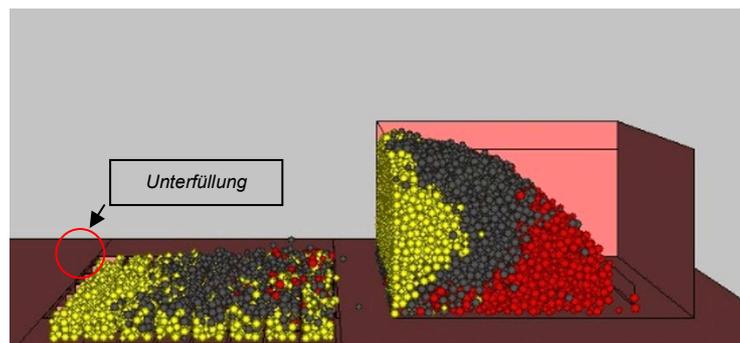
Figur 2.1: gleiche Position – Schnittdarstellung ohne Wandelemente



Figur 3: Füllwagen auf dem Weg zurück in die Grundstellung in 3D Darstellung



Figur 3.1: gleiche Position - Schnittdarstellung ohne Wandelemente



Figur 4: Grundstellung - Füllwagen am Ende des Füllens in 3D Darstellung

realistisch detektiert. Das gilt besonders für die trägheitsverursachten Gemengebewegungen im Füllkasten. Die Figuren 2 und 3 der folgenden Tabelle 7.2 zeigen Momentaufnahmen bei unterschiedlichen Fahrrichtungen mit entsprechend unterschiedlichen Haufwerksbildern im Füllkasten.

7.6.2 Füllungsgüte

Mit der virtuellen Darstellung kann erstmals die Zunahme des Füllungsgrades in den einzelnen Zellen im zeitlichen Verlauf sichtbar gemacht werden. Die Figur 2.1 der Tabelle 7.2 zeigt die erreichten unterschiedlichen Füllungsgrade in den ersten vier Zeilen bei fortschreitender Füllwagenbewegung. Mit der Momentaufnahme wird erkennbar, dass erst mit dem Überfahren der Mittelachse des gesamten Füllraumes die erste Zeile der Form näherungsweise vollständig ausgefüllt wird.

Im Ergebnis der Animation ist ebenfalls zu erkennen, dass die Massen m_i in Fertigungsrichtung abfallen. An der gefüllten Form nach Abschluss des Füllens (Figur 4) sind Unterschiede im Niveau des virtuellen Gemenges erkennbar. In der in Fertigungsrichtung vordersten Zeile wird die Unterfüllung (roter Kreis) bereits deutlich sichtbar.

Das Kompressionsverhalten des Modells zeigt geringe Unstimmigkeiten. Der aus dem Gemenge im Füllwagen resultierende Überdeckungsdruck führt zur Verdichtung in den gefüllten Zellen. Dabei stellen sich mit der gewählten Parametrierung, wie im Abschnitt 7.3 beschrieben, temporäre Reduzierungen der Schüttvolumina ein. Mit dem Entlasten der Zellen nimmt die gefüllte Schüttung wieder ihr vollständiges Volumen ein. Dabei werden die überzähligen Partikel wieder aus den Zellen herausgeschoben. Die unterbrochene blaue Linie in der Figur 3.1 (Tabelle 7.2) stellt die Oberkante der Form als Niveaugrenze dar. Die Partikel oberhalb der Niveaugrenze werden bei der Berechnung der gefüllten Massen m_i nicht erfasst und bleiben ohne Berücksichtigung für die Merkmalverteilung im Ergebnis der Simulation.

Für die erstmals durchgeführten Simulationen gibt es keine geeignete Grundlage zur Wahl eines Sollwertes m_{soll} . Begründet ist dies im stark vereinfachten Körnungsaufbau des Gemengemodells. Der "masselose Mörtel" und die außergewöhnlich enge Sieblinie erschweren die Definition eines anzustrebenden Sollwertes. Zur Berechnung der Füllungskennzahlen nach Gleichung

$$f_i = m_i / m_{ref} \quad (7.1)$$

wird daher das arithmetische Mittel der Stichprobe als Referenzwert $m_{ref} = \overline{m}_i$ gewählt. Die weitere Auswertung der Daten erfolgt in Analogie zu den Untersuchungen im Kapitel 4.

- Massenverteilungsmatrizen

Die Übersicht in der Abbildung 7.10 stellt die im Ergebnis des numerischen Experimentes ermittelten Massenverteilungsmatrizen dar. Die Farbabstufungen machen die Streuung der Massen innerhalb der virtuellen Fertigungseinheiten gut erkennbar. Der an Hand der Beispiele im Kapitel 4 gezeigte Trend, dass die Massen in Fertigungsrichtung systematisch abfallen, wird auch im Ergebnis des numerischen Experimentes abgebildet.

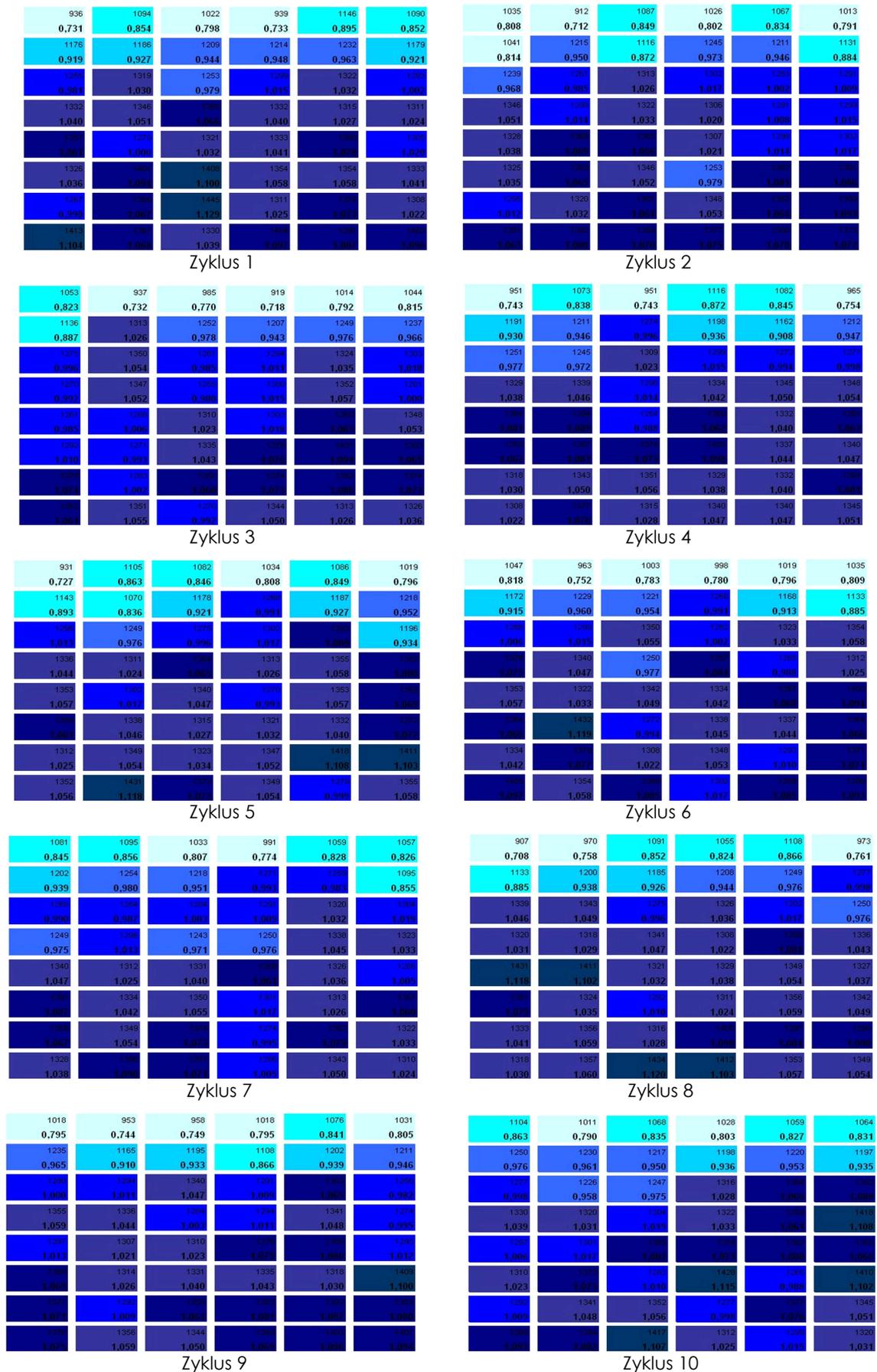


Abbildung 7.10: Massenverteilungsmatrizen im Ergebnis des numerischen Experimentes nach der Diskrete-Elemente-Methode (DEM)

Im Gegensatz zu den unter Kapitel 4 gezeigten Beispielen (Abbildungen 4.7 und 4.10) bleibt die Unterfüllung im Wesentlichen auf die beiden oberen Zeilen beschränkt. Besonders deutlich unterfüllt ist dabei jeweils die oberste Zeile der Matrizen. Mit der Darstellung der zellenbezogenen Durchschnittswerte (Abbildung 7.11) wird diese Tendenz eindeutig detektiert.

1006	1011	1028	1012	1072	1029
0,786	0,790	0,803	0,791	0,837	0,804
1168	1207	1207	1219	1214	1189
0,912	0,943	0,943	0,952	0,948	0,929
1277	1285	1281	1300	1327	1291
0,998	1,004	1,008	1,016	1,037	1,008
1324	1325	1303	1315	1335	1328
1,035	1,035	1,018	1,027	1,043	1,038
1338	1328	1329	1334	1354	1336
1,046	1,038	1,038	1,042	1,058	1,044
1347	1354	1332	1342	1348	1368
1,053	1,058	1,040	1,049	1,047	1,069
1328	1338	1355	1340	1371	1369
1,036	1,045	1,058	1,047	1,071	1,070
1355	1375	1361	1348	1348	1355
1,064	1,075	1,063	1,054	1,054	1,061

Abbildung 7.11: Mittelwertmatrize im Ergebnis des numerischen Experimentes nach der Diskrete-Elemente-Methode (DEM)

Eine Spaltenabhängigkeit, die die Unterschiede in der Massenverteilung senkrecht zur Fertigungsrichtung detektiert, ist in den Massenverteilungsmatrizen des numerischen Experimentes nicht zu erkennen. Diese Tatsache wird durch die Berechnungen der Streuungszersetzung nach Varianzursache unter Abschnitt 7.6.3 quantifiziert.

Nur 1 % des Einflusses auf die Massenverteilung wird im Ergebnis der Streuungszersetzung nach Variationsursache (ANOVA) der Spaltenabhängigkeit zugeordnet (Abbildung 7.13). Die Ursache dafür kann unter anderem in dem idealen, egalisierten Füllstandsniveau im Füllkasten zu Beginn der Simulation gesehen werden. Im realen Betrieb bildet sich, im Gegensatz zur Figur 1 der Tabelle 7.2, im Füllkasten ein Schüttkegel unterhalb des Fülltrichters aus. Dieser erzeugt, entsprechend dem unterschiedlichen Füllungslevel, unterschiedliche Druckverhältnisse senkrecht zur Fertigungsrichtung.

- Lage und Streuung der Masseverteilung

Wie bereits erwähnt, wird der Referenzwert m_{ref} für die Berechnung der Füllungskennzahlen im Ergebnis der Simulation mit dem arithmetischen Mittel \bar{m}_i der erzeugten Verteilung gleichgesetzt. Eine sollwertbezogene Bewertung der Lageparameter kann nicht erfolgen. Trotzdem werden die Lageparameter Minimum, Maximum und Median berechnet und am Mittelwert der Verteilung referenziert.

Die Streuungsmaße aus dem numerischen Experiment werden analog zum Abschnitt 3.1.3 mit der Berechnung der empirischen Standardabweichung s , der Spannweite R und dem empirischen Variationskoeffizienten V bestimmt. Die Tabelle 7.3 gibt einen Überblick der stichproben- und zyklusbezogenen ermittelten empirischen Kennwerte.

Das Diagramm in der Abbildung 7.12 bildet das Histogramm der im numerischen Experiment ermittelten Massenverteilung ab. Prägnant für die Verteilung ist die relativ große Spannweite bei rechtssteiler Form der Verteilung. Ebenfalls auffällig, ist die große Dissonanz zwischen Mittelwert und Modalwert. Erzeugt wird die große, linksseitige Streubreite durch die niedrigen Füllungskennzahlen in den jeweils ersten und zweiten Zeilen der Form.

Ein ausführlicher, bewertender Vergleich aller statistischen Kenngrößen des numerischen Experimentes wird im Kapitel 9 durch die Gegenüberstellung mit den Ergebnissen des Verifizierungsexperimentes gegeben.

Tabelle 7.3: Übersicht der empirischen Kennwerte der Massenverteilung im Ergebnis des numerischen Experimentes

empirische Kennwerte	Stichprobe $n=480$	Zyklen $n_z = 10$
Maximum f_{max}	1,130	1,006
Minimum f_{min}	0,709	0,993
Median $f_{0,5}$	1,027	1,000
Mittelwert f_{mittel}	1,000	1,000
Standardabweichung s	0,090	0,005
Spannweite R	0,421	0,013
Variationskoeffizient V	0,090	0,005

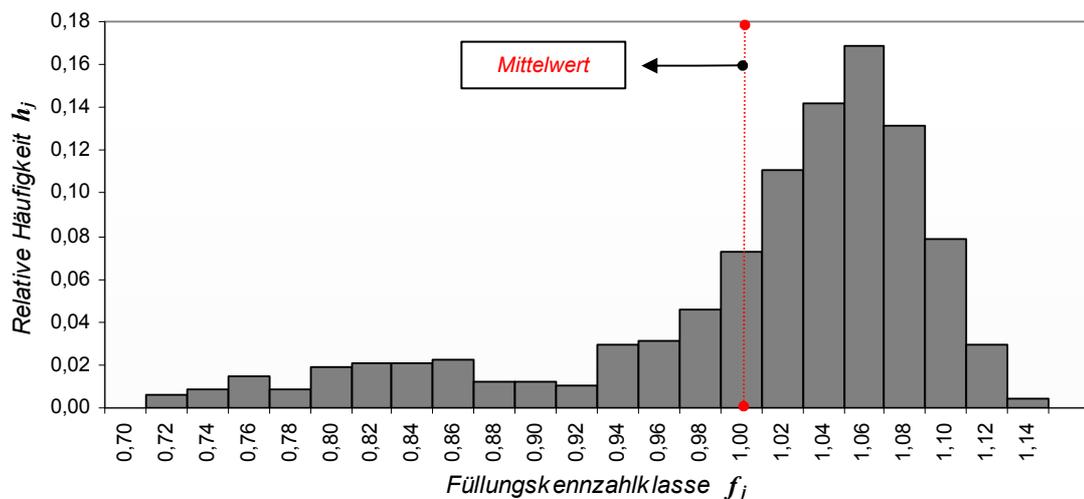


Abbildung 7.12: Histogramm mit Mittelwertmarke zur Darstellung der Massenverteilung im Ergebnis des numerischen Experimentes

7.6.3 Streuungszerlegung nach Variationsursache

Um die Wertigkeit der Einflussgrößen auf die Massenverteilung zu untersuchen, wurden die Daten einer Varianzanalyse nach Streuungszerlegung (Abschnitt 5.2) unterzogen. Das Kreisdiagramm in der Abbildung 7.13 stellt die Wertigkeit der Einflussgrößen gegenüber.

Der Einfluss der Zeilenlage auf die erreichbaren Massen m_i hat im numerischen Experiment die absolute Dominanz. Neben der Zeilenlage ist nur noch der Einfluss der Residuen (Resteinfluss) von Bedeutung. Spalten- und, Zykluslage sowie die Kombination von Zeilen- und Spaltenlage bleiben ohne signifikanten Einfluss.

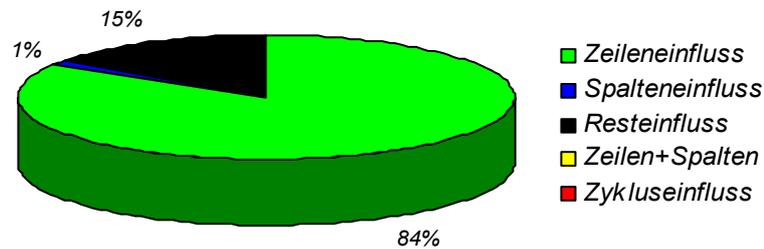


Abbildung 7.13: Streuungszerlegung nach berechneter Variationsursache für die Massenverteilung im Ergebnis des numerischen Experimentes

7.6.4 Zellendruck-Zeit-Funktion

Mit dem numerischen Experiment können nicht nur das Fließverhalten des Betongemenges, sondern auch die Kräfteverhältnisse in den Bauteilen der Füllaustrüstung ermittelt werden. Zur Bestimmung der Zellendruck – Zeit – Funktion (ZDZF) werden die Druckverhältnisse am Boden jeder Zelle mit fortschreitender Füllung aufgenommen und am Ende des Prozesses der eingefüllten Masse gegenübergestellt.

Im Rahmen der statistischen Auswertung wurden in [31] die Wechselbeziehungen zwischen der ZDZF und der jeweils erreichten Masse m_i untersucht. Die Abbildung 7.14 zeigt die Wertepaare m_i von $(pt_{\bar{v}})_i$. Ausgehend von der Annahme, dass eine logarithmische Korrelation zwischen beiden Größen besteht, wurden die Daten für die Durchführung der empirischen Regression transformiert. Mit der Errechnung eines Korrelationskoeffizienten von $\rho = 0,84$ kann die logarithmische Korrelation zwischen beiden Größen m_i und $(pt_{\bar{v}})_i$ für das numerische Experiment als gesichert betrachtet werden. Die Übersicht in der Anlage 7.2 zeigt exemplarisch die für einen Zyklus aufgenommenen Druck-Zeit-Funktionen in allen 48 Zellen einer ausgewählten virtuellen Fertigungseinheit.

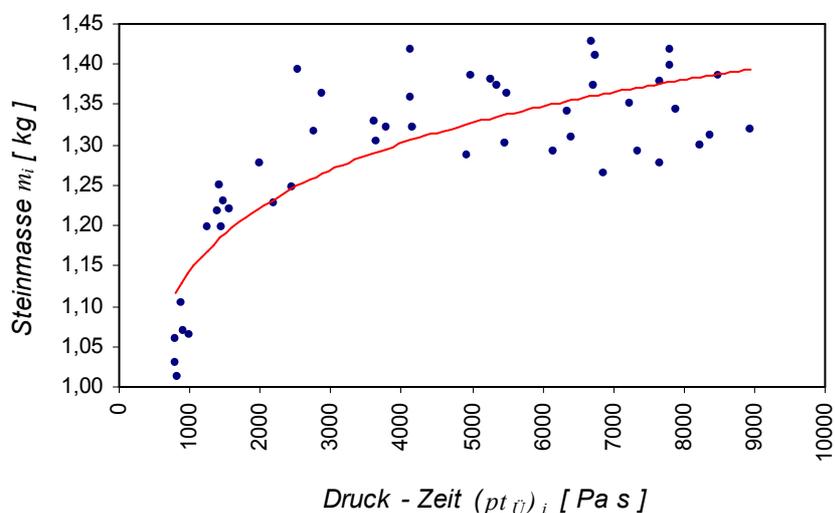


Abbildung 7.14: Diagramm zur Darstellung der Wechselbeziehung zwischen der erreichten Masse m_i und der Druckfunktion $(pt_{\bar{v}})_i$ in einer Zelle (Quelle[31])

8. Versuche zur Verifizierung des Simulationsmodells

Aufgabe der Verifizierungsversuche ist es, während eines realen Füllprozesses, die koordinaten- und zeitabhängige Druckfunktion $p(t)$ am Boden der Formzellen aufzunehmen. Darüber hinaus werden die Füllgüte im Ergebnis des Prozesses bestimmt sowie die Korrelationen zwischen den ermittelten Produkten aus mittlerem Überdeckungsdruck und Überdeckungszeit $(\bar{p}_{\bar{v}}t_{\bar{v}})_i$ und den jeweils eingefüllten Massen m_i untersucht. Für die Verifizierung wird die im Abschnitt 7.5 beschriebene Simulation als reales Experiment an einer speziellen Versuchseinrichtung unter definierten Randbedingungen nachgebildet. Die so erzeugten Ergebnisse bilden die Grundlage für die Verifizierung der Simulation. Die ausführliche Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Verifizierungsversuch und Simulation erfolgt im Kapitel 9.

Die Beobachtungen während der Versuchsdurchführung und die Auswertung der Ergebnisse sollen des Weiteren dazu dienen, den Füllprozess noch besser zu verstehen und weitere neue Erkenntnisse in das Gesamtmodell zur Simulation einfließen zu lassen.

8.1 Versuchseinrichtung

Für die realen Experimente wird der in der Abbildung 8.1 gezeigte Versuchstand "Betonsteinfertiger" im Technikum des IFF Weimar e.V. genutzt. Das Kernstück dieses Versuchstandes bildet eine modifizierte, konventionelle Steinformmaschine mit Kernfülleinrichtung. Peripher ist der Versuchstand zusätzlich mit einer Vielzahl unterschiedlicher Analyse- und Regeltechnik ausgestattet. Diese Technik macht es unter anderem möglich, die maschinentechnischen Einflussgrößen für Experimente zur Formgebung und Verdichtung wesentlich präziser als beispielsweise im industriellen Routinebetrieb aufzunehmen und abzustimmen.

Der Antrieb des Füllwagens wird durch zwei elektronisch synchronisierte Servomotoren realisiert. Diese stellen eine präzise Einstellung der angestrebten Bewegungsfunktion des Füllwagens sicher und garantieren gleichzeitig eine hohe Reproduzierbarkeit von Versuchszyklus zu Versuchszyklus. Zur Abbildung des Füllraumes steht für die Experimente eine 24-teilige Rechteckform 20/10/8 zu Verfügung.



Abbildung 8.1: Versuchstand "Betonsteinfertiger" im Technikum des IFF Weimar e.V

Die schematische Darstellung in der Abbildung 8.2 stellt die Geometrieparameter des Füllkastens und des Formunterteils der Versuchseinrichtung dar. Die Füllwagenkonstruktion verfügt, wie im numerischen Experiment, über einen einfachen Füllkasten mit starrem Rost.

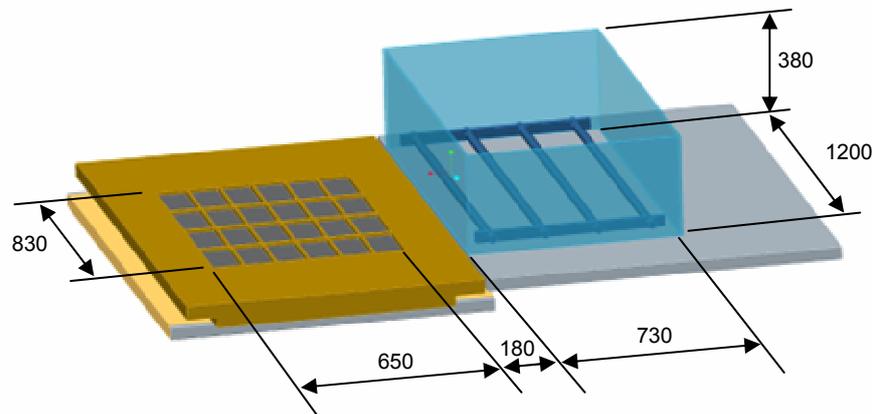


Abbildung 8.2: Systemmaße der Füllausrüstung für das reale Experiment (Maße in mm)

8.2 Messeinrichtung

Um die Messung des Druckes am Boden der Zellen während des Füllens möglich zu machen, wurde mit Unterstützung der Messstelle des IFF Weimar e.V. ein neuer Sensor entwickelt und kalibriert. Ein solcher Sensor besteht jeweils aus einer auf die Kontur der Formzelle abgestimmten Biegeplatte aus Stahl. Geometrie und Fertigungsgenauigkeit der Biegeplatte sind präzise auf die Einbaulage und die Messaufgabe abgestimmt. Die Auflager der Platte werden durch zwei an der Unterseite senkrecht zur Längsachse fixierte Quadratprofilstifte gebildet. Im Zentrum der Plattenunterseite ist ein Dehnmessstreifen mit Wheatstone-Messbrücke aufgeklebt. Zur Ausführung des Messkabels aus dem Prozessraum wird jeweils unterhalb des Dehnmessstreifens eine Bohrung in das Unterlagsbrett eingebracht. Die Abbildung 8.3 stellt den Aufbau und die Einbaulage des Biegesensors dar.

Während der fortschreitenden Füllung der Zelle mit Betongemenge kommt es zur elastischen Deformation des Biegesensors und damit zur Widerstandsänderung in der Messbrücke. Das erzeugte analoge Spannungs-Zeitsignal ist dem Druck am Zellenboden proportional. Das so generierte Messsignal wird verstärkt, digitalisiert und mit einem Mess- und Auswerterechner gespeichert und analysiert. Für die Messungen werden 6 Messkanäle präpariert. Der Aufbau der Messkette zur Aufnahme der Zellendruck-Zeit-Funktion wird mit dem Schema in der Abbildung 8.4 beschrieben. Zur Protokollierung und Auswertung der Messungen wird eine entsprechend modifizierte Microsoft-EXCEL Datei genutzt.

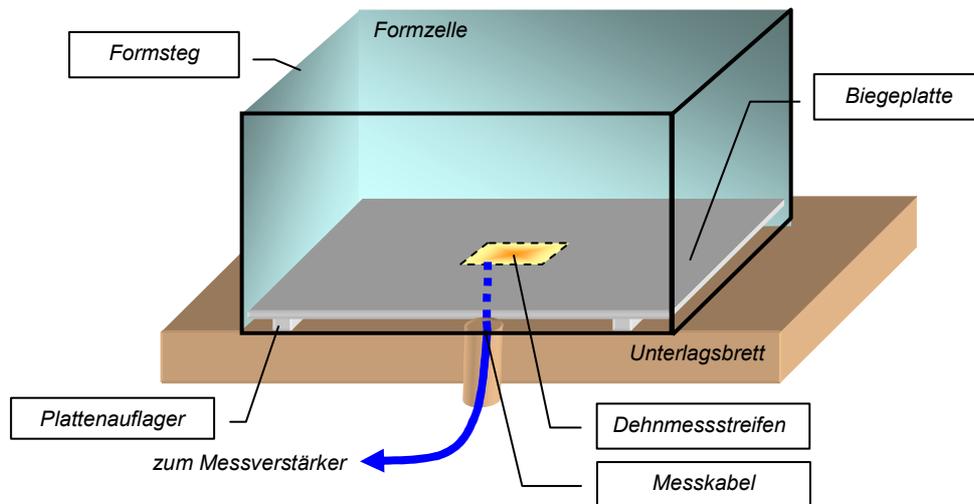


Abbildung 8.3: Drucksensor aus Biegeplatte mit Dehnmessstreifen zur Messung der ZDZF am Boden der Formzelle

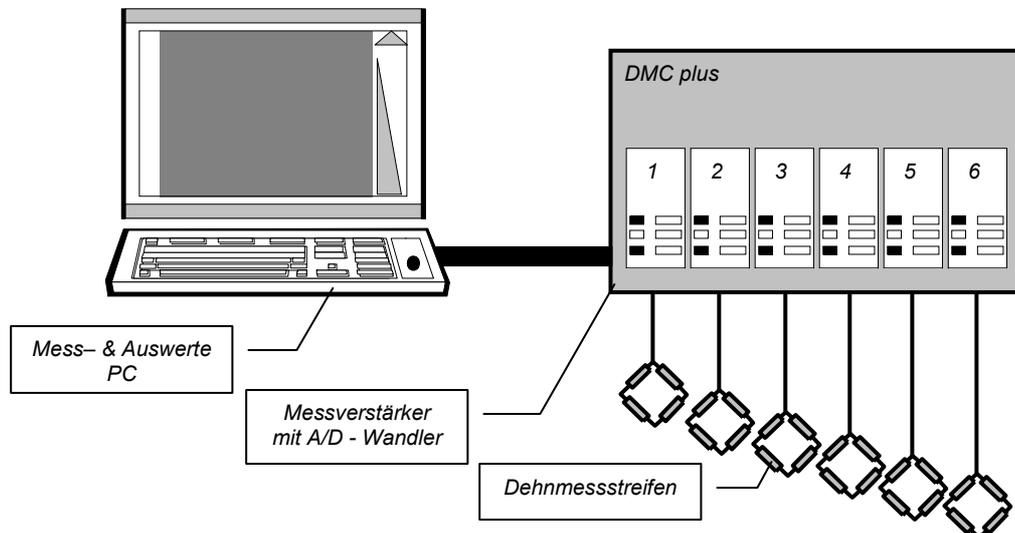


Abbildung 8.4: Messkette zur Aufnahme der Zellen-Druck-Zeit-Funktion während der Füllung im realen Experiment

Für die Versuchsdurchführung werden die 6 Zellen der Spalte 3 für die Aufnahme der Biegesensoren genutzt. Um während der Füllung in allen 24 Zellen des zu befüllenden Raumes die gleichen Ausgangsbedingungen im Füllraum sicherzustellen, werden in den 18 anderen Zellen Biegeplatten ohne Messfunktion eingelegt. Die Abbildung 8.5. zeigt die Positionen der 6 Drucksensoren innerhalb der zu fertigenden Einheit.

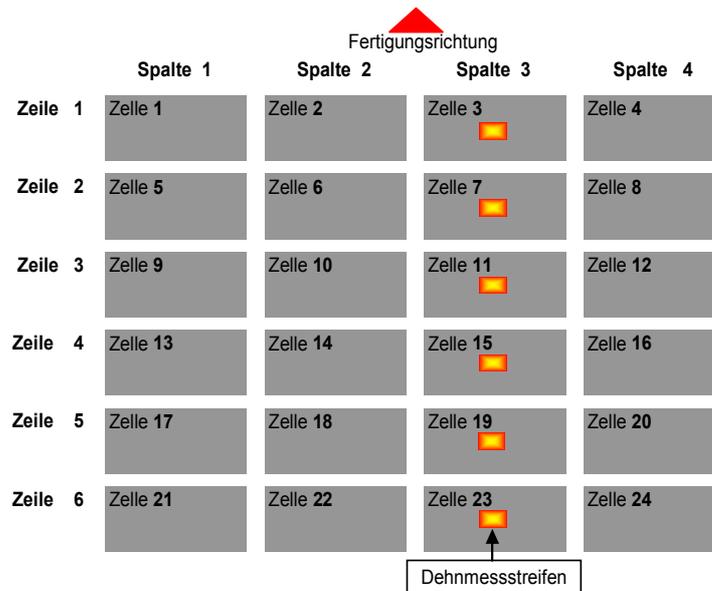


Abbildung 8.5: Position der Drucksensoren innerhalb der zu fertigenden Einheit

8.3 Durchführung des Verifizierungsversuchs

Versuchsgemenge

Für die Durchführung des Experimentes wird ein inertes Gemenge hergestellt. Der Mengenanteil des Zementes wird dabei durch ein Kalksteinmehl aus der Zementproduktion substituiert. Die darüber hinaus verwendeten Rohstoffe und Mengenanteile entsprechen einer ausgewählten Kernbetonrezeptur (Kapitel 4 - Steinformmaschinen 1 und 2) aus der industriellen Fertigung. Für das Mischen der Komponenten steht ein 200-Liter-Ringtrommischer zur Verfügung. Die Tabelle 8.1 beschreibt die Rohstoffe und Mengenanteile je m^3 und je Charge.

Tabelle 9.1: Gemengerezeptur für die Verifizierungsversuche

Material	Kurzzeichen	Material	Masse pro m^3 Beton		Masse pro Charge	
Zementsubstitut	GM	Kalksteinmehl	210	kg/m^3	18	kg
Zusatzstoff	FA	Steinkohlenflugasche	90	kg/m^3	8	kg
Sand	0/2	Quarz	483	kg/m^3	42	kg
Sand	1/2	Quarzporphyr	353	kg/m^3	31	kg
Kies	2/8	Quarzporphyr	687	kg/m^3	60	kg
Kies	8/16	Quarzporphyr	334	kg/m^3	29	kg
Wasser	H ₂ O		143	kg/m^3	12	kg
Summe:			2300	kg/m^3	200	kg

Versuchsparameter

Um das reale Experiment für die Verifizierung der Simulation nutzen zu können, wird die Bewegungsfunktion des Füllkastens bezüglich Beschleunigung und Geschwindigkeit am Versuchsstand nachgebildet. Auf eine die Füllung unterstützende Vibration wird wie auch in der Simulation verzichtet. Die Darstellung der Größen- und Massenverhältnisse aus der Simulation ist auf Grund der differenten Relationen an der Versuchseinrichtung nur näherungsweise möglich. Die Tabelle 8.2 gibt einen Überblick der Versuchsparameter.

Tabelle 8.2: Übersicht der Versuchsparameter

Simulationsparameter	Kurzzeichen	Betrag	Maßeinheit
Grundfläche des Transportraumes (Füllkasten)	A_{TR}	0,876	[m ²]
Volumen im Transportraum	V_{TR}	0,33	[m ³]
Schüttvolumen im Transportraum	V_{STR}	0,25	[m ³]
Füllungsgrad im Transportraum	V_{TR} / V_{STR}	0,75	[m ³]
Transportmasse	m_{TR}	400	[kg]
Grundfläche des Füllraumes	A_{FR}	0,52	[m ²]
Höhe des Füllraumes (Formhöhe)	h_{FR}	0,078	[m]
Füllraumvolumen	V_{FR}	0,0348	[m ³]
je Zyklus zu füllende Masse	m_{Zsoll}	58,9	[kg]
Füllflächenkennzahl	A_{TR} / A_{FR}	1,68	
Transportmassenkennzahl	m_{TR} / m_{Zsoll}	6,8	
Füllraumkennzahl	A_{FR} / V_{FR}	41,75	[m ⁻¹]
Fahrweg des Füllwagens	s_{FK}	0,935	[m]
Pendelweg des Füllwagens	s_{PFK}	0,1	[m]
Beschleunigung des Füllwagens	a_{FK}	5	[m/s ²]
Fahrgeschwindigkeit des Füllwagens	v_{FK}	1	[m/s]

Versuchsdurchführung

Mit der Versuchseinrichtung werden 10 Füllzyklen durchgeführt. Jeweils mit dem Start des Füllwagens beginnt die Messung der Druck-Zeit-Funktion in den ausgewählten Zellen. Parallel dazu werden für die Dokumentation des Bewegungsverhaltens des Gemenges Videosequenzen aufgezeichnet. Die archivierten Daten stehen in einer separaten Datenbank für weiterführende Betrachtungen und Analysen zur Verfügung.

Nach Abschluss des Füllens wird die zu fertigende Einheit nur leicht verdichtet und anschließend entschalt. Unmittelbar nach der Entschalung werden die Frischbetonkörper bereits vom Unterlagsbrett genommen und verwogen. Die Editierung und Auswertung der Messdaten erfolgt in Analogie zu der im Kapitel 3 beschriebenen Methode. Sind alle Steinmassen m_i eines Zyklus erfasst und editiert, werden Form und Unterlagsbrett für den nachfolgenden Zyklus präpariert.

8.4 Versuchsergebnisse

8.4.1 Füllungsgüte

Massenverteilungsmatrizen

Die Übersicht in der Abbildung 8.6 stellt die im Ergebnis des Verifizierungsversuchs ermittelten Massenverteilungsmatrizen dar. Die Farbabstufung zeigt folgerichtig auch im Ergebnis des realen Experimentes einen systematischen Abfall der Massen in Fertigungsrichtung an. Ebenfalls erkennbar sind Schwankungen der Zyklusmassen sowie unterschiedliche Streuungen innerhalb der gefertigten Einheiten.

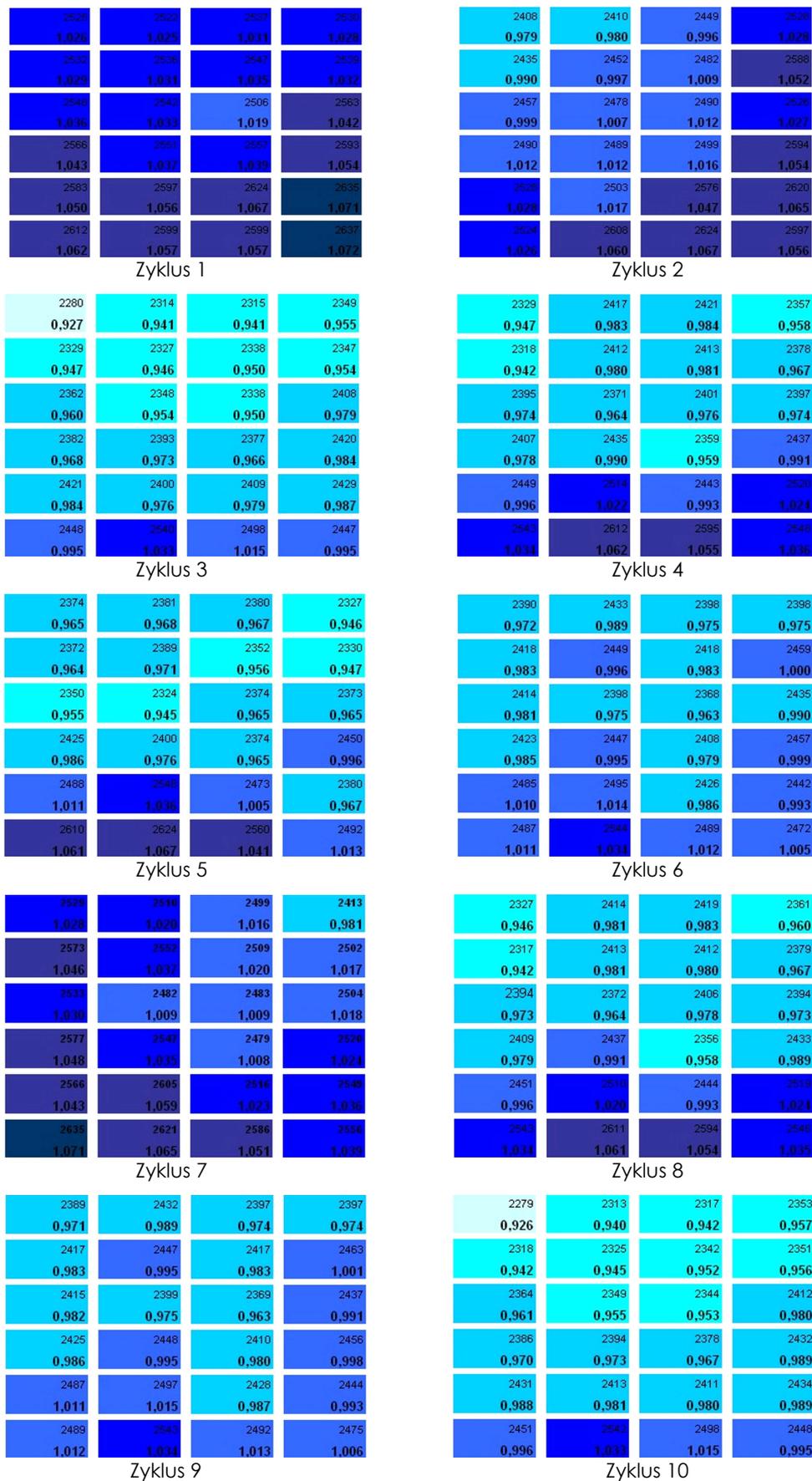


Abbildung 8.6: Massenverteilungsmatrizen im Ergebnis des realen Experimentes am Versuchstand "Steinfertiger" des IFF Weimar e.V.

Lage und Streuung der Masseverteilung

Unter den gegebenen Versuchsbedingungen gibt es keine geeignete Grundlage für die Wahl eines Sollwertes m_{soll} . Daher wird analog zu den Auswertungen der Simulation, der Referenzwert m_{ref} zur Berechnung der Füllungskennzahlen dem arithmetischen Mittel \bar{m}_i der Verteilung gleichgesetzt.

Die Streuungsmaße aus dem realen Experiment werden analog dem Abschnitt 3.1.3 mit der Berechnung der empirischen Standardabweichung s , der Spannweite R und dem empirischen Variationskoeffizienten V bestimmt. Die Tabelle 8.3 gibt einen Überblick der stichproben- und zyklenbezogen ermittelten empirischen Kennwerte.

Tabelle 8.3: Übersicht der empirischen Kennwerte der Massenverteilung im Ergebnis des realen Experimentes

empirische Kennwerte	Stichprobe $n=240$	Zyklen $n_z = 10$
Maximum f_{max}	1,074	1,045
Minimum f_{min}	0,928	0,971
Median $f_{0,5}$	0,995	0,993
Mittelwert f_{mittel}	1,000	1,000
Standardabweichung s	0,035	0,025
Spannweite R	0,146	0,074
Variationskoeffizient V	0,035	0,025

Das Diagramm in der Abbildung 8.7 bildet das Histogramm der im realen Experiment ermittelten empirischen Verteilungsdichte ab. Mittelwert und Modalwert liegen bei der gewählten Klassenbreite im Gegensatz zum Histogramm des numerischen Experimentes (Abbildung 7.12) deckungsgleich übereinander. Die Streubreite der Merkmalsverteilung innerhalb der Stichprobe ist im Vergleich zum numerischen Experiment deutlich geringer.

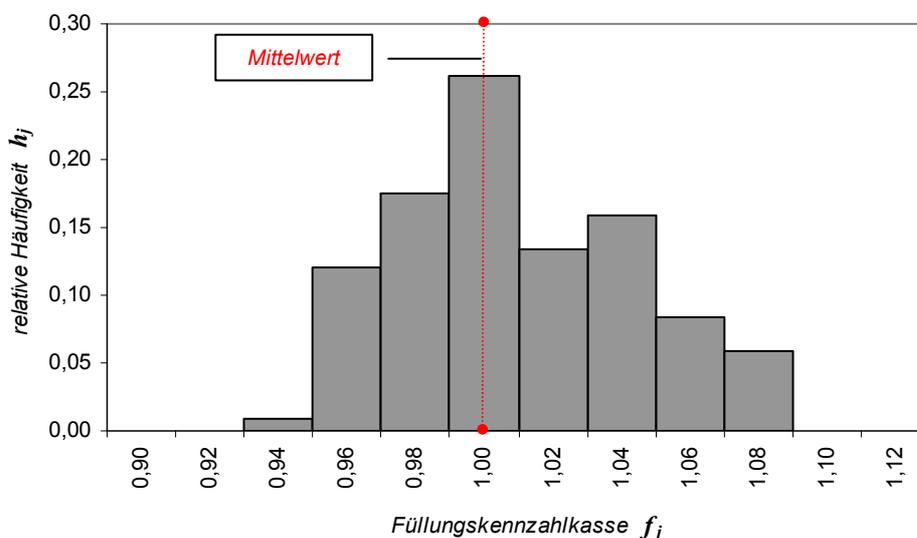


Abbildung 8.7: Histogramm mit Mittelwertmarke zur Darstellung der Massenverteilung im Ergebnis des realen Experimentes

8.4.2 Einflussfaktoren auf die Verteilung der Steinmassen

Um die Wertigkeit der Einflussgrößen Zellenlage, Zyklusfolge und Residuen auf die Massenverteilung zu untersuchen, wurden die Daten einer Varianzanalyse in Analogie zu Abschnitt 5.2 unterzogen. Das Kreisdiagramm in der Abbildung 8.8 stellt die errechneten Wertigkeiten der Einflussgrößen im Vergleich dar. Der Einfluss der Zeilenlage auf die erreichbaren Massen m_i dominiert dabei auch im Ergebnis des realen Experimentes eindeutig.

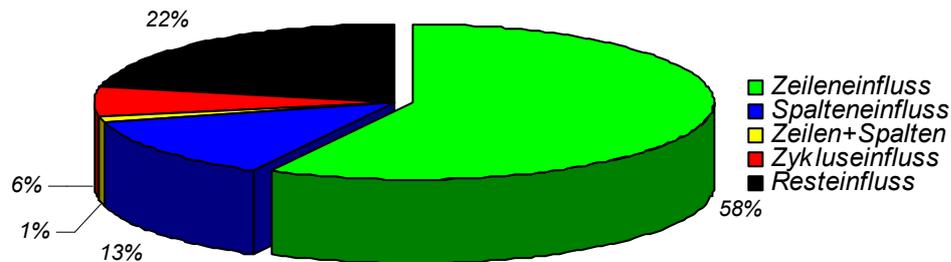


Abbildung 8.8: Streuungszersetzung nach berechneter Variationsursache für die Massenverteilung im Ergebnis des numerischen Experimentes

Der Einfluss der Zellenlage innerhalb der zu fertigenden Einheit (Zeilen- und Spalteneinfluss sowie die Wechselwirkung zwischen Zeilen- und Spalteneinfluss) erreicht einen Wert von insgesamt 72 %. Zyklus- und Resteinfluss bleiben mit 28 % gering. Eine umfassende Bewertung der Ergebnisse erfolgt im Rahmen der Gegenüberstellungen im Kapitel 9.

8.4.3 Zellendruck-Zeit-Funktion

Während der Verifizierungsversuche werden die Drücke am Boden der ausgewählten Zellen gemessen. Das Diagramm in der Abbildung 8.9 zeigt exemplarisch die aufgenommenen Druckprofile in den sechs ausgewählten Zellen während des ersten Versuchszyklus. Die Übersicht in der Anlage 8.1 stellt alle aufgenommenen Zellendruck-Zeit-Funktionen in Einzeldiagrammen gegenüber.

Die Druckprofile zeigen den im Resultat der geradlinigen Füllkastenbewegung nacheinander einsetzenden steilen Druckanstieg, der den Beginn des Füllprozesses in den einzelnen Zellen markiert. Nach Abschluss des steilen Druckanstieges werden im Verlauf weitere relativ starke Druckschwankungen gemessen. Insbesondere die Richtungsänderungen des Füllwagens erzeugen temporär einen Abfall des Druckniveaus. So wird beispielsweise der Umkehrpunkt des Füllwagens durch einen Druckabfall innerhalb eines Zeitabschnitts von 0,2 Sekunden in der Zellendruck-Zeit-Funktion deutlich detektiert (Abbildung 8.9). Dies ist ein deutlicher Hinweis auf die Ausbildung von variierenden Spannungen in der Scherebene des Prozessraumes, verursacht durch die Wechselwirkungen zwischen dem bereits in den Füllraum eingebrachten Gemenge und dem mit dem Füllkasten bewegten Gemenge. Scher- und gegebenenfalls sogar Zugspannungen im Prozessraum können den Druckabfall am Zellenboden erzeugen. Ebenfalls gut detektiert wird der nacheinander einsetzende steile Druckabfall, der das Ende des Füllprozesses in den einzelnen Zellen markiert. Mit

den sehr unterschiedlichen Abständen zwischen Druckanstieg und Druckabfall auf der Zeitachse (Abbildung 8.9) werden die differenten Überdeckungszeiten der einzelnen Zellen sichtbar.

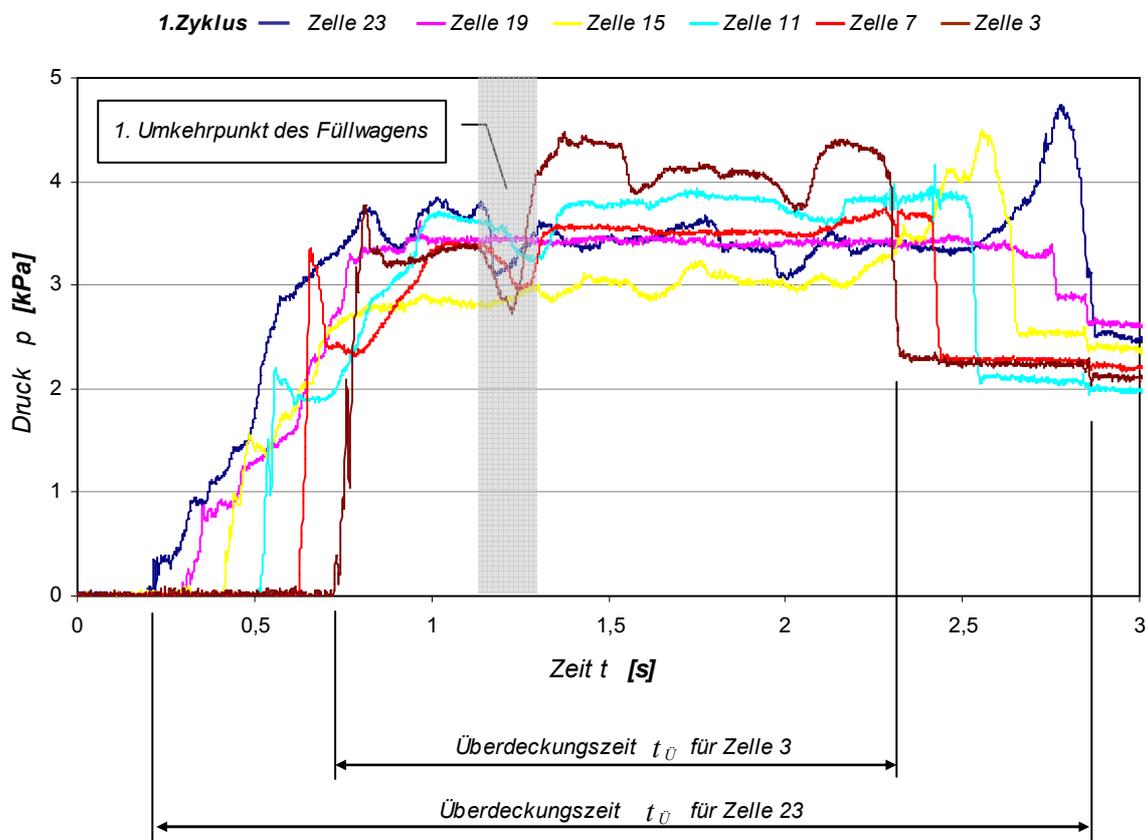


Abbildung 8.9: Zellendruck-Zeit-Funktionen während des ersten Füllzyklus der Verifizierungsversuche

Das sich am Ende der Füllung einstellende Druckniveau am Boden der Zellen korreliert gut mit der je Zelle eingebrachten Füllmasse m_i beziehungsweise der errechneten Füllungskennzahl f_i . Die Abbildung 8.10 stellt die im Ergebnis erzeugte Massenverteilungsmatrix dar. Der Vergleich der beiden Abbildungen 8.9 und 8.10 zeigt am Beispiel des ersten Füllzyklus, dass die Rangfolge des je Zelle erreichten Druckniveaus am Ende der Füllung und die Rangfolge der je Zelle eingefüllten Masse übereinstimmen.

Die während der vollständigen Überdeckung gemessenen Druckschwankungen betragen bis zu $\max \Delta p = 1.650 \text{ Pa}$. Der Maximalwert des am Zellenboden gemessenen Druckes beträgt $\max p = 5.128 \text{ Pa}$ (Zelle 11, Zyklus 2). Ebenfalls stark variieren die gemessenen Überdeckungszeiten. Die minimale gemessene Überdeckungszeit beträgt $\min t_U = 0,698 \text{ s}$ (Zelle 3, Zyklus 5). Die maximale gemessene Überdeckungszeit beträgt $\max t_U = 2,645 \text{ s}$ (Zelle 23, Zyklus 1) und nimmt einen 3,8fachen Wert gegenüber dem Minimum $\min t_U$ ein. Das Verhältnis zwischen allen in den Zellen 3 und 23 gemessenen Überdeckungszeiten beträgt durchschnittlich etwa $\bar{t}_{U,23} / \bar{t}_{U,3} \approx 2/1$. Damit werden die in der Kinematik des Füllwagens begründeten unterschiedlichen Bedingungen während des Füllens ausreichend quantifiziert.

Des Weiteren werden im Ergebnis der zellenbezogenen Druckmessungen die realen Wechselbeziehungen zwischen der ZDZF und der jeweils erreichten Masse m_i

untersucht. Dazu werden aus den experimentell ermittelten Funktionen $p=f(t)$ die mittleren während der Überdeckungszeit wirkenden Drücke $\bar{p}_{\dot{U}}$ berechnet.

Fertigungsrichtung

2525 1,026	2522 1,025	Zelle 2537 3 1,031	2530 1,028
2532 1,029	2536 1,031	Zelle 2547 7 1,035	2539 1,032
2548 1,036	2542 1,033	Zelle 2506 11 1,019	2563 1,042
2566 1,043	2551 1,037	Zelle 2557 15 1,039	2593 1,054
2583 1,050	2597 1,056	Zelle 2624 19 1,067	2635 1,071
2612 1,062	2599 1,057	Zelle 2599 23 1,057	2637 1,072

Abbildung 8.10: Massenverteilungsmatrix mit ZDZF Marken im Ergebnis des ersten Füllzyklus des Verifizierungsversuches

Zur Ermittlung der Fläche zwischen dem Graphen und der Abszisse werden zunächst der Anfangszeitpunkt t_A (Beginn steiler Druckanstieg) und der Endzeitpunkt t_E (Beginn steiler Druckabfall) als untere und obere Grenze definiert. Die Fläche zwischen dem Funktionsgraphen und der Abszisse innerhalb der Grenzen wird im Auswerteprogramm mit Hilfe des Trapezverfahrens bestimmt. Mit der Berechnung der Überdeckungszeit $t_{\dot{U}}$ nach

$$t_{\dot{U}} = t_E - t_A \quad (8.1)$$

kann der mittlere Überdeckungsdruck am Boden der Zelle $\bar{p}_{\dot{U}}$ nach

$$\bar{p}_{\dot{U}} = \frac{A_{ZDZF}}{t_{\dot{U}}} \quad (8.2)$$

berechnet werden. Der Flächeninhalt der ZDZF als mittleres Druckprofil

$$A_{ZDZF} = \bar{p}_{\dot{U}} \cdot t_{\dot{U}} = \int_{t_A}^{t_E} p(t) dt \quad (8.3)$$

soll ein Indikator für Wirkung von Überdeckungsdruck während der zur Verfügung stehenden Überdeckungszeit sein.

Die Abbildung 8.11 zeigt beispielhaft eine während der Verifizierungsversuche aufgenommene Zellendruck-Zeit-Funktion. Der Funktionsverlauf und der zu berechnende Flächeninhalt werden grau dargestellt. Die rote Linie markiert das Niveau des mittleren Druckes während der Überdeckungszeit am Zellenboden. Zur Untersuchung der Wechselbeziehungen zwischen der erreichten Masse m_i und dem Produkt aus mittlerem Druck und Überdeckungszeit $(\bar{p}_{\dot{U}} t_{\dot{U}})_i$ wird im ersten Schritt die einfache lineare Regression angewandt. Nach der Prüfung des Merkmals $(\bar{p}_{\dot{U}} t_{\dot{U}})_i$ nach

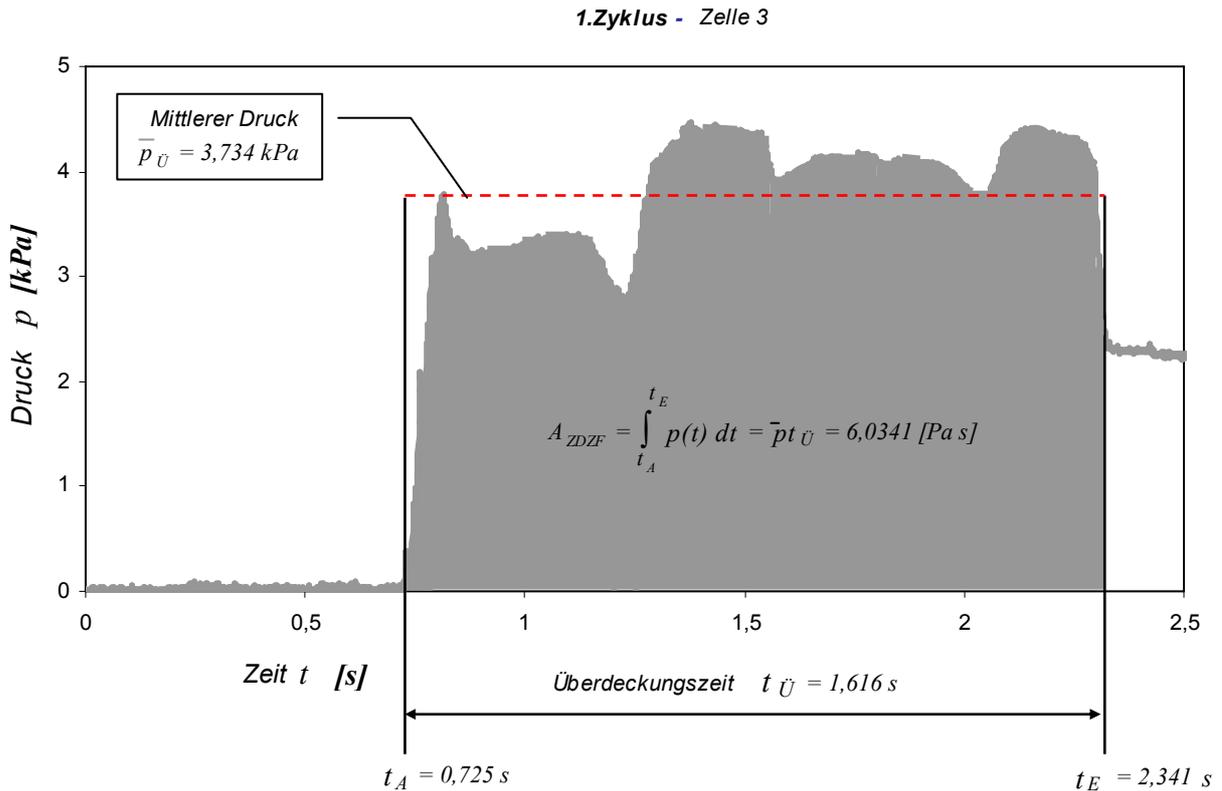


Abbildung 8.11: Zellendruck-Zeit-Funktionen in der Zelle 3 während des ersten Füllzyklus der Verifizierungsversuche

Gleichung 5.1 auf Normalverteiltheit ($n=42$) wird als Maß für die Wechselbeziehungen der empirische Korrelationskoeffizient ρ nach Gleichung 5.2 ermittelt. Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten weist mit einem Wert von $\rho = 0,778$ eine ausgeprägte Wechselbeziehung zwischen dem Produkt aus den beiden Einflussgrößen Überdeckungsdruck und Überdeckungszeit und der erreichten Steinmasse aus. Das Bestimmtheitsmaß beträgt damit $SQE/SQT = 0,605$. Die Abbildung 8.12 zeigt das Streudiagramm der Wertepaare m_i und $(\bar{p}_{\bar{U}} t_{\bar{U}})_i$.

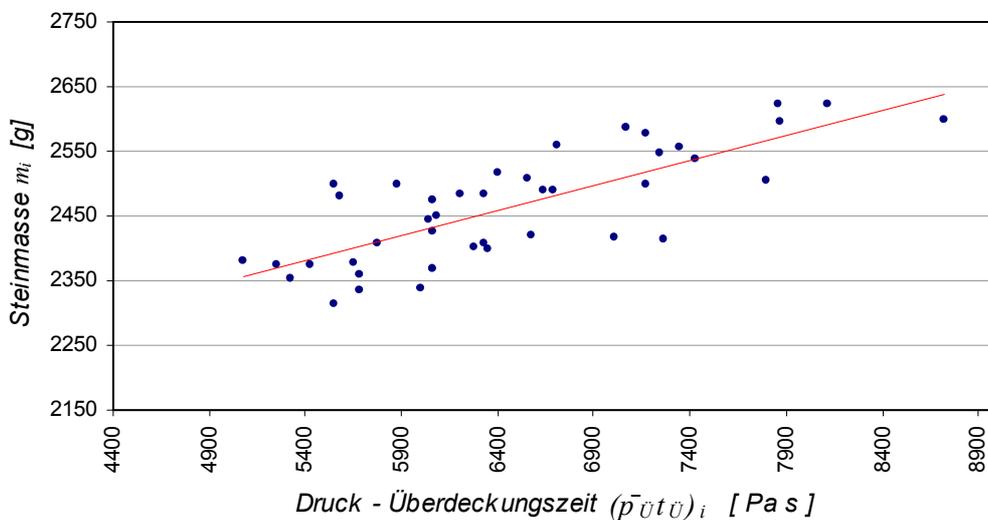


Abbildung 8.12: Diagramm zur Darstellung der Wechselbeziehung zwischen der erreichten Masse m_i und dem Produkt aus mittlerem Druck und Überdeckungszeit

Die Eignung der gemessenen ZDZF und des berechneten mittleren Druckprofils als Indikator für die Qualität des Prozessverlaufes und des Prozessergebnisses ist damit dokumentiert.

Das im Kapitel 6 entwickelte vereinfachte Modell zur Beschreibung des Füllprozesses weist auf unterschiedliche Einflüsse von Druck und Zeit auf die Steinmasse (Gleichung 6.5) hin. Um die Wertigkeit der im Verifizierungsversuch gemessenen Einflussgrößen Überdeckungszeit und Überdeckungsdruck auf die erreichte Steinmasse m untersuchen zu können, werden beide Einflussgrößen getrennt in ihrer Wirkung dargestellt. Dafür wird zunächst ein multiples nicht lineares Modell mit der Gleichung

$$m = c \cdot t_{\bar{U}}^{\alpha} \cdot \bar{p}_{\bar{U}}^{\beta} \quad (8.4)$$

erstellt. Dabei stehen m für die eingefüllte Gemengemasse pro Einheit, $t_{\bar{U}}$ für die Überdeckungszeit und $\bar{p}_{\bar{U}}$ für den mittleren Überdeckungsdruck am Boden einer Zelle. Die Exponenten α und β stehen jeweils für die Wertigkeit der Einflussgrößen Überdeckungszeit und Überdeckungsdruck. Der Index c steht für eine Konstante innerhalb des Modells.

Durch Logarithmieren wird die Gleichung 8.4 in ein multiples lineares Regressionsmodell

$$\ln(m) = \ln(c) + \alpha \cdot \ln(t_{\bar{U}}) + \beta \cdot \ln(\bar{p}_{\bar{U}}) \quad (8.5)$$

transformiert.

Das Modell setzt voraus, dass jede Masse m_i in der Ebene $\ln(c) + \alpha \cdot \ln(t_{\bar{U}}) + \beta \cdot \ln(\bar{p}_{\bar{U}})$ liegen soll und nur um einen zufälligen, nicht erklärten Fehler aus dieser Ebene ausgelenkt wird. Die Parameter c , α und β werden durch die Minimierung der Fehlerquadratsumme

$$\left(\sum_{i=1}^{42} (\ln(m_i) - (\ln(c) + \alpha \cdot \ln(t_{\bar{U}}) + \beta \cdot \ln(\bar{p}_{\bar{U}})))^2 \right) \quad (8.6)$$

berechnet. Für die vorliegenden Messdaten ergeben sich die folgenden geschätzten Parameter $c = 433,053$, $\alpha = 0,309$ und $\beta = 0,185$. Somit errechnet sich die geschätzte Masse aus

$$m = 433 \cdot t_{\bar{U}}^{0,309} \cdot \bar{p}_{\bar{U}}^{0,185} \quad (8.7)$$

Um die Zuverlässigkeit der abgeleiteten Beziehung einschätzen zu können, wird eine Streuungszerlegung nach

$$\begin{array}{ccccccc} SQT & = & SQE & + & SQR & . & \\ \text{Totale Variation} & & \text{Erklärte Variation} & & \text{Restvariation} & & \end{array} \quad (8.8)$$

durchgeführt. Dabei berechnen sich der Logarithmus der mittleren Masse nach

$$\ln(\bar{m}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(m_i) , \quad (8.9)$$

der Logarithmus der Masse nach

$$\ln(m) = \ln(\hat{c}) + \hat{\alpha} \cdot \ln(t_{\bar{v}_i}) + \hat{\beta} \cdot \ln(\bar{p}_{\bar{v}_i}) , \quad (8.10)$$

die totale Variation nach

$$SQT = \sum_{i=1}^n (\ln(m_i) - \ln(\bar{m}))^2 , \quad (8.11)$$

die erklärte Variation nach

$$SQE = \sum_{i=1}^n (\ln(\hat{m}_i) - \ln(\bar{m}))^2 , \quad (8.12)$$

und die Restvariation nach

$$SQR = \sum_{i=1}^n (\ln(m_i) - \ln(\hat{m}_i))^2 . \quad (8.13)$$

Der Quotient

$$\frac{SQE}{SQT} = \rho^2 \quad (8.14)$$

beschreibt das multiple Bestimmtheitsmaß beziehungsweise das Quadrat des empirischen multiplen Korrelationskoeffizienten ρ^2 . Das multiple Bestimmtheitsmaß quantifiziert den Anteil an der totalen Variation der Stichprobe $(\ln(m_1), \dots, \ln(m_{42}))$, welcher durch den linearen Regressionsansatz nach Gleichung 8.7 bestimmt wird.

Die Tabelle 8.4 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Analyse zu den Wechselbeziehungen zwischen der Masse m , der Überdeckungszeit $t_{\bar{v}}$ und dem mittleren Überdeckungsdruck $\bar{p}_{\bar{v}}$ im Überblick. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $SQE/SQT = 0,670$ werden zwei Drittel der totalen Variation erklärt. Die mit einem Drittel durch das Modell nicht erklärte Restvariation kann in unterschiedlichen Dichten des einfließenden Gemengestromes und in unterschiedlichen Reibungsverhältnissen im Prozessraum begründet sein.

Tabelle 8.4: Ergebnisse der multiplen linearen Regression im Überblick

	SQT	SQE	SQR	SQE/SQT	ρ
	Totale Variation	Erklärte Variation	Restvariation	Bestimmtheitsmaß	Korrelationskoeffizient
Variation	0,0488	0,0327	0,0161	0,670	0,820
Variation relativ	1	0,670	0,330		

Mit der Berechnung der Exponenten $\alpha = 0,309$ und $\beta = 0,185$ werden die unterschiedlichen Wertigkeiten der beiden gemessenen Größen Überdeckungszeit $t_{\bar{v}}$ und mittlerer Druck am Boden der Zelle $\bar{p}_{\bar{v}}$ auf das Ergebnis des Füllprozesses

quantifiziert (Gleichung 8.5). Die Abbildung 8.13 stellt die Abhängigkeit der Steinmassen m_i von $t_{\bar{v}}$ und $\bar{p}_{\bar{v}}$ in einem dreidimensionalen Diagramm dar.

Mit der Anwendung des linearen multiplen Regressionsmodells kann das Bestimmtheitsmaß gegenüber der einfachen linearen Regression noch einmal um näherungsweise 6,5 % gesteigert werden. Es kann damit als gesichert betrachtet werden, dass die Überdeckungszeit entsprechend der Gleichung 8.9 stärkeren Einfluss auf das Prozessergebnis ausübt als der Überdeckungsdruck. Dies ist eine wesentliche Erkenntnis im Ergebnis des realen Experimentes.

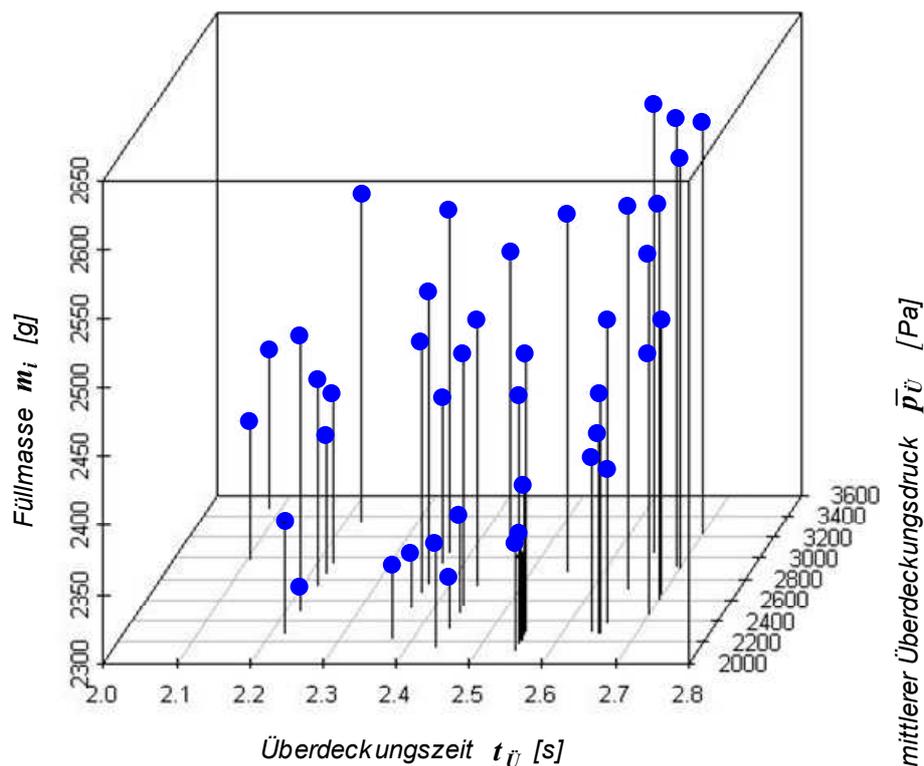


Abbildung 8.13: Diagramm zur Darstellung der Wechselbeziehung zwischen der Steinmasse m_i , dem mittleren Überdeckungsdruck $\bar{p}_{\bar{v}}$ und der Überdeckungszeit $t_{\bar{v}}$ in einer Zelle

Mit der Ermittlung der Füllungsgüte, der Berechnung der gewichteten Variationsursachen für die Schwankungen der Steinmassen und mit der Aufnahme des koordinaten- und zeitabhängigen Druckes am Boden des zu füllenden Raumes werden drei Ebenen für die Verifizierung des Simulationsmodells geschaffen. Eine ausführliche Gegenüberstellung der Ergebnisse erfolgt im Kapitel 9.

9. Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Produktion, Verifizierungsversuch und Simulation

Im vorliegenden Kapitel werden die

- im Ergebnis des Produktionsbetriebes (industrieller Routinebetrieb),
- im Ergebnis des Verifizierungsversuches (reales Experiment) und
- im Ergebnis der Simulation (numerisches Experiment)

ermittelten Messwerte und Funktionen gegenübergestellt. Damit soll die Übereinstimmung des numerischen Experimentes mit der Realität geprüft und zugleich die Richtigkeit der aus der Prozessbeobachtung entwickelten Modellvorstellung untersucht werden. Die Tabelle 9.1 stellt die drei Ebenen nach Methode, Inhalt und Umfang der Untersuchungen gegenüber.

Tabelle 9.1:

Gegenüberstellung der drei unterschiedlichen Abstraktionsebenen

Untersuchungsebene	Abstraktion	untersuchte Füllstufen	Untersuchungsmethode	Stichprobenumfang	Ergebnisinhalte
Produktionsbetrieb	niedrig (industrieller Routinebetrieb)	Beide Füllstufen	Aufnahme ausgewählter Messwerte und Prozessbeobachtung	$n_{iR} = 5120$	statistisches Modell (1) phänomenologisches Modell (2)
Verifizierungsversuch im Technikum	mittel (reales Experiment)	Füllstufe 1	Aufnahme relevanter Messwerte zur Überprüfung des numerischen und des phänomenologischen Modells	$n_{rE} = 360$	Bestätigung und Quantifizierung des phänomenologischen Modells (2) ⇒ physikalisches Prozessmodell (3)
Simulation mit Computer	hoch (numerisches Experiment)	Füllstufe 1	DEM Simulation mit empirisch angepasstem Gemengeverhalten	$n_{nE} = 480$	Bestätigung des physikalischen Modells und erste Einbeziehung des Gemengeverhaltens ⇒ erweitertes physikalisches Prozessmodell (4)

Trotz des Bestrebens, die Ausgangs- und Versuchsbedingungen für alle drei Analyseebenen möglichst ähnlich zu gestalten, unterscheiden sich diese in einigen Details. Die Unterschiede sind in den verschiedenartigen Aufgaben und Zielstellungen begründet.

Mit den Untersuchungen im *industriellen Routinebetrieb* gelingt es erstmals, eine Übersicht über die tatsächlich in der Produktion erreichbare Füllgüte zu erstellen, die Prozessverläufe aufzunehmen und Systemmaße der unterschiedlichen Füllanlagen zu erfassen. Dafür werden an unterschiedlichen Steinformmaschinen mit zum Teil sehr stark divergierenden Ausgangsbedingungen Prozessverläufe und Prozessergebnisse aufgezeichnet. Untersucht werden dabei beide Füllstufen, Kernbeton- und Vorsatzbetonfüllung. An allen untersuchten Steinformmaschinen wird das Füllen der Form durch unterschiedlich ausgeprägte Vibrationen unterstützt. Die Berechnung der Füllungskennzahlen erfolgt nach Gleichung 3.1 bezogen auf den durch die werkseigene Qualitätskontrolle vorgegebenen Sollwert. Bereits mit der Transformation nach $f_i = m_i / m_{soll}$ wird quantifiziert, wie gut es gelungen ist, sich der vorgegebenen Sollmasse anzunähern. Die Aufnahme der Zellendruck-Zeit-Funktion ist unter den Bedingungen des industriellen Routinebetriebes nicht möglich.

Aufgabe der *Simulation* ist es hingegen, zunächst ausschließlich die Kernbetonfüllung und deren Wirkungsmechanismen realitätsnah abzubilden. Für die Gestaltung der Simulationskulisse, wie beispielsweise Systemmaße, Füllungsgrad und Bewegungsfunktion der Füllwagens werden aus den Aufzeichnungen des industriellen Routinebetriebes Durchschnittswerte gebildet und dem numerischen Experiment zu Grunde gelegt. Die je Zelle eingefüllte Masse m_i erreicht infolge des vereinfachten Gemengemodells (Abschnitt 7.5.1) näherungsweise nur 50 % der Masse eines realen Betonsteines. Auf die Simulation der Füllvibration wird im ersten Schritt verzichtet. Mit den im Ergebnis des numerischen Experimentes errechneten Daten werden die Zellendruck-Zeit-Funktionen und die erreichte Füllungsgüte ermittelt. Mangels eines geeigneten Sollwertes erfolgt die Berechnung der Füllungskennzahlen nach Gleichung 3.1 bezogen auf das arithmetische Mittel der untersuchten Stichprobe mit $f_i = m_i / \bar{m}$.

Aufgabe des *Verifizierungsversuches* ist es, in einem realen Experiment die Simulation unter möglichst gleichen Prozessbedingungen nachzustellen und die dabei ermittelten Daten den Ergebnissen des numerischen Experimentes gegenüber zu stellen. Die erstmalige experimentelle Aufnahme der Zellendruck-Zeit-Funktionen während des Füllens der Form besitzt dabei besondere Bedeutung. Dementsprechend werden die Versuchsbedingungen auf die zu lösende Messaufgabe angepasst. Der Verifizierungsversuch umfasst wie die Simulation ausschließlich die Kernbetonfüllung. Die Berechnung der Füllungskennzahlen nach Gleichung 3.1 erfolgt ebenfalls wie im Ergebnis der Simulation bezogen auf das arithmetische Mittel.

Versuchsbedingungen und Auswertemodi divergieren also zwischen den Analysen im industriellen Routinebetrieb einerseits und den numerischen und realen Experimenten andererseits. Um die in der Produktion ermittelten Füllungsgüten für den Vergleich der Abstraktionsebenen anzupassen, werden die Proben im Ergebnis der ersten Füllstufe nach Gleichung 3.1 noch einmal mittelwertbezogen analysiert. Durch diese Transformation weisen alle im Resultat der ersten Füllstufe erzeugten Füllungsgüten aus Produktion und Experimenten die gleiche Bezugsbasis auf und können somit gegenübergestellt werden. Mit der Gegenüberstellung der im numerischen und realen Experiment aufgenommenen Zellendruck-Zeit-Funktionen kann die Aussagekraft des Gesamtmodells der Simulation zusätzlich überprüft werden.

9.1 Füllungsgüte

Der Vergleich der Füllungsgüten erfolgt durch die Gegenüberstellung der empirischen statistischen Kennwerte und der Häufigkeitspolygone. Für die Abbildung der statistischen Kennwerte des industriellen Routinebetriebes werden die Ergebnisse der Datensätze *IK* bis *IIK* (Kapitel 4) zusammengefasst. Um entsprechende für die Gegenüberstellung geeignete Kennwerte zu erzeugen, wird über alle Datensätze jeweils das arithmetische Mittel gebildet. Die Tabelle 9.2 stellt die stichproben- und zyklusbezogenen Kennwerte gegenüber. Für einen relativen Vergleich werden die Ergebnisse des realen Experimentes zur Bildung einer Referenzebene mit dem Wert 1 gleichgesetzt.

Die stichprobenbezogene Gegenüberstellung zeigt vor allem Unterschiede in den Minima und in den Streuungsmaßen des numerischen Experimentes gegenüber dem realen Experiment. Die kleinste im Ergebnis der Simulation erreichte Füllungskennzahl erreicht gegenüber dem Minimum des Verifizierungsversuchs nur zwei Drittel von dessen Wert. Die Streuungsmaße der Simulation erreichen gegenüber dem Verifizierungsversuch einen näherungsweise zweieinhalbfachen Wert.

Die Streuungsmaße im Ergebnis der industriellen Routine betragen näherungsweise zwei Drittel (Standardabweichung und Variationskoeffizient) und drei Viertel (Spannweite)

gegenüber den Werten des Verifizierungsversuches. Maximum, Minimum und Median sind auf gleichem Niveau.

Tabelle 9.2: Übersicht der empirischen statistischen Kennwerte im Ergebnis des numerischen Experimentes, des realen Experimentes und des industriellen Routinebetriebes

empirische Kennwerte	Produktionsbetrieb (industrielle Routine)		Verifizierungsversuch (reales Experiment)		Simulation (numerisches Experiment)	
	Stichprobe $n=5120$	Zyklen $n_z = 110$	Stichprobe $n=480$	Zyklen $n_z = 10$	Stichprobe $n=480$	Zyklen $n_z = 10$
absolut	f_{iIR}	f_{zIR}	f_{iRE}	f_{zRE}	f_{iNE}	f_{zNE}
Maximum f_{max}	1,051	1,012	1,074	1,045	1,130	1,006
Minimum f_{min}	0,936	0,998	0,928	0,971	0,709	0,993
Median $f_{0,5}$	1,002	1,000	0,995	0,993	1,027	1,000
Mittelwert f	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Standardabweichung s	0,021	0,012	0,035	0,025	0,090	0,005
Spannweite R	0,115	0,025	0,146	0,074	0,421	0,013
Variationskoeffizient V	1,051	0,013	0,035	0,025	0,090	0,005
relativ	f_{iRE}	f_{zRE}	f_{iRE}	f_{zRE}	f_{iNE}	f_{zNE}
Maximum MAX	0,979	0,968	1,000	1,000	1,052	0,963
Minimum MIN	1,009	1,028	1,000	1,000	(-) 0,764	1,023
Median $f_{0,5}$	1,007	1,007	1,000	1,000	1,032	1,007
Mittelwert f	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Standardabweichung s	(-) 0,600	(-) 0,480	1,000	1,000	(+) 2,571	(-) 0,200
Spannweite R	(-) 0,788	(-) 0,338	1,000	1,000	(+) 2,884	(-) 0,176
Variationskoeffizient V	(-) 0,629	(-) 0,520	1,000	1,000	(+) 2,571	(-) 0,200

Der zyklusbezogenen Gegenüberstellung in Tabelle 9.2 kann entnommen werden, dass die Streuungsmaße der Simulation gegenüber der industriellen Routine näherungsweise halb so große Werte ausweisen. Gegenüber dem Verifizierungsversuch betragen diese sogar nur rund ein Fünftel. Das zeigt, dass die Reproduzierbarkeit von Zyklus zu Zyklus in der Simulation sehr viel größer ist als in den realen Experimenten. Die im Ergebnis des numerischen Experimentes ermittelten niedrigen Streuungen sind ausschließlich in den von Simulationszyklus zu Simulationszyklus vereinbarten Variationen der Transportmasse (Abschnitt 7.5.3) begründet. Ohne eine solche Variation würden alle Zyklen im numerischen Experiment identisch verlaufen und alle zyklusbezogenen Streuungsmaße den Wert "0" einnehmen.

Die relativ großen Unterschiede der zyklusbezogenen Streuungsmaße zwischen realem Experiment und industrieller Routine sind auf den ersten Blick nicht plausibel. Eine Erklärung könnte in dem vergleichsweise großen Zeitfenster, den die Verifizierungsversuche in Anspruch nehmen, begründet sein. Für die Herstellung von zehn Fertigungseinheiten werden im industriellen Routinebetrieb etwa vier Minuten benötigt. Für die im Rahmen der Verifizierungsversuche zu erzeugenden zehn Fertigungseinheiten wird auf Grund des Aufwandes für die Vor- und Nachbereitung der Druckmessungen ein Zeitraum von zwölf Stunden in Anspruch genommen. Trotz des verwendeten inerten Gemenges könnten sich Feuchtigkeit und damit Fließfähigkeit in diesem Zeitraum geändert haben und die Ergebnisse beeinflussen.

Die Abbildung 9.1 stellt zunächst ausschließlich die Häufigkeitspolygone aus numerischem und realem Experiment gegenüber. Auffällig im Vergleich ist die asymmetrische rechtsgipflige Form des Polygons im Ergebnis der Simulation. Maximum

und Modalwert sind darin vergleichsweise hoch. Das Minimum ist gleichzeitig deutlich kleiner und erzeugt die große Spannweite. Insbesondere die besetzten Füllungskennzahlklassen von 0,72 (Minimum) bis 0,88 generieren die exponentielle Streuung und manipulieren die Form des Polygons signifikant.

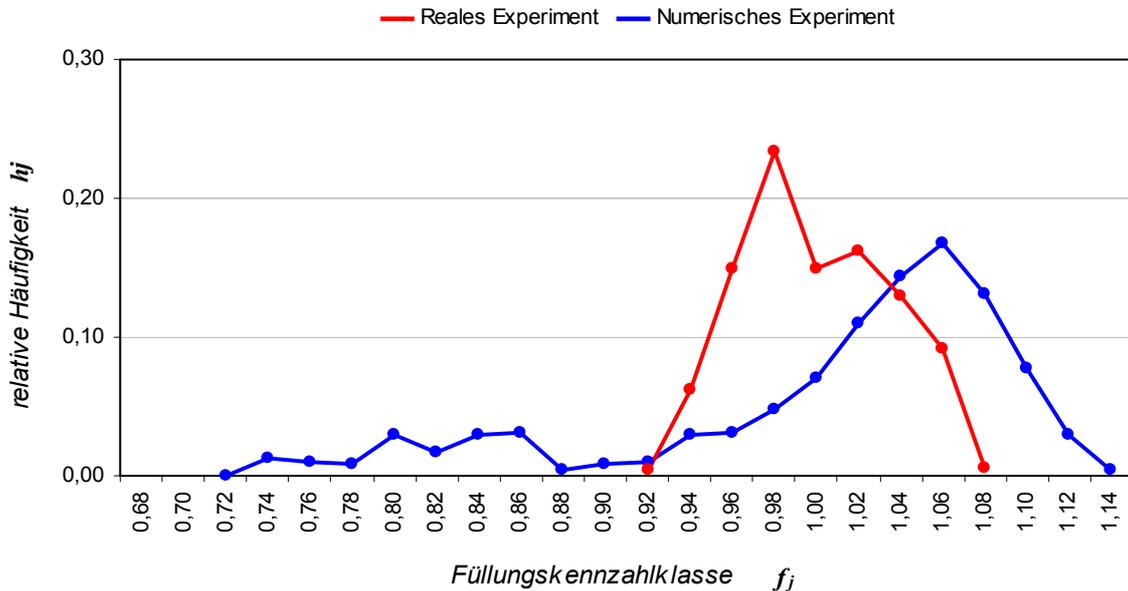


Abbildung 9.1: Gegenüberstellung der Häufigkeitspolygone aus dem numerischen und dem realen Experiment

Mit der Abbildung 9.2 werden den Ergebnissen des numerischen und des realen Experimentes zusätzlich ausgewählte Polygone im Resultat des industriellen Routinebetriebes gegenübergestellt. Im Vergleich zum realen Experiment nehmen

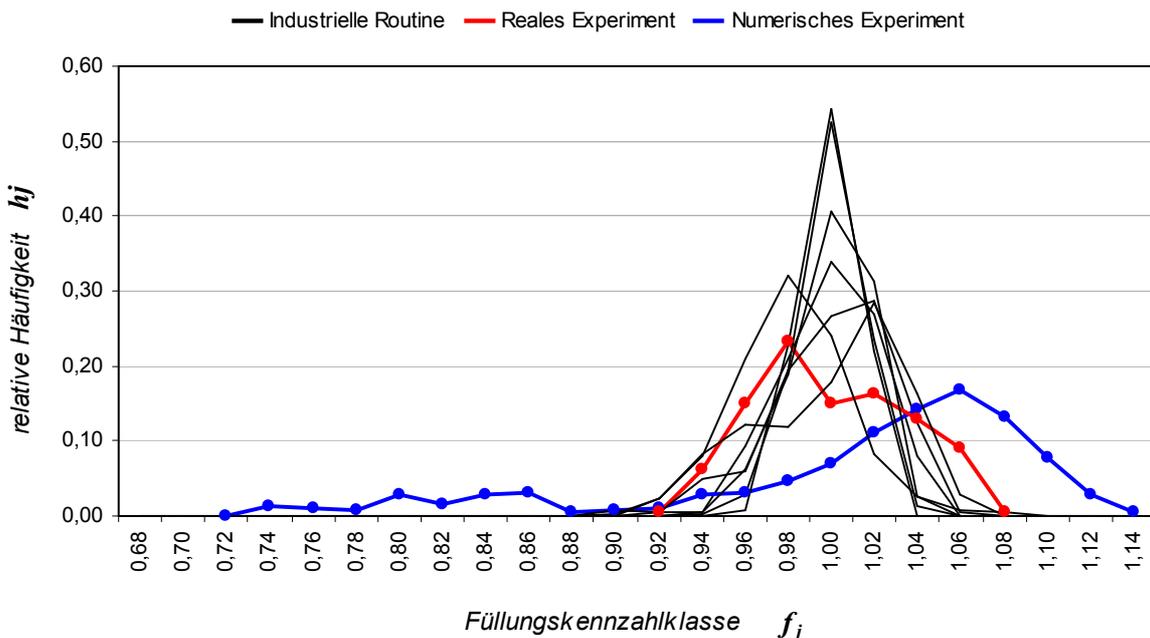


Abbildung 9.2: Gegenüberstellung der Häufigkeitspolygone aus den Experimenten und dem industriellen Routinebetrieb

diese auf der Abszisse näherungsweise die gleiche Lage ein. Geringere Streubreiten und größere relative Häufigkeiten der Modalwerte lassen jedoch die Formen der Polygone gegenüber dem Verifizierungsversuch mehr oder weniger stark ausgeprägt variieren. Form und Spannweite sind sich dementsprechend unterschiedlich. Die Formen der Verteilungen wären sich sehr ähnlich, würde man für das numerische Experiment die Abszissenwerte unterhalb 0,88 negieren (Abbildung 9.1).

9.2 Einflussfaktoren auf die Verteilung der Steinmassen

Die Tabelle 9.3 stellt die Rangfolgen der untersuchten Variationsursachen aus dem numerischen Experiment, dem realen Experiment und dem industriellen Routinebetrieb gegenüber. In allen drei untersuchten Analyseebenen ist der Zeileneinfluss der stärkste Einflussfaktor auf die erreichte Füllmasse. Dadurch wird das im Kapitel 6 entwickelte phänomenologische Modell bestätigt.

Tabelle 9.3: Übersicht der Rangfolge der Variationsursachen im Ergebnis des numerischen Experimentes, des realen Experimentes und des industriellen Routinebetriebes

Variationsursache	industrielle Routine	reales Experiment	Numerisches Experiment
Zeileneinfluss	45%	58%	84%
Resteinfluss	21%	22%	15%
Spalteneinfluss	13%	13%	1%
Zykluseinfluss	15%	6%	-
Wechselwirkung Zeile & Spalte	5%	1%	-

Die besonders hohe Signifikanz des Zeileneinflusses mit 84 % im Ergebnis des numerischen Experimentes zeigt einerseits, dass die Simulation gut die aus der Kinematik des Füllwagens resultierenden Phänomene abbildet. Andererseits folgt der hohe relative Einfluss der Zeilenlage auf das Füllergebnis stringent aus den fehlenden Zyklus- und Spalteneinflüssen. Die fehlende Signifikanz von Zykluseffekten ist dabei nicht im Gesamtmodell der Simulation begründet, sondern in den näherungsweise konstanten Ausgangsbedingungen und den identischen Bewegungsfunktionen des Füllwagens für jeden Zyklus. Zur Untersuchung zyklusbezogener Einflüsse, wie beispielsweise durch variierende Füllstände oder variierende Bewegungsfunktionen verursacht, müssten die Bedingungen von Simulationszyklus zu Simulationszyklus entsprechend stärker variiert werden.

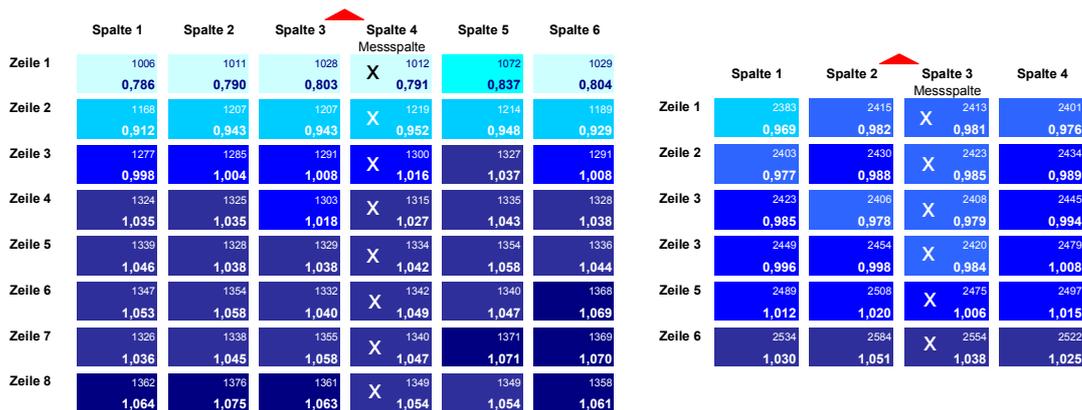
Spaltenbezogene Einflüsse resultieren in der Realität vor allem aus dem Schüttkegel des Gemenges im Füllwagen (Abbildung 2.9 und 2.10) und den damit verbundenen Druckunterschieden im Transportraum zwischen der Kern- und Randzone senkrecht zur Fertigungsrichtung. Die in der Simulation definierte Ausgangssituation stellt hingegen mit Beginn eines jeden Zyklus einen egalisierten Füllstand im Füllkasten (Tabelle 7.2, Figur 1) dar. Darin ist der geringe Einfluss der Spaltenlage auf die Steinmasse im numerischen Experiment begründet.

Differenzen in der Rangfolge der Einflussgrößen zwischen realem Experiment und industrieller Routine liegen im unterschiedlichen Zykluseinfluss begründet. Dieser erreicht im Routinebetrieb immerhin 15 %. Im Ergebnis der Verifizierungsversuche beträgt dieser Wert hingegen nur 6 %. Füllstand und Gemengeverteilung im Füllkasten werden während der Verifizierungsversuche adäquat zur Simulation entsprechend konstant gehalten. Die Beschickung des Füllwagens erfolgt im Verifizierungsversuch manuell. Auf

Grund des besonderen Antriebssystems (Abschnitt 8.1) kann die Bewegungsfunktion des Füllwagens ebenfalls exakt reproduzierbar eingestellt werden. Darüber hinaus wird, ebenfalls der Simulation entsprechend, auf die Anwendung von Füllvibration verzichtet. Die Bewegungsfunktionen der Füllwagen und die Füllvibrationen variieren an allen untersuchten Steinformmaschinen signifikant von Zyklus zu Zyklus [14]. Sie beeinflussen dementsprechend zyklusbezogen das Füllergebnis und erzeugen gegenüber den Experimenten die vergleichsweise hohe Wertigkeit der Variationsursache "Zykluseinfluss" im industriellen Routinebetrieb.

9.3 Zellendruck-Zeit-Funktion

Während des industriellen Routinebetriebes ist die Messung des Druckes am Boden der Formzellen aus verschiedenen Gründen nicht möglich. Die Aufnahme der Zellendruck-Zeit-Funktion beschränkt sich daher in den vorliegenden Untersuchungen auf das numerische und das reale Experiment. Nachfolgend werden die Ergebnisse aus Simulation und Verifizierung am Beispiel zweier erzeugter Fertigungseinheiten gegenübergestellt. Die Abbildung 9.3 beschreibt zunächst die Anordnung der Messzellen zur Aufnahme der Zellendruck-Zeit-Funktionen an Hand der im Ergebnis beider Experimente erzeugten Massenverteilungsmatrizen. Die Zellen, für die der Druck aufgenommen wird, sind in beiden Matrizen durch ein "X" gekennzeichnet.



Mittelwertmatrix im Ergebnis des numerischen Experimentes

Mittelwertmatrix im Ergebnis des realen Experimentes

Abbildung 9.3: Gegenüberstellung der Mittelwertmatrizen mit Kennzeichnung der Zellen zur Aufnahme der Druck-Zeit-Funktionen

Die Abbildungen 9.4 und 9.5 stellen beispielhaft die Funktionsverläufe für jeweils einen Zyklus des numerischen Experimentes und einen Zyklus des realen Experimentes gegenüber. Die Abbildung 9.4 zeigt die während des ersten Zyklus der Simulation berechneten Druck-Zeit-Funktionen für acht ausgewählte Zellen der virtuell gefertigten Einheit (Abbildung 9.3 links). Die in den Zellen (Zeilen 1 bis 8) erreichten Druckmaxima werden in der Abbildung 9.4 zur Darstellung der unterschiedlichen Niveaus jeweils zusätzlich durch einen Punkt markiert.

Die Abbildung 9.5 zeigt die während des ersten Zyklus des Verifizierungsversuchs gemessenen Druck-Zeit-Funktionen an sechs ausgewählten Zellen der gefertigten Einheit (Abbildung 9.3 rechts). Die Gegenüberstellung der Diagramme in den Abbildungen 9.4 und 9.5 zeigen Übereinstimmungen und Divergenzen in Qualität und Quantität der Funktionsverläufe.

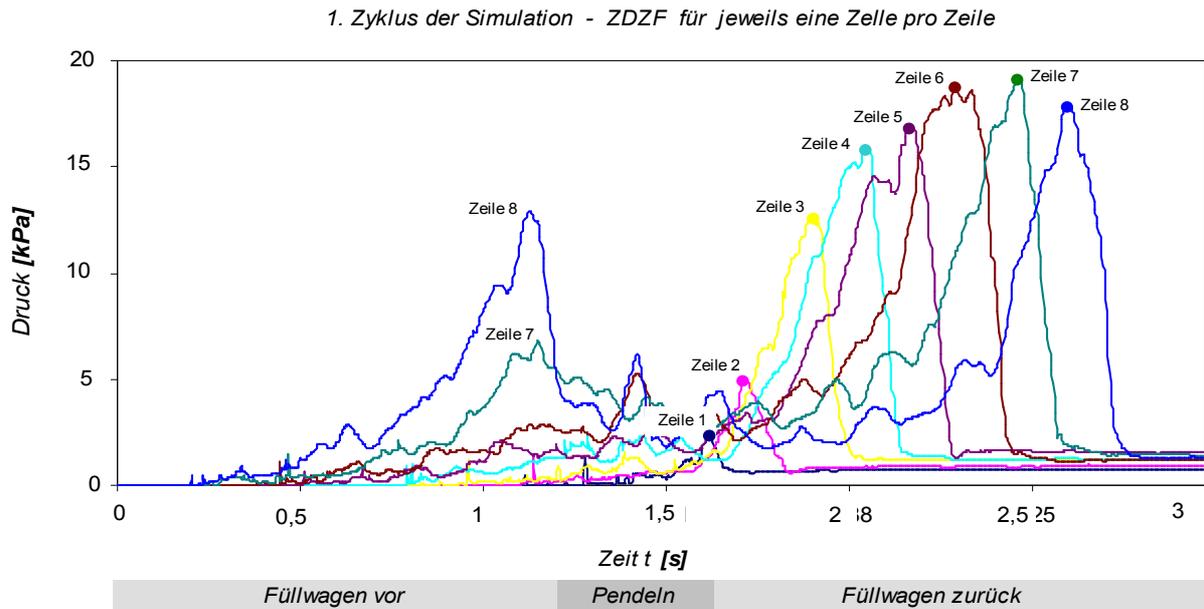


Abbildung 9.4: Druck-Zeit-Funktionen in acht ausgewählten Zellen während des ersten Füllzyklus der Simulation

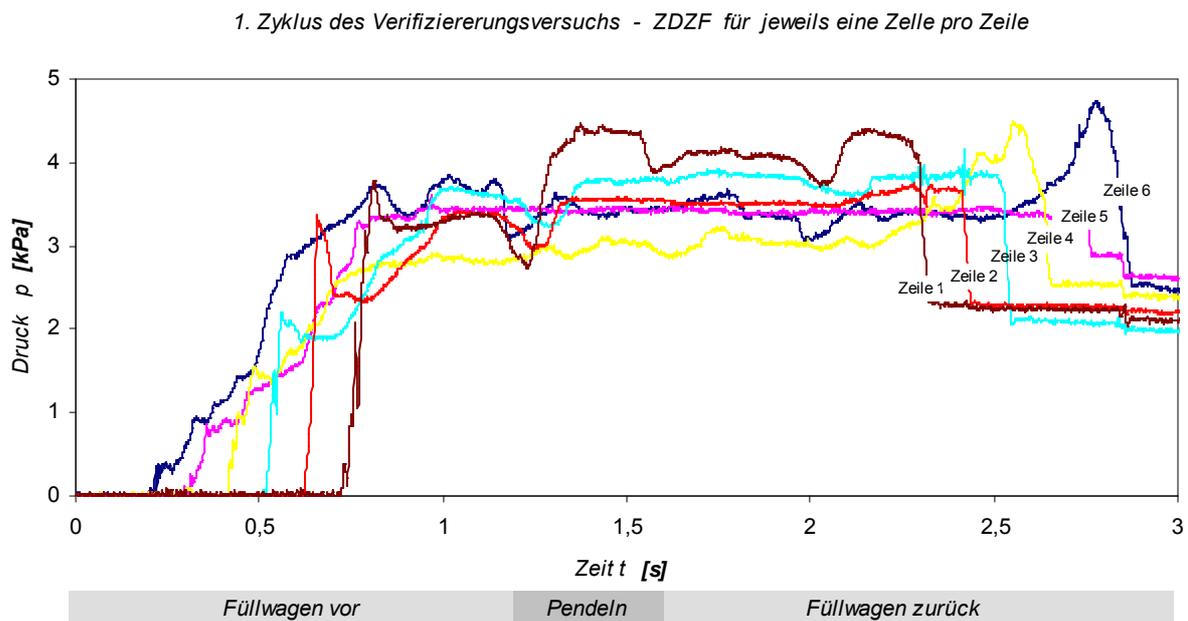


Abbildung 9.5: Druck-Zeit-Funktionen in sechs ausgewählten Zellen während des ersten Füllzyklus des Verifizierungsversuchs

Die Bewegungsfunktion des Füllwagens setzt sich im Wesentlichen aus den drei Abschnitten "Füllwagen vor", "Füllwagen pendelt" und "Füllwagen zurück" zusammen. Nachfolgend werden die Verläufe der Zellendruck-Zeit-Funktion Abschnitt für Abschnitt erläutert.

– Füllwagen vor –

Übereinstimmend detektieren die Funktionsverläufe im Ergebnis beider Experimente den zeilenabhängig, nacheinander einsetzenden Druckanstieg, der den Beginn der Füllung markiert. Im Unterschied zum realen Experiment hält dieser Anstieg während der

Simulation länger an und erreicht in den Zeilen 7 und 8 (Abbildung 9.4) ein gegenüber dem Verifizierungsversuch (Abbildung 9.5) deutlich höheres Niveau.

Worin liegt die Ursache für diesen zeilenabhängigen Effekt begründet? Die Abbildung 9.6 stellt in einer Momentaufnahme der Simulation den Füllkasten kurz vor Erreichen seines vorderen Umkehrpunktes dar. Die Animation zeigt, dass der Füllwagen im virtuellen Experiment bis zum Erreichen des vorderen Umkehrpunktes bereits die hinteren Zeilen 7 und 8 (weißer Kreis) kurzzeitig nicht mehr überdeckt. Die Druckspitzen in den bis dahin bereits gut gefüllten Zeilen 7 und 8 werden in dieser Phase mit dem Überfahren der Füllwagenrückwand erzeugt. Rückwand und Formsteg wirken, wie in der Abbildung 9.7 dargestellt, wie zwei Scherschneiden (blaue Pfeile), die das Gemenge in dieser Zone durch die Relativbewegung zueinander zunächst verdichten und dann in der sich zwischen Transport- und Füllraum ausbildenden Scherebene trennen. Das Gemenge im Transportraum hat sich zu dem trägheitsbedingt, während der Fahrt aus der Grundstellung vor der Rückwand des Füllkastens verdichtet und beeinflusst die Reibungsverhältnisse in der sich ausbildenden Scherebene. Das unterscheidet im vorliegenden Beispiel den Füllverlauf in den Zeilen 7 und 8 sowohl signifikant vom Verlauf des Füllens in den anderen Zeilen 1 bis 6 der virtuell gefüllten Einheit als auch signifikant vom Verlauf des Füllens in den Zeilen 1 bis 6 des realen Experimentes.

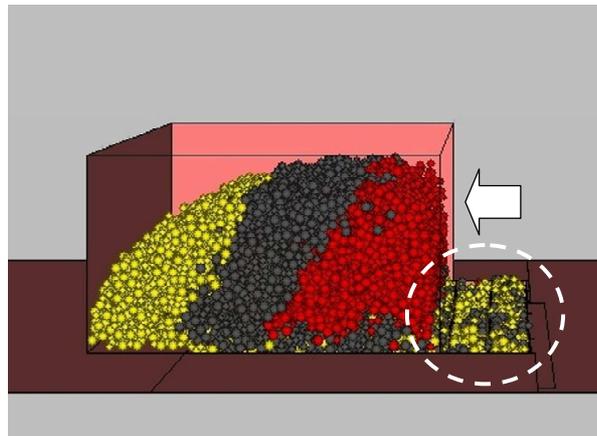


Abbildung 9.6: Momentaufnahme der Animation – Füllkasten direkt vor dem vorderen Umkehrpunkt

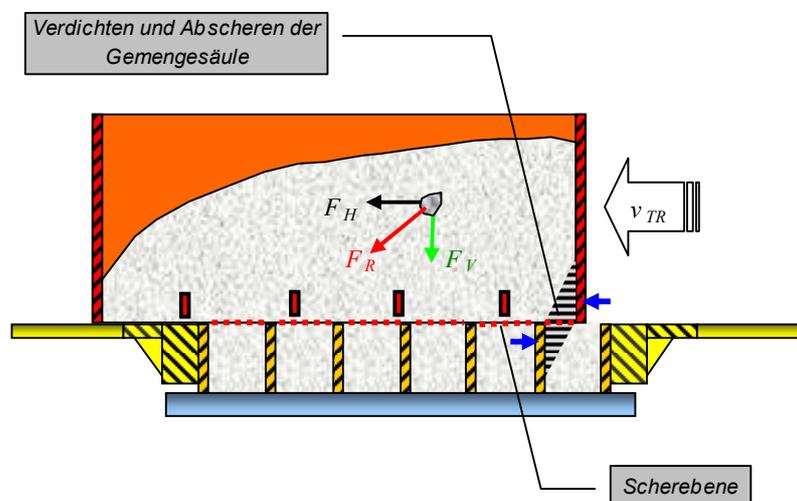


Abbildung 9.7: Füllwagenrückwand überfährt in der Vorwärtsbewegung die hintere Zeile der Form – schematische Darstellung

ausreichenden Überdeckungsdruck und eine ausreichende Überdeckungszeit, welche das Einfließen einer adäquaten Füllungsmasse sicherstellen, zu realisieren.

Mit dem Ende der Überdeckung fällt der Druck in beiden Experimenten übereinstimmend Zeile für Zeile aufeinander folgend steil ab und markiert damit den Abschluss der Füllung. Das sich am Ende des Füllprozesses in den Zellen einstellende Druckniveau p_{E_i} ist im Ergebnis beider Experimente der je Zelle eingefüllten Masse m_i proportional.

Die Divergenzen zwischen dem numerischen und dem realen Experiment liegen insbesondere in der absoluten Größe des ermittelten Druckes am Zellenboden begründet. Während der Simulation werden mit dem Überfahren der Füllkastenwand außergewöhnlich große Spannungsspitzen im Füllraum erzeugt. Die Darstellung der Gemengepartikel erfolgt, wie im Abschnitt 7.3 beschrieben, durch steife, nicht deformierbare Kugeln. Spannungsbedingte Deformationen werden durch Relativbewegungen der Elemente zueinander abgebildet. Mit der Relativbewegung zwischen Füllkastenwand und Formsteg werden aus dem Füllraum herausragende Kugeln durch die entstehende Keilwirkung nach unten gepresst. Die Abbildung 9.9 zeigt in einer vereinfachten schematischen Darstellung die aus der Vorwärtsbewegung des Füllwagens resultierenden Kräfte und deren Wirkung auf die Gemengepartikel im überfüllten Füllraum.

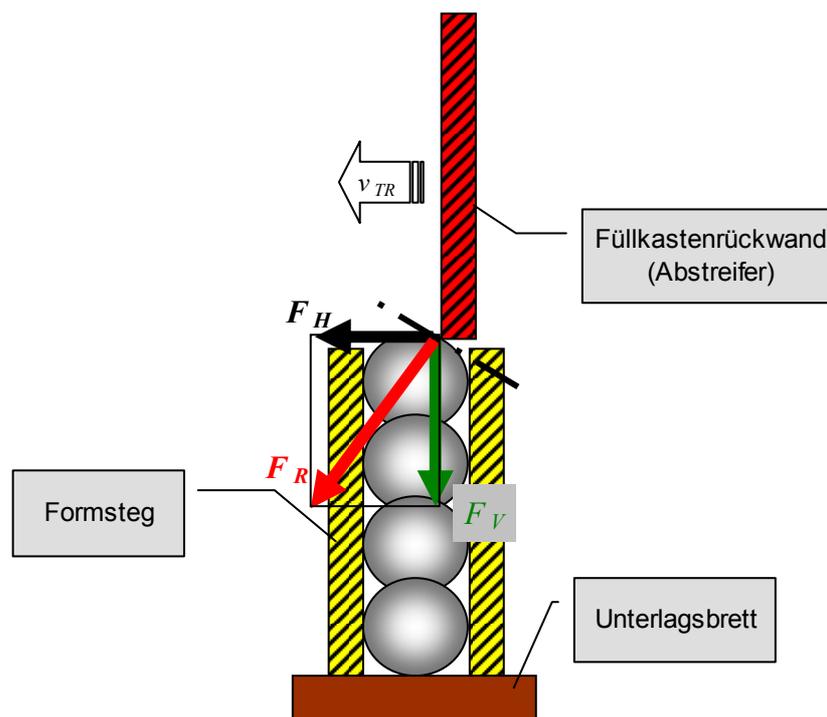


Abbildung 9.9: Schematische Darstellung zur Erzeugung der temporären Kompression in einer Formzelle – numerisches Experiment

Die Simulation errechnet im Verlauf der Zellendruck-Zeit-Funktion Druckspitzen bis zu 19.000 Pa (≈ 2 m Säule Versuchsgemenge). Diese sind noch einmal ein Indikator für die bereits im Kapitel 7 beschriebenen Unstimmigkeiten im Kompressionsverhalten des Gemengemodells. Das Modell verstärkt die im Prozessraum auftretenden Spannungen und unterstützt damit zunächst unbeabsichtigt die Analyse von schwächeren Effekten.

Für die Ergebnisse des Verifizierungsversuches und der Simulation werden gut ausgeprägte Korrelationen zwischen der eingefüllten Masse m_i , der Überdeckungszeit t_{ii}

und dem mittleren Überdeckungsdruck \bar{p}_V nachgewiesen (Abschnitte 7.6.4 und 8.4.3). Dieser Sachverhalt ist ein weiterer Indikator für die grundsätzliche Übereinstimmung des Simulationsmodells mit dem realen Füllprozess. Die bisher in den numerischen Experimenten generierten Zellendruck-Zeit-Funktionen eignen sich für die Beschreibung und Analyse des Füllprozesses. Relevante, aus der Bewegung des Füllwagens resultierende Abschnitte der Füllung werden verstärkt detektiert. Die angezeigten absoluten Drücke am Zellenboden divergieren partiell von den Werten des Verifizierungsversuches. Für die Nutzung des Modells zur Analyse von Bauteilbelastungen oder zur Dimensionierung von Antriebssystemen bedarf es daher noch entsprechender Grundlagenforschung.

Zusammenfassend können die relativen Ergebnisse aller drei Abstraktionsebenen als zufriedenstellend bis gut übereinstimmend bezeichnet werden. Das entwickelte Simulationsmodell stellt mit dem bisher erreichten Stand ein geeignetes Werkzeug zur Analyse und/oder Optimierung des Füllprozesses dar.

10. Zusammenfassung

Problemstellung und Zielsetzung

Das Füllen der Form mit Betongemenge ist die erste Phase des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses bei der Produktion von Betonsteinen. Das Einbringen einer definierten Gemengemasse in das durch den Füllraum vorgegebene Volumen und die gleichmäßige Verteilung der Gemengeanteile innerhalb des Füllraumes sind grundlegende Voraussetzungen für die qualitätsgerechte Herstellung von Betonkörpern.

Trotz langjähriger praktischer Erfahrungen mit Steinformmaschinen wird der Formgebungs- und Verdichtungsprozess nicht ausreichend stabil beherrscht. Die Produktion von Betonsteinen wird vorwiegend von subjektivem Expertenwissen bestimmt. Es mangelt an theoretisch fundierten Vorgaben und an Trainingsprogrammen für die Anlagenbediener. Im industriellen Routinebetrieb erweist sich insbesondere die Realisierung einer gleichmäßigen Füllung als das primäre Problem bei der Realisierung des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses. Differente Massenverteilungen innerhalb der Fertigungseinheit sowie Massenunterschiede von Fertigungszyklus zu Fertigungszyklus sind die Folge von Füllungsdefiziten. Schwankungen in Steinhöhe, Steindichte und Steinoptik sowie Störungen in den Folgeprozessen stehen im Resultat. Vergleichsweise hohe Ausschuss- und Reklamationsquoten belasten die wirtschaftlichen Ergebnisse der Hersteller sowie das Image der Produkte.

Bei den bisherigen Bemühungen, den Formgebungs- und Verdichtungsprozess wissenschaftlich zu durchdringen, stehen ausschließlich Überlegungen und Modelle zur Beschreibung der Verdichtung im Fokus. In den Publikationen begrenzen sich die Analysen auf das Komprimieren des bereits in den zu füllenden Raum eingebrachten Betongemenges. Das vorausgehende Füllen der Form mit Gemenge und die verknüpfte Betrachtung aller drei Prozessphasen Füllen, Verdichten und Entschalen bleiben bisher unberücksichtigt. Einflussgrößen und Wirkungsmechanismen, die den Verlauf und das Ergebnis des Füllens bestimmen, sind nur unzureichend bekannt.

Eine vollständige technologische Analyse und Beschreibung der Arbeitsgänge des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses respektive der Füllung an Steinformmaschinen wurden bisher nicht publiziert. Methoden zur expliziten Quantifizierung und Evaluierung der erreichten Füllungsgüte sind ebenso wenig bekannt wie Modelle zur Beschreibung oder Simulation des Füllvorganges selbst.

Die Zielstellung der Arbeit besteht darin, ausgehend von einer systematischen Analyse des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses im Allgemeinen und der Analyse des Füllvorganges im Besonderen, die tatsächlich an Steinformmaschinen erreichbare Füllungsgüte zu ermitteln, Einflüsse auf die erreichte Füllungsgüte und deren Wechselbeziehungen zu untersuchen sowie ein Modell zur Beschreibung und Simulation des Füllvorganges zu entwickeln und zu verifizieren.

Technologische und technische Grundlagen

Im ersten Schritt werden die Technologie der Betonsteinproduktion im Allgemeinen und der Formgebungs- und Verdichtungsprozesses im Speziellen ausführlich beschrieben. Der Formgebungs- und Verdichtungsprozess wird dabei erstmals in drei direkt aufeinander folgenden, gleichwertigen Prozessphasen "Füllen", "Verdichten" und "Entschalen" untergliedert. Die Aufgaben und Zielstellungen der drei Prozessphasen werden definiert.

Aufbau und Wirkungsweise von Steinformmaschinen werden ausführlich beschrieben. Für einen vollständigen Fertigungszyklus werden beispielhaft alle Arbeitsgänge und deren Kinematik mit Hilfe schematischer Darstellungen erklärt.

Das Füllen der Form mit Betongemenge selbst wird grundsätzlich in zwei Stufen, der Kernbetonfüllung (Füllstufe 1) und der Vorsatzbetonfüllung (Füllstufe 2) mit eigenständigen Verfahrensmerkmalen differenziert. Darüber hinaus werden unterschiedliche Ausgangssituationen für das Füllen infolge differenter Produktionsaufgaben nach Form, Größe und Struktur des zu füllenden Raumes beschrieben und systematisiert.

Methode zur Quantifizierung und Bewertung der Füllungsgüte

Um die Qualität des erreichten Füllergebnisses überhaupt bewerten zu können, wird eine Methode zur Quantifizierung und Evaluierung der Füllungsgüte entwickelt. Grundlage dafür bilden im Wesentlichen Methoden der deskriptiven Statistik. Als Merkmal der jeweils zu untersuchenden Grundgesamtheit wird die lagerfeuchte Steinmasse m_i als quantitatives, stetiges Merkmal gewählt. Die Steinmassen von direkt aufeinander folgenden Fertigungseinheiten werden nach der Aushärtung verwogen und in ein eigens für die Auswertung und Darstellung der Füllungsgüte entwickeltes Schema einer Excel Datei editiert. Mit der anschließenden Division aller ermittelten Massen m_i durch einen Referenzwert m_{ref} , vorzugsweise die anzustrebende Sollmasse m_{soll} , erfolgt die Transformation in ein dimensionsloses qualitatives Merkmal, die so genannte Füllungskennzahl f_i . Diese gibt für jeden gemessenen absoluten Wert die relative Abweichung vom gewählten Referenzwert an. Mit der Umwandlung der absoluten Massen in relative Füllungskennzahlen werden unabhängig von den Steingrößen und unabhängig von den Dichten der verwendeten Rohstoffe Vergleiche unterschiedlicher Stichproben möglich.

Die Verteilung der Massen innerhalb der Fertigungseinheiten und die Abweichungen von Fertigungszyklus zu Fertigungszyklus werden in den Massenverteilungsmatrizen grafisch dargestellt. Über- und unterfüllte Zonen innerhalb der Fertigungseinheit sowie Schwankungen von Zyklus zu Zyklus werden durch automatische Farbabstufungen in den Matrizen detektiert.

Für die Gesamtheit aller ermittelten Füllungskennzahlen einer Stichprobe werden die Lageparameter, wie zum Beispiel der empirische Median $f_{0,5}$ oder das arithmetische Mittel \bar{f} und Streuungsmaße, wie beispielsweise die empirische Standardabweichung s oder die Spannweite R , berechnet und die empirische Verteilungsdichte an Hand des Histogrammes bzw. des Häufigkeitspolygons graphisch dargestellt. Durch den Vergleich der Lageparameter mit der anzustrebenden Sollwertmarke $f_{soll} = 1$ wird ersichtlich, wie gut sich die ermittelten Messwerte der Stichprobe der anzustrebenden Sollmasse annähern. Mit der Gegenüberstellung der Streuungsmaße und der ermittelten Häufigkeitspolygone unterschiedlicher, im industriellen Alltag untersuchter Stichproben wird ein erster relativer Vergleich der vorhandenen Streubreiten möglich.

Um neben der Stichprobe als Ganzes auch Effekte innerhalb einer einzelnen zu fertigenden Einheit oder Effekte zwischen den aufeinanderfolgenden Fertigungszyklen untersuchen zu können, beinhaltet die entwickelte Methode insgesamt vier Auswerteebenen. Die stichprobenbezogene Auswertung untersucht als erste Ebene die Massenverteilung innerhalb des gesamten Datensatzes mit beispielsweise 480 Proben. Die zyklusbezogene Auswertung untersucht als zweite Ebene die Massenverteilung innerhalb einer einzelnen Fertigungseinheit mit 48 Proben. Die zellenbezogene Auswertung als dritte Ebene untersucht Effekte, die in der Lage einer Zelle innerhalb des Füllraumes begründet sind, mit 10 Proben aus jeweils derselben Zelle. Die zyklusbezogene Auswertung als vierte Ebene untersucht die Entwicklung der Gesamtmasse der gefertigten Einheiten von Fertigungszyklus zu Fertigungszyklus mit 10 Proben.

Ist-Stand der Füllungsgüte im industriellen Routinebetrieb

Unter Anwendung der neuen Methode zur Quantifizierung und Bewertung der Füllungsgüte wird das tatsächlich im industriellen Routinebetrieb erreichbare Niveau analysiert. Dafür werden in einem erstmals durchgeführten, umfangreichen Feldversuch elf Steinformmaschinen an zehn Produktionsstandorten in Deutschland und der Schweiz untersucht. Im Rahmen der Studie werden für die Auswertung der Daten rund 12.000 Betonsteine geprüft.

Während der Herstellung der Proben wird der Prozessverlauf jeweils durch Videoaufzeichnungen und Schwingungsmessungen dokumentiert. Ebenfalls dokumentiert werden die Systemmaße der Füllrichtungen sowie die verwendeten Betonrezepturen. Die archivierten Daten stehen in einer separaten Datenbank für weiterführende Betrachtungen und Analysen zur Verfügung.

Mit dem Vergleich der statistischen Kenngrößen und der Massenverteilungsmatrizen wird es möglich, die unterschiedlichen Füllungsgüten im Ergebnis der ersten Füllstufe und im Ergebnis beider Füllstufen anschaulich gegenüberzustellen. Mit der Differenzmethode, der rechnerischen Bestimmung der eingefüllten Vorsatzmassen aus der Differenz der Steinmasse aus Kern- und Vorsatzbeton und der Steinmasse ausschließlich aus Kernbeton, gelingt es darüber hinaus, näherungsweise eine erste Analyse der Vorsatzfüllgüte zu erstellen und kausale Wechselbeziehungen zwischen Kern- und Vorsatzfüllung abzuleiten.

Im Ergebnis der Untersuchungen des industriellen Routinebetriebes steht, dass zehn von elf untersuchten Steinformmaschinen nach beiden Füllstufen (Kern- und Vorsatzfüllung) nicht die erforderliche Steinsollmasse sicherstellen. Beispielsweise beträgt der über die Gesamtheit aller Proben im Ergebnis beider Füllstufen ermittelte empirische Median nur $\bar{f}_{0,5} = 0,991 < f_{soll} = 1$. Folgerichtig erreicht danach nicht einmal jeder zweite Stein die durch die werkseigenen Qualitätskontrolle vorgegebene Sollmasse.

Neun von elf untersuchten Steinformmaschinen füllen darüber hinaus deutlich weniger Kernbeton und gleichzeitig mehr Vorsatzbeton als vorgesehen. Der über alle untersuchten Stichproben erreichte empirische Median, ausschließlich im Ergebnis der ersten Füllstufe, beträgt nur $\bar{f}_{0,5} = 0,972$. Der über alle untersuchten Stichproben ermittelte empirische Median, ausschließlich im Ergebnis der zweiten Füllstufe, beträgt hingegen $\bar{f}_{0,5} = 1,238$.

Infolge der Kinematik der Füllwagen gelingt es an neun von elf untersuchten Steinformmaschinen mit der Vorsatzbetonfüllung die Streuung der Massen gegenüber der ausschließlichen Kernbetonfüllung zu verringern. Die Standardabweichung aus allen untersuchten Proben im Ergebnis der ersten Füllstufe beträgt $\bar{s} = 0,020$. Im Ergebnis beider Füllstufen beträgt dieser Wert nur noch $\bar{s} = 0,014$.

Über die Berechnung der empirischen statistischen Kennzahlen aller untersuchten Datensätze hinaus, werden sowohl für das Füllen allgemeingültige Effekte als auch untypische Phänomene quantifiziert und lokalisiert. So wird zum Beispiel ein in der Geometrie und Relativbewegung des Füllwagens begründeter systematischer Abfall der Füllungskennzahlen in Fertigungsrichtung für alle untersuchten Stichproben im Ergebnis der ersten Füllstufe angezeigt. Ebenfalls werden untypische starke und systematische Schwankung der Zyklusmassen erkennbar. So wird bei einer der untersuchten Maschinen festgestellt, dass einem jeweils überfüllten Zyklus ein jeweils unterfüllter Zyklus folgt. Die Ursache für diese systematischen Schwankungen wurde in einem ebenso systematischen Fehler bei der Regelung der Füllwagenbeschickung gefunden. Die Methode zur Bestimmung der Füllungsgüte eignet sich somit nicht nur zur

Berechnung von Kenngrößen, die die Lage und die Streuung der Massenverteilung beschreiben, sondern auch als ein Instrument zur Analyse des Füllprozesses selbst.

Füllungsgüte – Korrelationen und Einflussfaktoren

Um die Eignung der empirischen Verteilungsfunktionen für die Beschreibung der Prozessqualität überprüfen zu können, werden die Korrelationen zwischen den unter Einschluss der Lagerfeuchtigkeit ermittelten Massen m_i und ausgewählten Festbetoneigenschaften der Proben untersucht. Dazu werden ausgewählte Stichproben zusätzlich umfangreichen Festbetonprüfungen unterzogen. Im Ergebnis der Untersuchungen werden Verteilungen zu den Merkmalen Feuchtmasse, Trockenmasse, Lagerfeuchtigkeit, Steinhöhe, Rohdichte und Druckfestigkeit der Proben erzeugt. Für die Analyse der Korrelation zwischen den lagerfeuchten Massen und den anderen Merkmalen der Grundgesamtheit wird die empirische Regression angewendet. Zur übersichtlichen Darstellung der Testergebnisse werden Streudiagramme und Korrelationskoeffizienten in Korrelations- und Scatterplotmatrizen gegenübergestellt.

Im Resultat der Korrelationstests erweist sich die lagerfeucht bestimmte Masse m_i als geeignetes Merkmal zur Beschreibung der Füllungs- und Produktgüte. Die Vermutung, dass die Lagerfeuchtigkeit der Proben die empirische Verteilungsfunktion der Steinmassen manipulieren könnte, hat sich nicht bestätigt. Bei den untersuchten Merkmalspaaren, "Masse lagerfeucht" und "Masse trocken", erreichen die Korrelationskoeffizienten einen Wert von $\rho = 0,980$. Eine ebenfalls noch gut ausgeprägte Korrelation weisen die Merkmalspaare "Masse lagerfeucht" und "Rohdichte" mit $\rho = 0,762$ sowie die Merkmalspaare "Masse lagerfeucht" und "Steindruckfestigkeit" mit $\rho = 0,740$ auf.

Die Einflüsse auf die Verteilung der Steinmassen werden mit Hilfe der Varianzanalyse nach Variationsursache untersucht. Für die Berechnung werden zellenbezogen Mittelwerte über alle Zellen \bar{m}_{ze} gebildet und dem Mittelwert der gesamten Stichprobe \bar{m} gegenübergestellt. Die Gesamtabweichung wird zur Berechnung der Variationsursache in fünf Teilsummen

- dem Einfluss der Zeilenlage innerhalb der zu fertigenden Einheit,
- dem Einfluss der Spaltenlage innerhalb der zu fertigenden Einheit,
- dem Einfluss der Wechselwirkung zwischen Zeilen- und Spaltenlage innerhalb der zu fertigenden Einheit,
- dem Einfluss der Zyklusfolge innerhalb der Stichprobe sowie f
- dem Einfluss einer nicht erklärten Reststreuung

differenziert und deren Wirkung auf die erreichte Steinmasse m_i gewichtet.

Für alle im Rahmen der Untersuchungen geprüften Steine aus Kern- und Vorsatzbeton ergibt sich folgende Rangfolge der Einflussfaktoren auf die Massen der Proben m_i :

1)	Zeileneinfluss mit durchschnittlich	47 %;
2)	Resteinfluss mit durchschnittlich	18 %;
3)	Zykluseinfluss mit durchschnittlich	17 %;
4)	Spalteneinfluss mit durchschnittlich	13 %;
5)	Wechselwirkung zwischen Zeile und Spalte mit durchschnittlich	5 %.

Der Einfluss der Zellenlage innerhalb der zu fertigenden Einheit (Zeilen- und Spalteneinfluss sowie die Wechselwirkung zwischen Zeilen- und Spalteneinfluss) erreicht

einen Wert von insgesamt 65 %. Die Ergebnisse im Resultat ausschließlich der ersten Füllstufen (Kernbeton) unterscheiden sich nur unwesentlich.

Die Lage der Zelle innerhalb der Fertigungseinheit übt folglich den exponierten Einfluss auf die erreichbare Masse in der Zelle m_i aus. Der Einfluss der Zeilenlage hat dabei mit 47% die größte Signifikanz. Die in der Kinematik des Füllwagens begründete Inhomogenität der Füllung bedarf daher besonderer Aufmerksamkeit bei der weiteren Analyse des Füllprozesses.

Analyse des Füllprozesses und erste Modellbildung

Die Füllung der Form mit Betongemenge ist ein äußerst komplexer dynamischer Prozess mit einer Vielzahl von maschinentechnischen und stofflichen Einflüssen. Einerseits wirken die Elemente der Füllausrüstung auf das im Füllraum zu verteilende Gemenge. Andererseits beeinflussen Kornzusammensetzung, Kornoberfläche, Kornform und Feuchtigkeit sowie Betonzusatzmittel die rheologischen Eigenschaften des einzufüllenden Betongemenges. Die Bedingungen während der Füllung verändern sich fortwährend. Die zunehmende Masse und Dichte im Füllraum, die dadurch bewirkte Abnahme der Masse im Transportraum sowie die Bewegungsfunktion des Füllwagens erzeugen sich fortwährend verändernde Bedingungen im Prozessraum.

In Abhängigkeit von der zu realisierenden Füllaufgabe ergeben sich in dem mit Betongemenge zu füllenden Raum grundsätzlich unterschiedliche Reibungsverhältnisse und Barrieren. Bei zwei aufeinander folgenden Füllstufen ist darüber hinaus die Ausgangssituation, bedingt durch die unterschiedlichen Dimensionen des Primärfüllraumes (erste Füllstufe) und des Sekundärfüllraumes (zweite Füllstufe), extrem unterschiedlich.

Zur Strukturierung der verschiedenen Einflüsse werden zunächst jeweils eine maschinentechnische und eine technologische Betrachtungsweise angewandt. Innerhalb der maschinentechnischen Betrachtung werden alle Einflüsse nach ihrem Wirkungsbereich im Prozessraum der Steinformmaschine differenziert. Alle stofflichen Einflüsse werden dabei auf das zu verdichtende Betongemenge reduziert, das mit seiner Masse, seiner Federsteifigkeit und seiner Dämpfung als ein Element im Schwingungssystem der Steinformmaschine betrachtet wird. Innerhalb der technologischen Betrachtungsweise werden die Einflüsse grundsätzlich nach Flächen-, Volumen- und Massenkenngrößen, nach maschinentechnischen Einflussgrößen und nach stofflichen Einflussgrößen differenziert.

Darüber hinaus werden die während der Füllung auftretenden Phänomene "Formstege und Formeinbauten als Barrieren im Füllraum", "Scherebene zwischen dem eingefüllten und dem ausfahrenden Betongemenge" sowie "Vibrationsverursachte Konvektion im Betongemenge" beschrieben.

Basierend auf den Untersuchungsergebnissen zur Füllungsgüte im industriellen Routinebetrieb und den Ergebnissen der Streuungszersetzung nach Variationsursache wird ein Modell zur Beschreibung der ersten Füllstufe entwickelt. Unter Berücksichtigung der koordinatenabhängig unterschiedlichen Überdeckungszeit t_U und unter Beachtung des abnehmenden Füllstandes im Füllkasten wird eine orts- und zeitabhängige Zellendruck-Matrix abgebildet. Das Bewegungsverhalten des Füllwagens und das Fließverhalten des zu verarbeitenden Betongemenges werden dabei zunächst stark vereinfacht dargestellt.

Unter Berücksichtigung der zeilenabhängigen Überdeckungszeit und des Füllungsgrades im Füllkasten werden koordinatenabhängige Druckprofile des Füllraumes, so genannte Zellendruck-Zeit-Funktionen (ZDZF), entwickelt. Diese sollen als Indikator die unterschiedlichen Bedingungen während der Füllung im Prozessraum beschreiben und gleichzeitig mit dem Prozessergebnis, den eingefüllten Massen m_i , korrelieren.

Numerische Modellierung des Füllprozesses unter Anwendung der Diskrete Elemente Methode

Für die Darstellung von Transport- und Lagerprozessen etablieren sich zunehmend virtuelle Modelle unter Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) als Alternative zu aufwändigen realen experimentellen Untersuchungen. Unter Nutzung der auf der DEM basierenden Simulationssoftware Particle Flow Code in 3 Dimensionen (PFC3D) wird ein Modell zur Simulation des Füllprozesses entwickelt. Zur Parametrierung der mikromechanischen Eigenschaften, die eine realitätsnahe Abbildung des Betongemenges mit seinen thixotropen Eigenschaften in der Simulation sicherstellen sollen, werden die am IFF Weimar e.V. entwickelten Methoden zur Kalibrierung des DEM Modells angewandt. Design und Dimension der Füllausrüstung, Masse des zu transportierenden Betongemenges und Masse des einzufüllenden Betongemenges sowie die Bewegungsfunktion des Füllwagens werden für die Simulation den Bedingungen der industriellen Produktion angenähert.

Mit dem numerischen Experiment wird es möglich, den Verlauf des Füllprozesses durch eine realitätsnahe Computeranimation detailliert und transparent darzustellen. Um die sich im Prozessraum (Transportraum + Füllraum) ausbildenden Fließprofile besser beobachten zu können, werden die Strukturen von Form und Füllwagen partiell transparent gestaltet oder völlig ausgeblendet. Durch die zusätzliche Zuweisung unterschiedlicher Farben für das Betongemenge können die sich im Prozessraum ausbildenden Fließprofile noch besser sichtbar gemacht werden. Mit der gleichzeitigen Berechnung der Druck-Zeit-Funktionen am Boden aller Formzellen wird über die gesamte Grundfläche des Füllraumes der Prozessverlauf quantifiziert.

Mit der Nachbildung des realen Prozesses und der Berechnung der numerisch erzeugten Füllungsgüte wird eine Grundlage für die Untersuchung kausaler Wechselbeziehungen zwischen der Füllaufgabe, der Füllausrüstung und dem Prozessverlauf bzw. dem Prozessergebnis geschaffen. Die Simulation wird dabei zunächst auf die Abbildung der ersten Füllstufe ohne Füllvibration beschränkt.

Versuche zur Verifizierung des Simulationsmodells und Verifizierung der ersten Modellbildung

Um das für die Simulation angewandte Gesamtmodell verifizieren zu können, wird das numerische Experiment an einer speziellen Versuchseinrichtung als reales Experiment nachgestellt. Genutzt wird dafür der eigens für die Untersuchung des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses an Steinformmaschinen entwickelte Versuchstand im Technikum des IFF Weimar e.V. Das Kernstück dieses Versuchstandes bildet eine modifizierte Steinformmaschine mit Kernfülleinrichtung. Peripher ist der Versuchstand zusätzlich mit einer Vielzahl unterschiedlicher Analyse- und Regeltechnik ausgestattet. Mit der Nutzung dieser Technik wird sichergestellt, dass die maschinentechnischen Einflussgrößen, wie beispielsweise Fahrweg und Fahrgeschwindigkeit des Füllwagens, während der Verifizierungsversuche präzise und reproduzierbar wiedergegeben werden.

Um die Aufnahme der Zellendruck-Zeit-Funktionen (ZDZF) während des Füllens in einer Steinformmaschine vornehmen zu können, ohne durch die Messung selbst den Füllvorgang zu stören, wird ein neuer Drucksensor entwickelt. Nach intensiven Tests und der Kalibrierung der Messkette wird dieser Sensor erstmals für die Verifizierungsversuche eingesetzt. Für die Installation der Sensoren am Zellenboden und die Ausführung der Messkabel wird der Versuchstand umfangreich präpariert.

Mit dem Verifizierungsversuch wird, wie in der Simulation, ausschließlich die erste Füllstufe realisiert. Auf die Anwendung einer Füllvibration wird ebenfalls verzichtet. Zur mathematischen Auswertung der gewonnenen Messwerte und zur Darstellung der

koordinaten- und zeitabhängigen Druckfunktionen werden die Daten nach den Versuchen mit Hilfe einer modifizierten Excel-Datei analysiert.

Mit der Abbildung der ZDZF gelingt es, den Verlauf des realen Prozesses qualitativ und quantitativ darzustellen. Die Profile der aufgezeichneten Funktionen korrespondieren deutlich mit der Bewegungsfunktion des Füllwagens. Koordinaten und zeitabhängige Effekte, die durch die Aktionen des Füllwagens im Füllraum erzeugt werden, können detektiert und quantifiziert werden. Mit Hilfe der aufgenommenen Druckprofile können die unterschiedlichen Überdeckungszeiten ermittelt und gegenübergestellt werden. Bereits bei der relativ kleinen, im Verifizierungsversuch zur Verfügung stehenden 24-teiligen Form unterscheiden sich die Überdeckungszeiten der beiden äußeren Zeilen deutlich mit dem Faktor $\bar{t}_{\bar{v}_{z6}} / \bar{t}_{\bar{v}_{z1}} \approx 2$.

Die Auswertung der im Ergebnis der Verifizierungsversuche erzeugten Füllungsgüte erfolgt durch die Abbildung der Massenverteilungsmatrizen, die Berechnung der statistischen Maßzahlen und die graphische Darstellung der Häufigkeitsverteilung. Um darüber hinaus zu prüfen, wie stark die im Ergebnis des Prozesses erreichte Füllungsgüte mit der Zellendruck-Zeit-Funktion $p_{(t)}$ korreliert, werden die Wechselbeziehungen zwischen dem Produkt aus mittleren Überdeckungsdruck und Überdeckungszeit $(\bar{p}_{\bar{v}} t_{\bar{v}})_i$ und den jeweils eingefüllten Massen m_i mit Hilfe zweier unterschiedlicher Regressionsmodelle untersucht.

Im Ergebnis der Anwendung eines einfachen linearen Regressionsmodells kann bereits der Nachweis einer deutlich ausgeprägten Korrelation zwischen den beiden Merkmalen mittleres Druckprofil $(\bar{p}_{\bar{v}} t_{\bar{v}})_i$ und Füllungsmasse m_i erbracht werden. Der Korrelationskoeffizient beträgt für dieses Regressionsmodell $\rho = 0,779$. Das Bestimmtheitsmaß aus dem Quotient von erklärter und totaler Variation beträgt $SQE/SQT = 0,605$.

Die für die Entwicklung des ersten stark vereinfachten Füllmodells gewählten Konventionen weisen einen unterschiedlich stark ausgeprägten Einfluss von Überdeckungsdruck t_p und Überdeckungszeit $t_{\bar{v}}$ auf die im Ergebnis gefüllte Masse m_i aus. In Anlehnung an den in Gleichung 6.5 definierten nicht linearen funktionalen Zusammenhang wird durch Logarithmieren ein weiteres auf multipler linearer Regression basierendes Modell erstellt. Im Ergebnis der Anwendung dieses Regressionsmodells kann der Korrelationskoeffizient auf $\rho = 0,820$ gesteigert werden. Das Bestimmtheitsmaß erhöht sich somit auf $SQE/SQT = 0,670$. Die unterschiedliche Wertigkeiten der Einflussgrößen Zeit und Druck auf die jeweils erreichte Füllmasse werden durch die ermittelte Regressionsgleichung

$$m = 433 \cdot t_{\bar{v}}^{0,309} \cdot \bar{p}_{\bar{v}}^{0,185} \quad (8.7)$$

beschrieben. Damit kann es als gesichert betrachtet werden, dass die Überdeckungszeit entsprechend stärkeren Einfluss auf das Prozessergebnis ausübt als der Überdeckungsdruck. Das Wissen um den unterschiedlichen Einfluss beider Parameter hat für die zukünftigen Bemühungen, den Füllprozess zu optimieren, entsprechende Relevanz.

Mit der Aufnahme der Zellendruck-Zeit-Funktionen und der Bestimmung der Füllungsgüten werden im Ergebnis des realen Experimentes zwei objektive Ebenen für die Verifizierung des Simulationsmodells geschaffen.

Gegenüberstellung der Ergebnisse

Zum Abschluss der Untersuchungen werden die Ergebnisse aus den drei unterschiedlichen Analyseebenen "Produktionsbetrieb" (industrielle Routine), "Verifizierungsversuch" (reales Experiment) und "Simulation" (numerisches Experiment) gegenübergestellt. Mit dem Vergleich der ermittelten Messwerte und Funktionen wird einerseits die Übereinstimmung des numerischen Experimentes mit der Realität geprüft. Andererseits können aus der Analyse von Übereinstimmungen und Divergenzen noch vorhandene Systemfehler erkannt und die Modelle damit weiterentwickelt werden.

Der Vergleich der Füllungsgüten erfolgt durch die Gegenüberstellung der empirischen statistischen Kennwerte und Häufigkeitspolygone der Massenverteilungen. Für die Zusammenfassung der im industriellen Routinebetriebe ermittelten statistischen Maßzahlen werden zunächst aus den Ergebnissen der Datensätze *IK* bis *IIK* (Kapitel 4) jeweils Mittelwerte berechnet und diese den Kennwerten der numerischen und realen Experimente gegenübergestellt.

Der stichprobenbezogene Vergleich zeigt, dass die Streuungsmaße im Ergebnis der Simulation gegenüber den Ergebnissen des Verifizierungsversuchs einen näherungsweise zweieinhalbfachen Wert erreichen. Die Streuungsmaße im Ergebnis des industriellen Routinebetriebes erreichen hingegen etwa nur zwei Drittel des Niveaus aus dem Verifizierungsversuch. Mit der Gegenüberstellung der Häufigkeitspolygone werden Übereinstimmungen und Unterschiede der Massenverteilungen durch die Lage und Form der Grafen beschrieben. Die Polygone im Ergebnis des numerischen und des realen Experimentes sind ähnlich in Lage und Form. Bestehende Divergenzen sind im Minimum der virtuell erzeugten Massenverteilung begründet. Insbesondere die besetzten Füllungskennzahlklassen unterhalb 0,88 erzeugen die relativ hohe Streuung und beeinflussen die Form des Polygons signifikant. Die Häufigkeitspolygone im Ergebnis des Industriellen Routinebetriebes zeichnen sich gegenüber den Experimenten durch vergleichsweise hohe Modalwerte und geringere Streubreiten aus. Die zyklusbezogene Gegenüberstellung verdeutlicht die Unterschiede in den Ausgangsbedingungen der realen und virtuellen Prozesse. Die exakte Reproduzierbarkeit der Bewegungsfunktion des Füllwagens und der Transportmasse im Füllkasten minimieren in der Simulation die Abweichungen von Zyklus zu Zyklus. Die Streuungsmaße im Ergebnis des numerischen Experimentes erreichen etwa nur ein Fünftel des Niveaus aus dem Ergebnis des Verifizierungsversuches. Die Streuungsmaße im Ergebnis des industriellen Routinebetriebes erreichen näherungsweise die Hälfte des Niveaus vom Wert des Verifizierungsversuchs.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Varianzanalyse nach Variationsursache zeigt übereinstimmende Rangfolgen. In allen drei Untersuchungsebenen ist dabei der Zeileneinfluss der mit Abstand stärkste Einflussfaktor auf die erreichte Füllmasse. Dadurch wird noch einmal das in der vorliegenden Arbeit entwickelte phänomenologische Modell bestätigt. Unterschiede in der Signifikanz einzelner Variationsursachen im Vergleich der verschiedenen Untersuchungsebenen sind wiederum in den differenten Ausgangs- und Prozessbedingungen begründet.

Die Aufnahme der Zellendruck-Zeit-Funktion beschränkt sich auf das numerische und das reale Experiment. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Versuchsebenen erfolgt beispielhaft an den Funktionsverläufen ausgewählter Messpunkte zweier erzeugter Fertigungseinheiten. Der Vergleich der Funktionsverläufe zeigt qualitativ gute Übereinstimmungen. Die Druckentwicklung während des Füllens zeigt in beiden Experimenten den Einfluss der Füllwagenaktionen "Füllwagen vor", "Pendeln" und "Füllwagen zurück" auf das Spannungsniveau im Füllraum an. Auffällige Wechselwirkungen im Ergebnis der Relativbewegungen zwischen Füllkasten und Formstegen werden erstmals messbar detektiert. Der sich am Ende der Füllung einstellende

Zellendruck p_{E_i} und die je Zelle eingefüllte Masse m_i korrelieren sehr gut miteinander. Ebenfalls eine gut ausgeprägte Korrelation kann für beide Untersuchungsebenen zwischen dem Produkt aus mittlerem Überdeckungsdruck und Überdeckungszeit $\bar{p}_{\bar{U}_i} \cdot t_{\bar{U}_i}$ und der eingefüllten Masse m_i nachgewiesen werden.

Divergenzen zwischen numerischem und realem Experiment liegen in der absoluten Größe des Druckes am Zellenboden. In der Simulation werden mit dem Überfahren der Füllkastenwand außergewöhnlich große Spannungsspitzen im Füllraum erzeugt. Bedingt durch die idealisierte Kugelform, den relativ großen Durchmesser der Kugeln sowie in deren Deformationsverhalten werden mit der Relativbewegung zwischen Füllkastenwand und Formsteg durch eingeklemmte Partikel Spannungsspitzen erzeugt. Das Modell verstärkt somit die im Prozessraum auftretenden Spannungen, welche die Analyse von schwächeren Effekten erleichtert. Die in den numerischen Experimenten generierten Zellendruck-Zeit-Funktionen eignen sich daher trotz noch vorhandener Divergenzen zur Realität für die Beschreibung und Analyse des Füllprozesses.

Zusammenfassend können die relativen Ergebnisse aller drei Abstraktionsebenen

- Produktionsbetrieb (industrielle Routine),
- Verifizierungsversuch (reales Experiment) und
- Simulation (numerisches Experiment)

als zufrieden stellend bis gut übereinstimmend bezeichnet werden. Das entwickelte Simulationsmodell stellt mit dem bisher erreichten Stand ein geeignetes Werkzeug zur Analyse und Optimierung des Füllprozesses dar.

11. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Formgebungs- und Verdichtungsprozess bei der Herstellung von Betonsteinen umfasst die drei Phasen Füllen, Verdichten und Entschalen. Die Steinformmaschine realisiert alle drei Phasen als kompaktes, vollautomatisiertes technisches Mittel. Die ausreichende und gleichmäßige Füllung des Füllraumes mit Betongemenge, die ausreichende und gleichmäßige Verdichtung des in den Füllraum eingebrachten Betongemenges sowie die Trennung der Schalelemente vom hergestellten Frischbetonkörper, ohne die erzeugten Strukturen zu stören, ergeben in Summe die Güte des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses. Diese komplexe Betrachtungsweise soll für zukünftige Forschungen und Analysen, die den Formgebungs- und Verdichtungsprozess bei der Herstellung von Betonsteinen untersuchen, konsequent Anwendung finden.

Die Bestimmung der Füllungsgüte, nach der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methode, ist ein geeignetes Instrument zur Quantifizierung und Bewertung der ersten Phase des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses, dies sowohl für Analysen im industriellen Betrieb als auch für Analysen realer und numerischer Experimente. Die Methode kann unabhängig von der Größe und/oder der Struktur des zu befüllenden Raumes Anwendung finden. Für zukünftige Analysen der Formgebungs- und Verdichtungsgüte im Allgemeinen und der Füllungsgüte im Besonderen soll die Methode in Forschung und Praxis konsequent angewendet und die Ergebnisse in einer Datenbank dokumentiert werden.

Die im industriellen Routinebetrieb ermittelten Füllungsgüten zeigen bereits bei relativ einfachen Füllaufgaben ein überraschend niedriges Niveau. Insbesondere gelingt es im Ergebnis beider Füllstufen nicht, eine der Zielrohndichte entsprechende Gemengemasse in den zu füllenden Raum einzubringen. Das erzeugt zu niedrige Betonrohndichten und vermindert die Qualität der Produkte. Die Auswertungen zeigen darüber hinaus, dass mit der ersten Füllstufe deutlich zu wenig Kernbeton in die Form eingebracht wird. Gleichzeitig wird wiederum mit der zweiten Füllstufe mehr Vorsatzbetongemenge eingefüllt, als eigentlich angestrebt. Das erhöht die Materialkosten pro Mengeneinheit und verschlechtert das betriebswirtschaftliche Ergebnis des Herstellers.

Mit der Analyse der Arbeitsgänge während des Füllens im Kapitel 2 wird deutlich, dass einer Unterfüllung der Form mit Kernbeton (Füllstufe 1) im Regelfall zwingend eine Überfüllung der Form mit Vorsatzbeton (Füllstufe 2) folgt. Je geringer die Füllmasse an Kernbeton in der Form ist, desto größer wird das Volumen des im Ergebnis der ersten Verdichtungsstufe entstehenden Sekundärfüllraumes. Dieser bestimmt wiederum maßgeblich die mit dem Vorsatzbeton erreichbare Füllungsmasse. Aufgabe zukünftiger Forschungsarbeiten wird es daher sein, die bisher für den industriellen Routinebetrieb angewandten Regeln für die Wahl der Formhöhe und die Wahl des Prozessregimes grundsätzlich kritisch zu überprüfen, beziehungsweise entsprechende Alternativen zu entwickeln.

Die Varianzanalyse nach Variationsursache ist eine gut geeignete Methode für die Quantifizierung der Einflüsse auf den Füllprozess. Mit der Berechnung der unterschiedlichen Wertigkeiten wird über alle untersuchten Stichproben der dominante Einfluss der Zellenlage auf die eingefüllte Masse m_i unter Beweis gestellt. Aber auch in Einzelfällen auftretende zyklusbezogene Probleme werden zuverlässig angezeigt. Für zukünftige Analysen soll auch diese Methode konsequent in Forschung und Praxis Anwendung finden und die so ermittelten Ergebnisse in eine Datenbank einfließen. Die Weiterentwicklung des Modells ist dabei mit dem Ziel anzustreben, noch mehr Einflüsse in der Streuungszersetzung zu berücksichtigen und damit den Anteil der bisher nicht erklärten Abweichungen zu reduzieren.

Für die Charakterisierung der unterschiedlichen Füllaufgaben und/oder unterschiedlichen Füllrichtungen werden im Ergebnis der phänomenologischen Betrachtungsweise Flächen-, Volumen- und Massenverhältnisse beschrieben. Diese sollen mit Hilfe der Füllraumkennzahl, der Füllflächenkennzahl und der Transportmassenkennzahl quantifiziert werden. Diese Kennzahlen fließen nicht explizit in die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Modelle ein, beeinflussen aber implizit Verlauf und Ergebnis des Prozesses. Aufgabe zukünftiger Untersuchungen wird es sein, die Werte dieser Kennzahlen zunächst einmal systematisch für unterschiedliche Füllaufgaben zu erfassen und deren Einfluss auf die Füllungsgüte im Speziellen und auf die Formgebungs- und Verdichtungsgüte im Allgemeinen zu überprüfen. So könnte beispielsweise die Füllraumkennzahl als geeignete Maßzahl für die Charakterisierung des Schwierigkeitsgrades einer Produktionsaufgabe für das Füllen, Verdichten und Entschalen genutzt werden.

Die Simulation des Füllprozesses mit Hilfe der auf der Diskrete-Elemente-Methode basierenden Software PFC3D hat sich als ein geeignetes Hilfsmittel für die Erforschung der Wirkungsmechanismen während Transport und Verteilung des Betongemenges im Füllraum erwiesen. Mit der virtuellen Abbildung werden die Interaktionen der Füllausrüstung und die sich im Prozessraum ausbildenden Fließprofile sichtbar. Die Berechnung der Füllungsgüte im Ergebnis des virtuellen Experimentes dient als Indikator für die Wirkung des virtuellen Prozessverlaufs. Aufgabe nachfolgender Forschungen wird es nun insbesondere sein, mit Hilfe der Simulation Geometrie, Bewegungsfunktion und Füllungsgrad des Füllwagens in Abhängigkeit von der jeweiligen Füllaufgabe zu optimieren. Auch Experimente mit grundsätzlich verändertem Aufbau und/oder veränderter Kinematik der Füllausrüstung sollen mit Hilfe der Simulation getestet werden.

Die auf der DEM basierende Prozesssimulation besitzt ein großes Potential von Anwendungsmöglichkeiten für den gesamten Formgebungs- und Verdichtungsprozess an Steinformmaschinen. Sie kann als Werkzeug für die Antriebsdimensionierung und Prozessprojektierung Anwendung finden.

Um in einem weiteren Schritt zukünftig auch den Einfluss unterschiedlicher Gemengeeigenschaften in der Simulation prüfen zu können, gilt es darüber hinaus, das für die Darstellung der Gemengeeigenschaften gewählte Modell grundsätzlich weiter zu entwickeln, dies sowohl bezüglich Partikelzahl, Partikelgröße und Partikelform als auch bezüglich der Definition der Mikroparameter zur Darstellung des Mörtels.

Die im realen und numerischen Experiment aufgenommenen koordinaten- und zeitabhängigen Zellendruck-Zeit-Funktionen haben gezeigt, dass diese sowohl als Indikator für den Verlauf als auch als Indikator für das Ergebnis des Füllprozesses genutzt werden können. Die aufgezeichneten Profile der Funktionen zeigen und quantifizieren erstmals die Wirkung des Füllwagens auf das im Prozessraum befindliche Gemenge. Das je Zelle ermittelte Produkt aus mittlerem Überdeckungsdruck und Überdeckungszeit $(\bar{p}_V t_V)_i$ und die jeweils erreichte Füllmasse m_i stehen in gut ausgeprägter Korrelation zueinander. Darüber hinaus geben die Resultate der Druckmessungen Aufschluss über das während der Füllung reale Spannungsniveau im Füllraum.

Die Korrelationstests mit Hilfe der multiplen linearen Regression quantifizieren die unterschiedlichen Einflüsse von Überdeckungszeit und Überdeckungsdruck auf die Füllungsgüte. Mit dem gewählten Regressionsmodell wird ein exponierter Einfluss der Überdeckungszeit auf die eingefüllte Gemengemasse nachgewiesen. Vor dem Hintergrund des in der Industrie stetig wachsenden Zeitdrucks und dem Bemühen, alle Arbeitsgänge an Steinformmaschinen weiter zu beschleunigen, wird dies im Sinne der Qualitätssicherung perspektivisch ein Umdenken erforderlich machen. Aufgabe zukünftiger Forschungen wird es insbesondere sein, qualitätssichere und ökonomische Lösungen für das Füllen der Form mit Betongemenge zu entwickeln.

Literaturverzeichnis

- [1] Information des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) Arbeitsgruppe Bau- und Baustoffmaschinen
- [2] HESS Maschinenfabrik GmbH & Co. KG: Neue Steinfertigungsanlage in Spanien in Betrieb genommen. In: BetonWerk International 6/2006, S.120 – 123
- [3] CTI, Inc.: Eines der größten Betonsteinwerke der Welt nimmt seine Produktion in Guatemala City auf. In: Betonwerk + Fertigteil- Technik International 9/2003, S. 98
- [4] Schwarz, S.: Neue, vollautomatisch gesteuerte und überwachte Großanlage für Betonpflastersteine in Angelo Lodigiano (Italien). In: Betonwerk + Fertigteil- Technik 10/2003, S. 50 – 56
- [5] Kuch, H.: Moderne Verfahren für die Formgebung und Verdichtung von Betonwaren und Fertigteilen. 15. Internationaler Kongress der Beton- und Fertigteilindustrie, BIBM. Tagungsband, Paris 7/1996
- [6] Mothes, St.: Betonsteinfertigung mit harmonischer Vibration in Italien in die Praxis umgesetzt. In: BetonWerk International 3/2007, S. 102 - 106
- [7] Beton + Fertigteil Jahrbuch 08; Bauverlag BV GmbH, Gütersloh 12/2008.
- [8] Kuch, H. u.a.: Weiterentwicklung des Füllprozesses in Betonsteinfertigern zur Gewährleistung homogener Produktqualität von Betonwaren (Befüllungsvorgang). Literatur- und Produktrecherche, Institut für Fertigteiltechnik und Fertigbau Weimar e.V., 2006
- [9] Kuch, H.; Schwabe, J.-H.; Volkland, U.: Formgebung und Verdichtung von Betonbauteilen. In: Betonwerk + Fertigteil- Technik 7/1999, S. 74 – 81
- [10] Schlecht, B.; Neubauer, A.: Steigerung der Produktqualität durch effiziente Verdichtung. In: Betonwerk + Fertigteil- Technik 9/2000, S. 44 – 52
- [11] DIN EN 12629-2: Maschinen für die Herstellung von Bauprodukten aus Beton und Kalksandsteinmassen - Sicherheit - Teil 2: Steinformmaschinen; Ausgabe: 6/2003
- [12] Kuch, H. u.a.: Effektivierung der Auflastwirkung in Betonsteinfertigern. Schlussbericht zum Forschungsprojekt für die Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V., IFF Weimar e.V., 2005
- [13] Kuch, H. u.a.: Schockvibrationsregime. Schlussbericht zum Forschungsprojekt für die Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V., IFF Weimar e.V., 1999
- [14] Mothes, St.: Untersuchung zur Befüllung der Form mit Frischbetongemenge bei der Herstellung von Betonpflastersteinen im industriellen Routinebetrieb. In: Tagungsband International Concrete Conference Sun City - South Africa 2008, S. 92 – 95

- [15] Mothes, St.: Befüllung von Formen bei der Herstellung von Betonwaren. In: Tagungsband 14. IFF Fachtagung Weimar 2007, S. 34 – 35
- [16] Mothes, St.: Untersuchungen zur Befüllung der Form mit Frischbetongemenge. In: BetonWerk International 1/2008, S. 114 - 120
- [17] Mothes, St.: Erfahrungen mit der Harmonischen Vibration bei der Herstellung von Betonwaren. In: BetonWerk International 6/2007, S. 90 - 97
- [18] Borghoff, M.: Einsatz der harmonischen Vibration in einem Steinfertiger. In: Betonwerk + Fertigteil- Technik 9/2007, S. 70 – 77
- [19] Becker, G.; Mothes, St.: Die harmonische Vibration – revolutionäres Vibrationssystem. In: Betonwerk + Fertigteil- Technik 12/2003, S. 40 – 47
- [20] Schwabe, J.-H.; Kuch, H.; Mothes, St.: Harmonische Vibration bei Betonsteinmaschinen. In: BetonWerk International 5/2004, S. 114 - 117
- [21] Claus, C.: Höchste europäische Auszeichnung für Förderpreis – Gewinner aus der Betonbranche. In: Die Industrie der Steine + Erden 1/2006, S. 30 – 32
- [22] Schwabe, J.-H.; Kuch, H.; Mothes, St.: Harmonische Vibration bei Steinformmaschinen. In: Die Industrie der Steine + Erden 1/2006, S. 30 – 34
- [23] Borghoff, M.: Leistungssteigerung und Lärminderung mit harmonischer Vibration –Produktion. In: Betonwerk + Fertigteil- Technik 10/2007, S. 22 – 27
- [24] Schulze, C.: Pulver und Schüttgüter – Fließigenschaften und Handhabung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006
- [25] Kuch, H. u.a.: Eigenschwingfrequenzen von Formunterteilen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt für die Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V., IFF Weimar e.V., 2005
- [26] Schutzrechtsanmeldung der Rampf Formen GmbH: Titel – Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Formsteinen. Aktenzeichen – 103 11 916.7; Anmeldung in DE vom 17.03.2003,
- [27] Sachs, L.: Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden. 11. Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004
- [28] Storm, Regina.: Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle, 12. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München 2007
- [29] Information der Firma Albrecht Braun GmbH Amstetten
- [30] Information der Firma Becker Consult GmbH Aarbergen

- [31] Seeger, S.: Statistische Analyse ausgewählter Festbetoneigenschaften bei der Produktion von Betonsteinen. Bachelorarbeit, Technische Universität Ilmenau, Juni 2009
- [32] DIN 18501: Pflastersteine aus Beton, November 1982
- [33] DIN EN 1338: Pflastersteine aus Beton -Anforderungen und Prüfverfahren-, August 2003
- [34] Blume, F.; Claußen, T.: Pflastersteine aus Beton nach DIN 18501 und nach europäischem Normentwurf, Bericht über Ergebnisse einer Zentralprüfung. In: Betonwerk- und Fertigteiltechnik 4/1994, Bauverlag Wiesbaden
- [35] Nollau, V.: Statistische Analysen - Mathematische Methoden der Planung und Auswertung von Versuchen, 2. Auflage. VEB Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig 1979
- [36] Kuch, H.: Modellbildung bei der Vibrationsverdichtung von Beton. Betonwerk + Fertigteil- Technik, 02/1992, S. 101 - 106
- [37] Grundlagenuntersuchungen zur Kennwertermittlung von Baustoffen bei Formgebungsprozessen. Schlussbericht zur Grundlagenforschung Kennwerte für Betongemenge Reg.-Nr. 2002WF022, IFF Weimar e.V. , 01/02005
- [38] Kuch, H. u.a.: Einflussgrößen auf die qualitätsgerechte Fertigung von Betonwaren. In: BetonWerk International 10/2004, S. 106 - 112
- [39] Pöschel, T.: Dynamik Granularer Systeme - Theorie, Experimente und numerische Experimente. Logos Verlag Berlin 2000
- [40] IFF Weimar e.V., Rampf Formen GmbH: Formüberwachung - Entwicklung eines energieautarken Sensorsystems zur Erfassung und Überwachung des Schwingungsverhaltens von Formenwerkzeugen an Betonsteinfertigern. Abschlussbericht Nr. 0724, 2007
- [41] Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik – Forschungsgebiet mit Zukunft. In: Schüttguttechnik 12/2006, S. 474 - 478
- [42] Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik – Grundlagen und Kalibrierung . In: Schüttguttechnik 12/2006, S. 480 - 486
- [43] Gröger, T.: Partikelmechanische Untersuchungen zur senkrechten Schlauchgutförderung. Magdeburg; Otto-von-Guericke-Universität, Dissertation, 1990
- [44] Lungfield, A.: Ermittlung der Belastungsgrößen mittels der Diskrete-Elemente-Methode für die Auslegung von Sturzmühlen. Freiberg; Technische Universität Bergakademie, Dissertation, 2002
- [45] Wehry,T.: 3D Simulationsmodell für bewegte Schüttgüter mit unregelmäßige geformten Partikeln. Paderborn, Universität Paderborn, Dissertation, 2008

- [46] Dürr, V.: Vergleichende Untersuchungen experimentell bestimmter und DEM-basierter Verweilzeitverteilungen von Schwerkraftmischern. Kaiserslautern; Technische Universität Kaiserslautern, Dissertation, 2004
- [47] Kuch, H., u.a.: Grundlagenuntersuchung zur Beschreibung mathematischer und numerischer Modellierung des Verarbeitungsverhaltens thixotroper schüttgutähnlicher Baustoffe wie Frischbeton. FuE-Bericht. IFF Weimar e.V.1999
- [48] Patentschrift DE 10 2006 034 450.2, Verfahren zur Befüllung einer Form mit Gemenge und Füllwagen
- [49] Cundall, P. A.; Strack, O.D.L.: A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique 29/1979 S. 47 - 65
- [50] Itasca Consulting Group Inc.: PFC3D – Theory and Background
<http://www-e.uni-magdeburg.de/katterfe/Schuettguttagung2003.pdf>
- [51] Ribitsch, V.: Rheologie, L.V.-Nr.: 646.508,WS,1-stündig. Universität Graz
http://physchem.kfunigraz.ac.at/rc/Ribitsch_Pfragner/Rheologie_Vorlesung_gesamt1.pdf
- [52] Cundell, P. A.; Konietzky, H.; Potyondy, D.O.:PFC – ein neues Werkzeug für numerische Modellierung. In: Bautechnik 73/ 1996 Heft 8, S. 492-498
- [53] IFF Weimar e. V.: Weiterentwicklung des Füllprozesses in Betonsteinfertigern zur Gewährleistung homogener Produktqualität von Betonwaren. Zwischenbericht zum Projekt, Reg.-Nr. IW 050249; Laufzeit 01.02.2005 – 31.12.2006;

Anlagen

Anlage 1:

Ausgewählte Beispiele unterschiedlicher frisch entschalter Betonsteine



Rasenkantensteine



Rechteckpflaster mit Drainagefuge



Großformatige Pflasterplatte



Schalsteine



Quadratpflastersteine



Rundbordsteine

Anlage 1:

Ausgewählte Beispiele unterschiedlicher frisch entschalter Betonsteine



Pflasterplatten



Hohlblocksteine



Palisaden



Rasengitterplatten



Terrassenplatten



Verbundpflastersteine

Anlage 2.1: Ausgewählte Beispiele unterschiedlicher konstruktiver Lösungen zur Gestaltung des Kernfüllwagens



Variante der Fa. REKERS (D)



Variante der Fa. AME (A)



Variante der Fa. SCHLOSSER (D)



Variante der Fa. FRIMA (D)

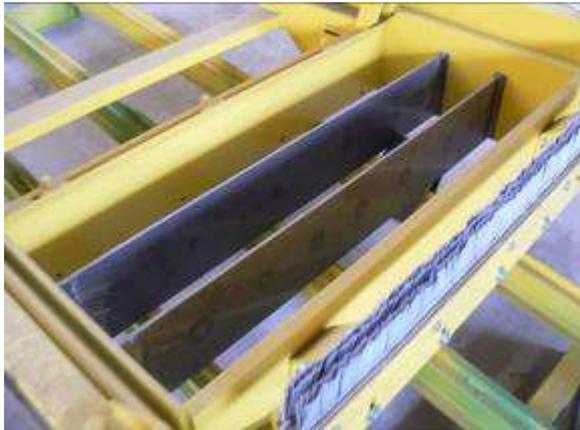


Variante der Fa. QUADRAL (F)



Variante der Fa. HESS (D)

Anlage 2.2: Ausgewählte Beispiele unterschiedlicher konstruktiver Lösungen zur Gestaltung des Vorsatzfüllwagens



Variante der Fa. REKERS (D)



Variante der Fa. OMAG (D)



Variante der Fa. QUADRAL (F)



Variante der Fa. FRIMA (D)



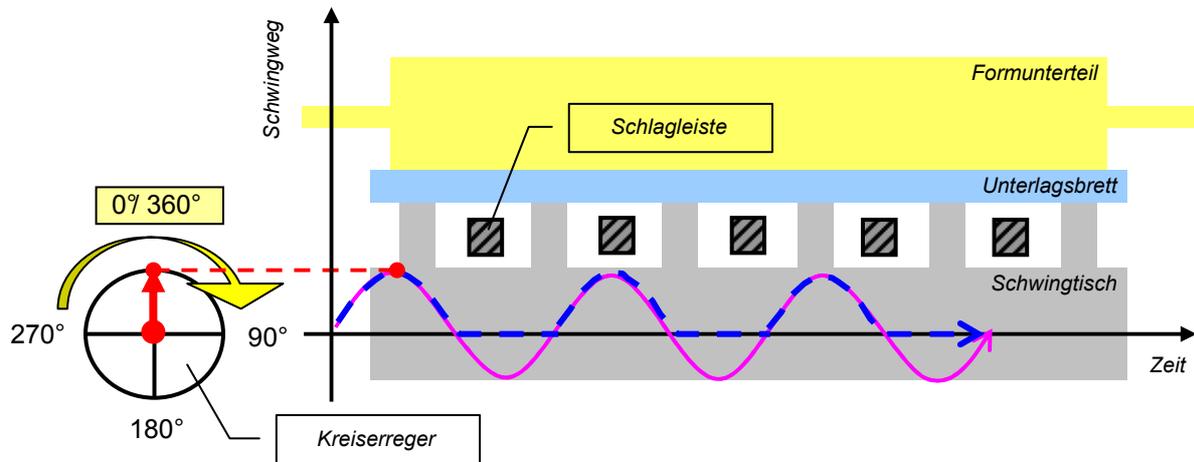
Variante der Fa. AME (A)



Variante der Fa. SCHLOSSER (D)

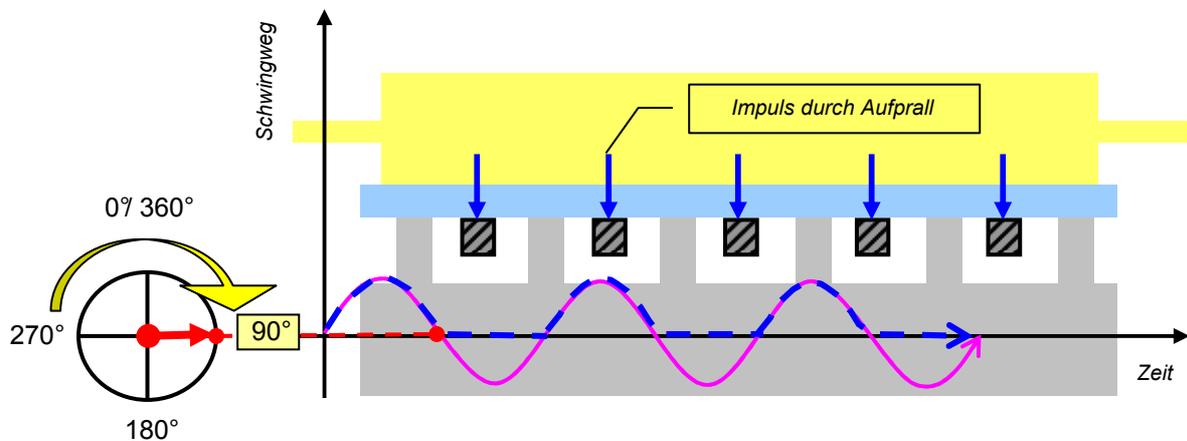
Anlage 2.3:

Schematische Darstellung der Bewegungsfunktionen von Schwingtisch und Unterlagsbrett bei Systemen mit Schockvibration



Figur 1:

In der Aufwärtsbewegung erreicht das System Schwingtisch, Unterlagsbrett und Formunterteil seinen oberen Umkehrpunkt.



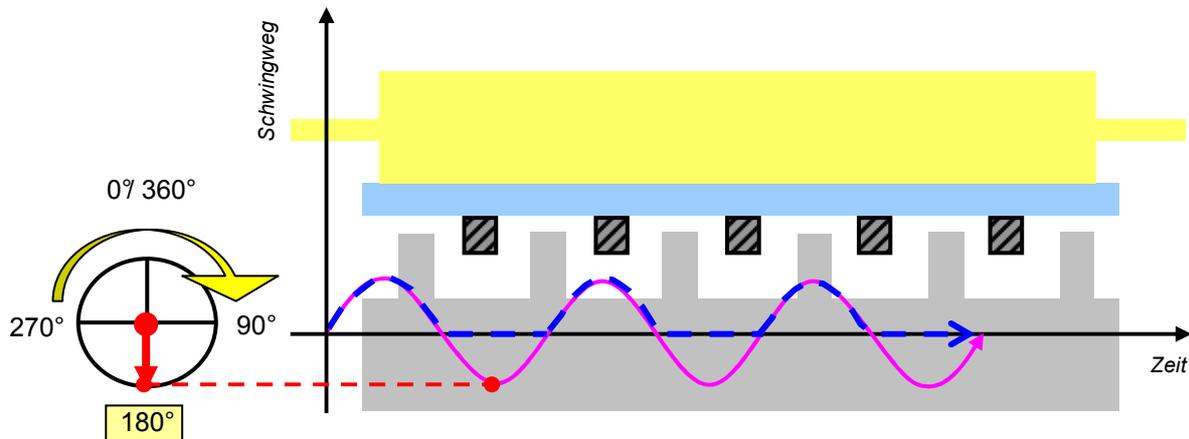
Figur 2:

In der Abwärtsbewegung hat das System näherungsweise seine maximale Geschwindigkeit erreicht. In dieser Phase prallt das Unterlagsbrett mit der Form gegen die feststehenden Schlagleisten. Es kommt zum ersten Stoß innerhalb der Periode.

 Weg - Zeit - Funktion Unterlagsbrett
 Weg - Zeit - Funktion Schwingtisch

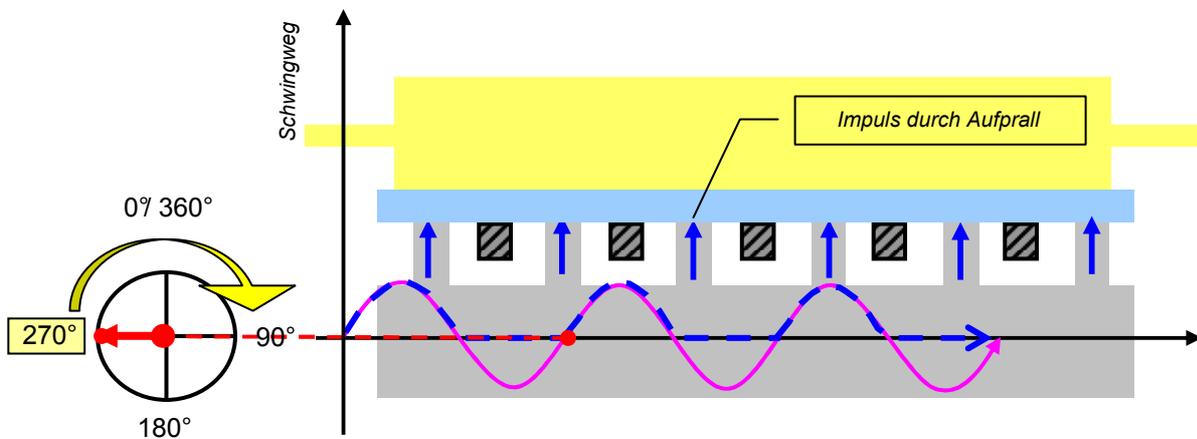
Anlage 2.3:

Schematische Darstellung der Bewegungsfunktionen von Schwingtisch und Unterlagsbrett bei Systemen mit Schockvibration



Figur 3:

In der Abwärtsbewegung erreicht der Schwingtisch seinen unteren Umkehrpunkt. Brett und Form ruhen auf dem Schlagrahmen.



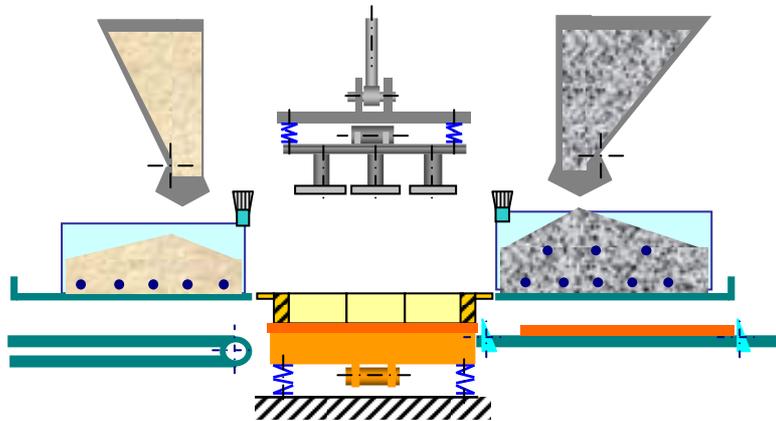
Figur 4:

Der Tisch ist in der Aufwärtsbewegung und hat näherungsweise seine maximale Geschwindigkeit erreicht. In dieser Phase prallt er gegen das ruhende Unterlagsbrett mit Form. Es kommt es zum zweiten Stoß innerhalb der Periode.

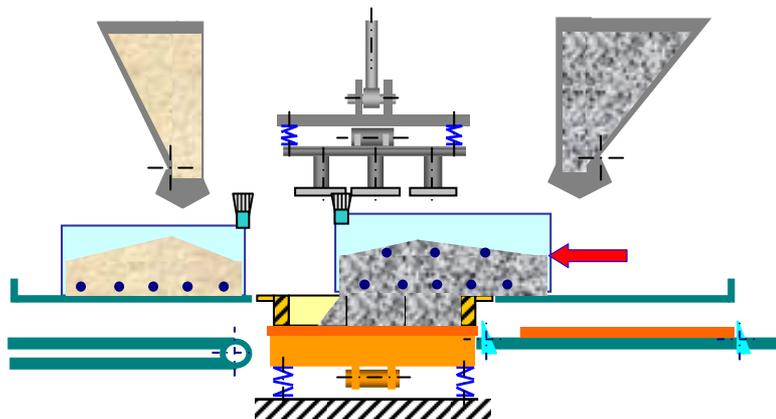
— — — — — → Weg - Zeit - Funktion Unterlagsbrett
 ~~~~~ Weg - Zeit - Funktion Schwingtisch

## Anlage 2.4:

### Schematische Darstellung der Arbeitsgänge der Formgebung und Verdichtung an Steinformmaschinen bei der Herstellung von Betonpflastersteinen



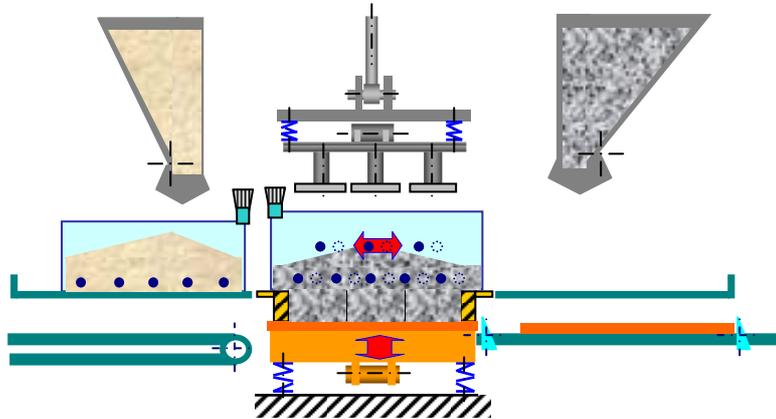
**Figur 1 :**  
Die Steinformmaschine befindet sich in Grundstellung. Die gefüllten Füllwagen stehen unter den Füllsilos. Die Auflast hat ihre Reinigungsposition eingenommen.



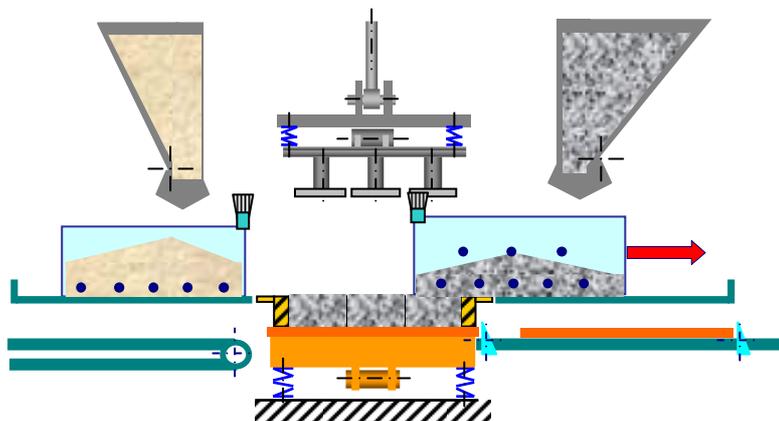
**Figur 2 :**  
Die erste Phase der Formgebung und Verdichtung, die Füllung der Form mit Betongemenge, startet mit der Kernbetonfüllung (Füllstufe 1). Der Kernfüllwagen fährt über das leere Formunterteil. Das Betongemenge beginnt, in den zu füllenden Raum zu fließen. Gleichzeitig werden die Druckstücke des Formenstempels durch die am Füllwagen montierte Bürste gereinigt.

## Anlage 2.4:

Schematische Darstellung der Arbeitsgänge der Formgebung und Verdichtung an Steinformmaschinen bei der Herstellung von Betonpflastersteinen



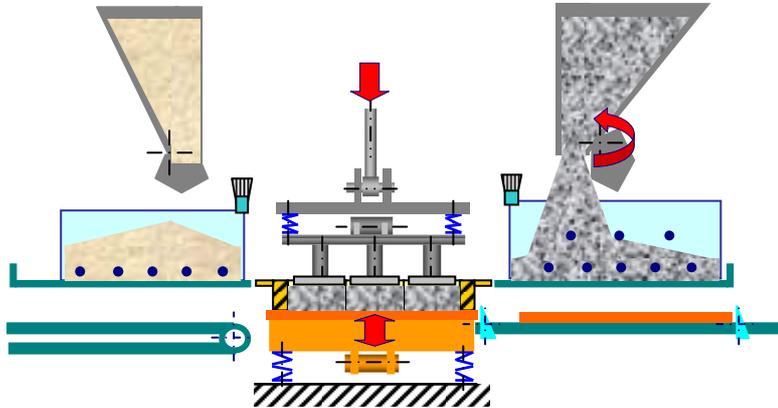
**Figur 3 :**  
Der Kernfüllwagen und/oder der Schüttelrost pendeln über dem Formunterteil und verteilen das einzufüllende Betongemenge. Zusätzlich kann durch den Schwingtisch über Fertigungsunterlage und Formunterteil Vibration in das Betongemenge eingetragen werden.



**Figur 4 :**  
Der Kernfüllwagen fährt zurück in seine Grundstellung. Mit dem Erreichen der Grundstellung des Kernfüllwagens unter dem Füllsilobehälter wird die erste Füllstufe beendet.

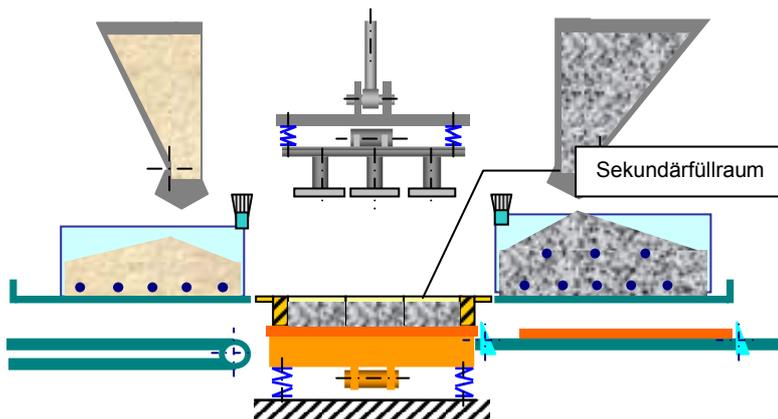
## Anlage 2.4:

### Schematische Darstellung der Arbeitsgänge der Formgebung und Verdichtung an Steinformmaschinen bei der Herstellung von Betonpflastersteinen



**Figur 5 :**

Die *zweite Phase* der Formgebung und Verdichtung beginnt mit ihrer ersten Stufe, der Vorverdichtung des eingebrachten Kernbetongemenges. Der Formstempel wird auf die Oberfläche des eingebrachten Kernbetongemenges gepresst. Zusätzlich kann durch den Schwingtisch über Fertigungsunterlage und Formunterteil Vibration in den mit Betongemenge gefüllten Raum eingetragen werden. Das Gemenge wird vorverdichtet und der Sekundärfüllraum generiert. Parallel zu diesen Arbeitsgängen kann die Regelung des Füllstandes im Kernfüllwagen erfolgen.

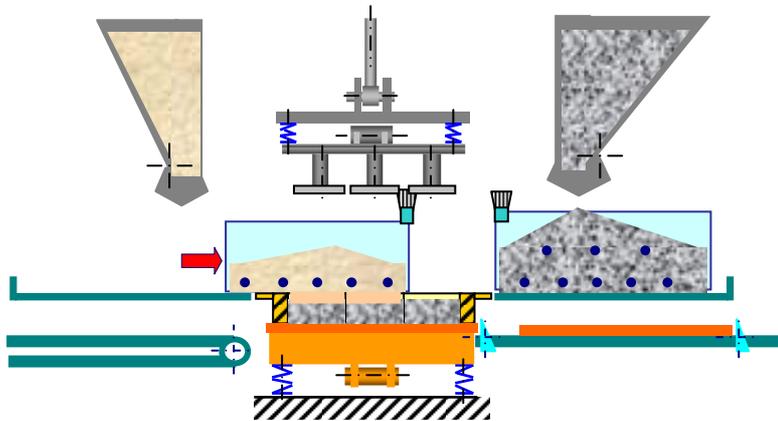


**Figur 6 :**

Die Auflast fährt wieder zurück in ihre Grundstellung. Der mit Vorsatzbetongemenge zu füllende Sekundärfüllraum wird sichtbar.

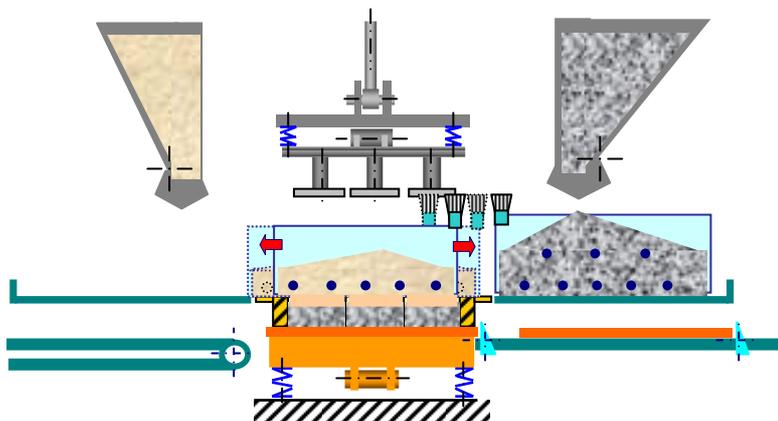
## Anlage 2.4:

### Schematische Darstellung der Arbeitsgänge der Formgebung und Verdichtung an Steinformmaschinen bei der Herstellung von Betonpflastersteinen



**Figur 7 :**

Die zweite Stufe der Füllung, die Vorsatzbetonfüllung, beginnt. Der Vorsatzfüllwagen fährt über den Sekundärfüllraum im Formunterteil. Wieder werden mit der Bewegung des Füllwagens die Druckstücke des Formstempels gereinigt.

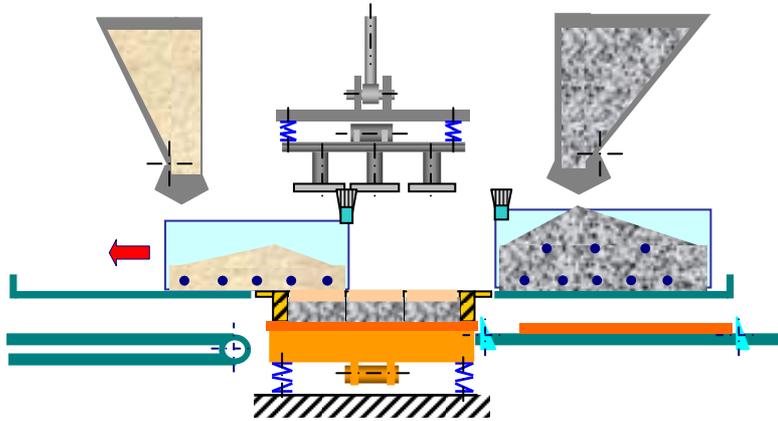


**Figur 8 :**

Der Vorsatzfüllwagen pendelt über dem Formunterteil und verteilt das Vorsatzbetongemenge. Zusätzlich kann durch den Schwingtisch über Fertigungsunterlage und Formunterteil Vibration in das einzufüllende bzw. bereits eingefüllte Betongemenge eingetragen werden, um die Fließfähigkeit zu erhöhen.

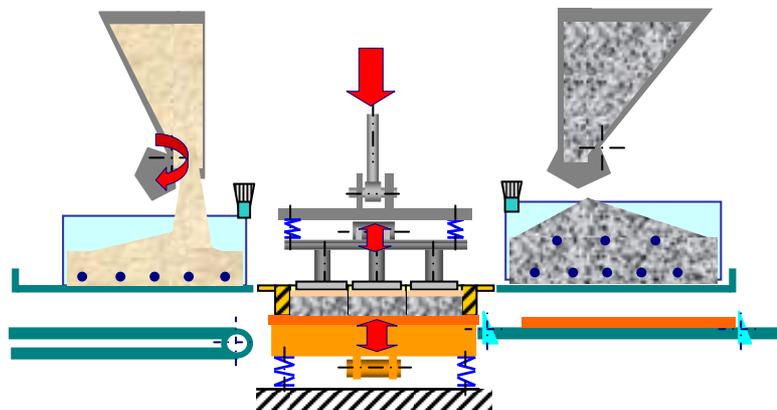
## Anlage 2.4:

### Schematische Darstellung der Arbeitsgänge der Formgebung und Verdichtung an Steinformmaschinen bei der Herstellung von Betonpflastersteinen



**Figur 9 :**

Der Vorsatzfüllwagen fährt zurück in seine Grundstellung unter das Vorsatzbetonfüllsilo. Damit ist die erste Phase des Formgebungs- und Verdichtungsprozesses, die Füllung der Form mit Betongemenge, beendet.

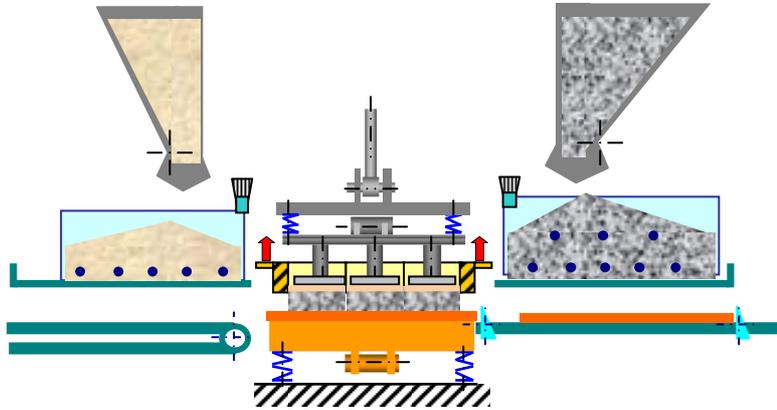


**Figur 10 :**

Die zweite Stufe der Verdichtung, die Hauptverdichtung, beginnt. Der Formstempel wird auf die Oberfläche des eingebrachten Vorsatzbetongemenges gepresst. Zusätzlich wird durch den Schwingtisch über Fertigungsunterlage und Formunterteil Vibration in den mit Betongemenge gefüllten Raum eingetragen. Im letzten Drittel der Hauptverdichtung wird der Druck auf die Steinoberfläche durch die Auflast nochmals hydraulisch erhöht. Parallel zu diesen Arbeitsgängen kann die Regelung des Füllstandes im Vorsatzfüllwagen erfolgen.

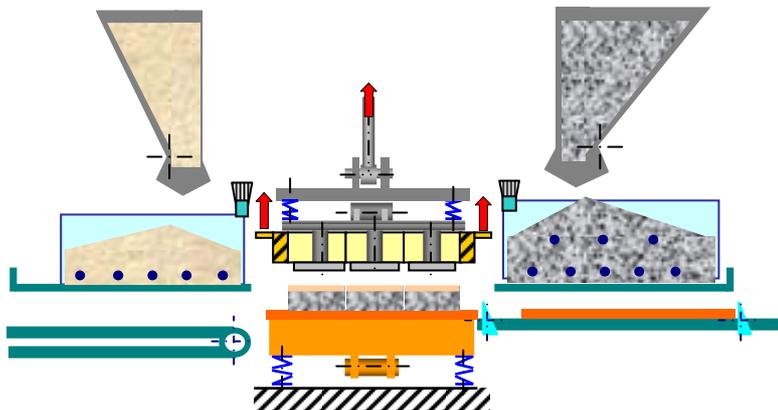
## Anlage 2.4:

### Schematische Darstellung der Arbeitsgänge der Formgebung und Verdichtung an Steinformmaschinen bei der Herstellung von Betonpflastersteinen



**Figur 11 :**

Nach dem Ende der Hauptverdichtung beginnt die *dritte Phase* der Formgebung und Verdichtung, die Entschalung. Die Auflast wird zunächst entlastet und anschließend in ihrer senkrechten Position drucklos über der Oberfläche der Frischbetonkörper fixiert. Danach wird die Form aufwärts gefahren.

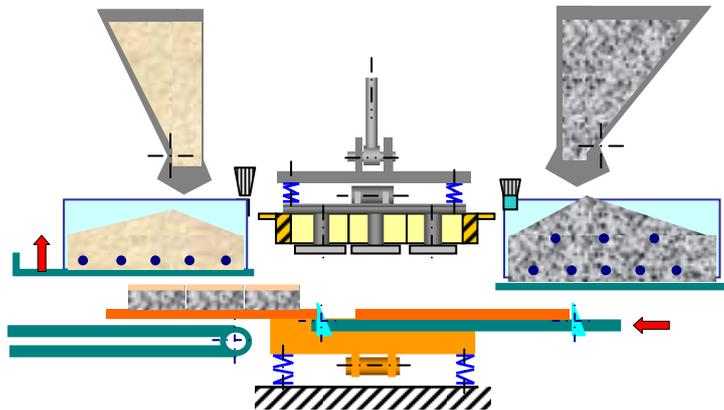


**Figur 12 :**

Hat die Form die Frischbetonkörper vollständig freigegeben, fahren Form und Auflast gemeinsam aufwärts. Die Fertigungseinheit steht nun frei auf dem Unterlagsbrett. Die dritte Phase der Formgebung und Verdichtung, die Entschalung, ist damit abgeschlossen.

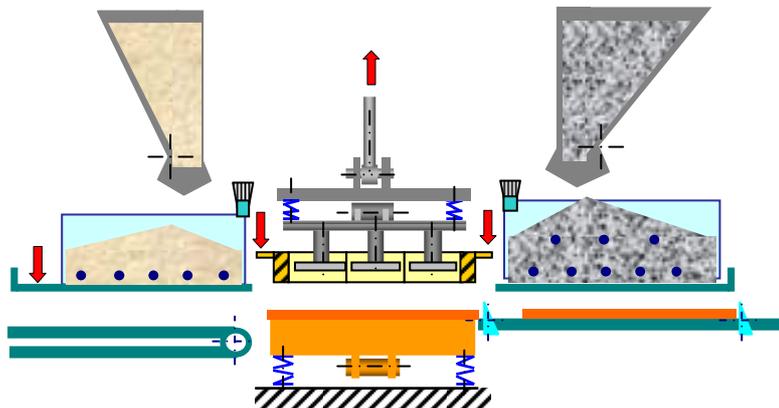
## Anlage 2.4:

### Schematische Darstellung der Arbeitsgänge der Formgebung und Verdichtung an Steinformmaschinen bei der Herstellung von Betonpflastersteinen



**Figur 13 :**

Der Ausstoß der Fertigungseinheit beginnt mit dem Anheben der Vorsatzfülleinrichtung. Anschließend schiebt der Brettvorschub die Fertigungseinheit auf eine Transporteinrichtung. Gleichzeitig bringt er das nächste Unterlagsbrett auf dem Schwingtisch in Position.

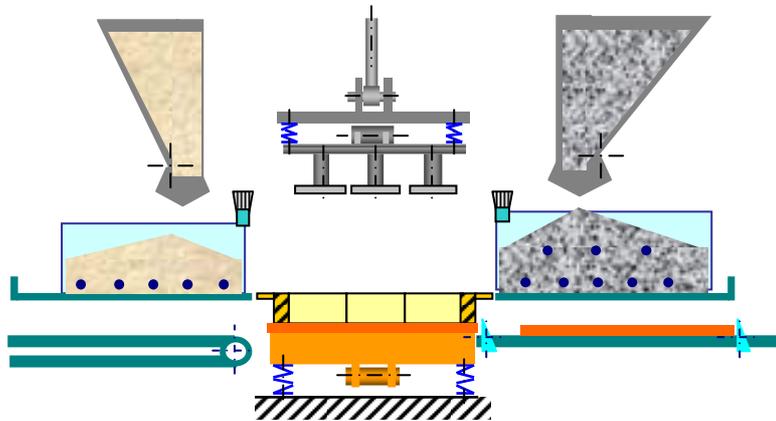


**Figur 14 :**

Hat die Fertigungseinheit die Steinformmaschine vollständig verlassen, werden Vorsatzfülleinrichtung und Form wieder abgesenkt bzw. verspannt. Gleichzeitig wird die Auflast in ihre Reinigungsposition angehoben.

## Anlage 2.4:

Schematische Darstellung der Arbeitsgänge der Formgebung und Verdichtung an Steinformmaschinen bei der Herstellung von Betonpflastersteinen



**Figur 15:**  
Alle Elemente haben wieder ihre Grundstellung eingenommen. Der nächste Fertigungszyklus kann beginnen.

# Anlage 3: Schemata der Messwertauswertung

Bestimmung und  
Eingabe der  
Probenmasse  $m_i$

Zyklus  
 $Z_1$

|    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
| 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
| 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |

Zyklus  
 $Z_2$

|    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|
| 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |
| 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |
| 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 |
| 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 |
| 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 |
| 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 |
| 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 |
| 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 |

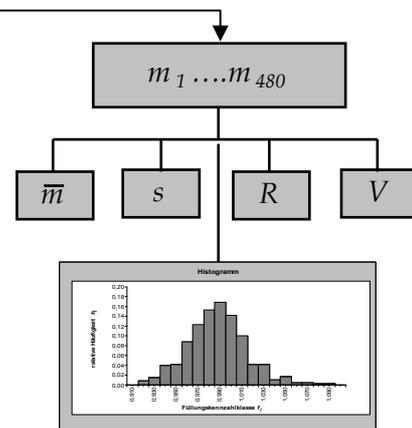
Zyklus  
 $Z_3$

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 97  | 98  | 99  | 100 | 101 | 102 |
| 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 |
| 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 |
| 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
| 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 |
| 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 |
| 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 |
| 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 |

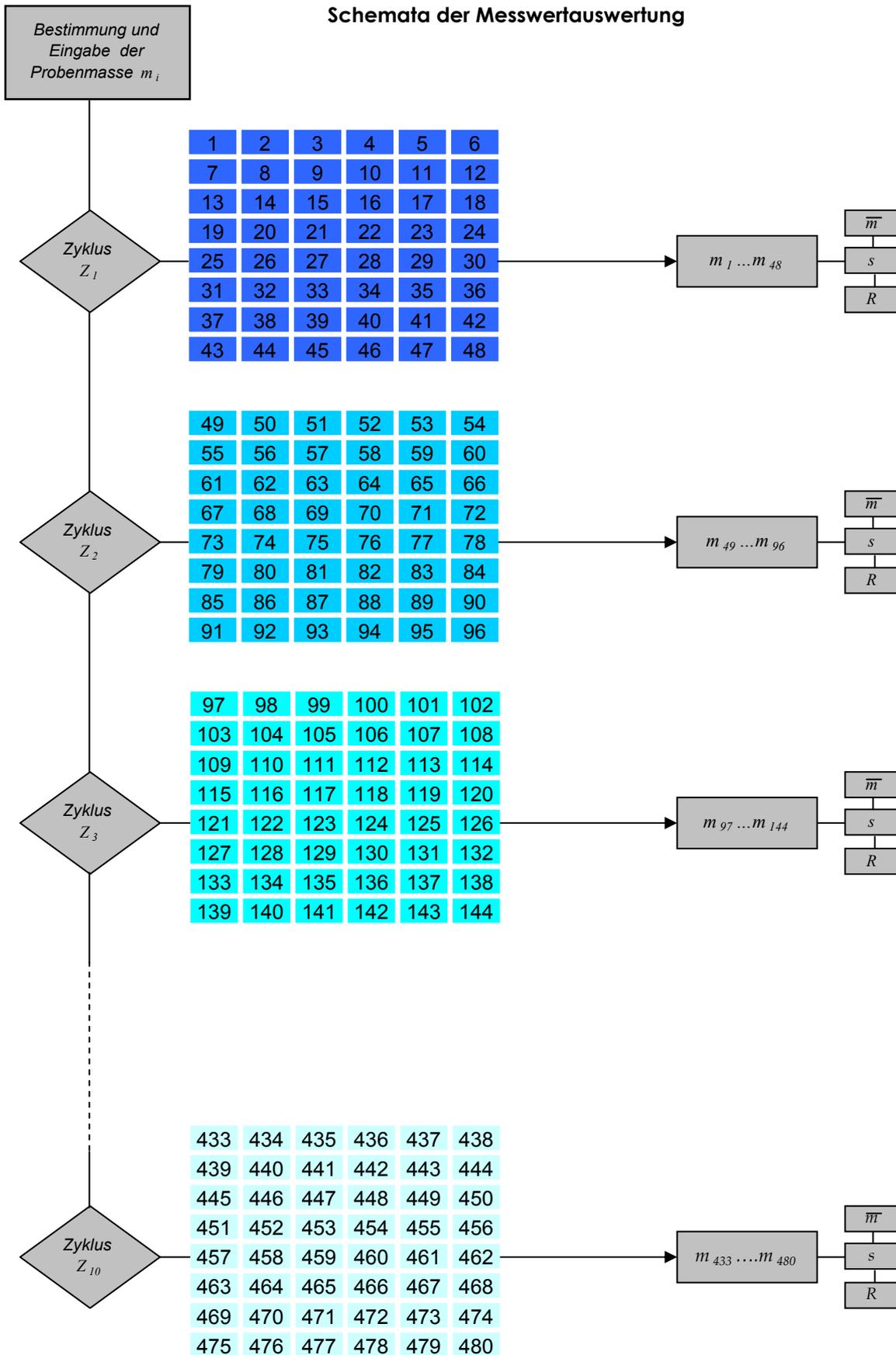
Zyklus  
 $Z_{10}$

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 433 | 434 | 435 | 436 | 437 | 438 |
| 439 | 440 | 441 | 442 | 443 | 444 |
| 445 | 446 | 447 | 448 | 449 | 450 |
| 451 | 452 | 453 | 454 | 455 | 456 |
| 457 | 458 | 459 | 460 | 461 | 462 |
| 463 | 464 | 465 | 466 | 467 | 468 |
| 469 | 470 | 471 | 472 | 473 | 474 |
| 475 | 476 | 477 | 478 | 479 | 480 |

*Übersicht der  
stichprobenbezogenen Auswertung  
Untersuchung der Verteilung aller Massen  
 $m_1 \dots m_{480}$  innerhalb einer Stichprobe*

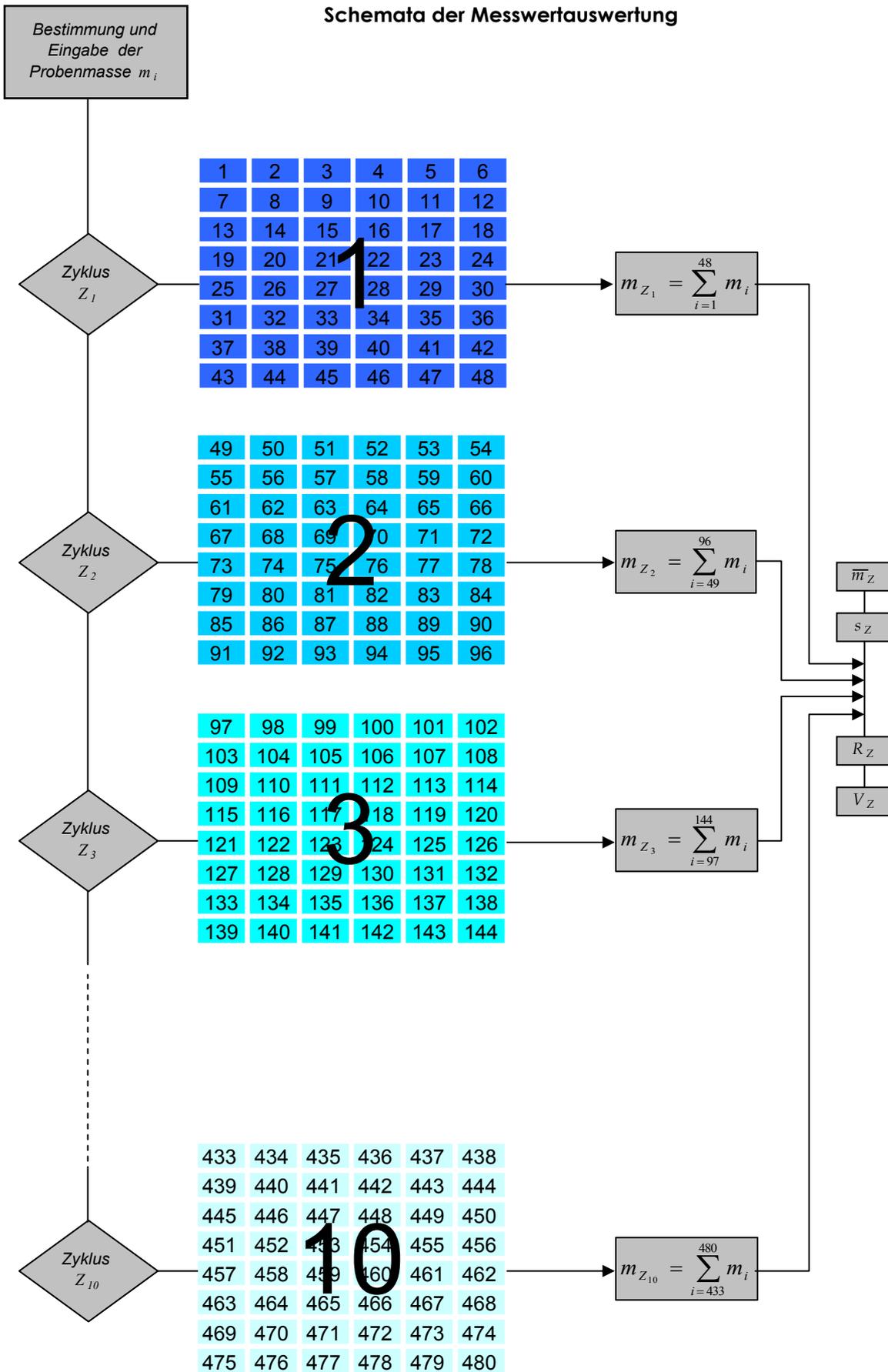


### Anlage 3: Schemata der Messwertauswertung



**Übersicht der zyklusbezogenen Auswertung**  
untersucht die Verteilung aller Massen  $m_1 \dots m_{48}$  innerhalb einer gefertigten Einheit

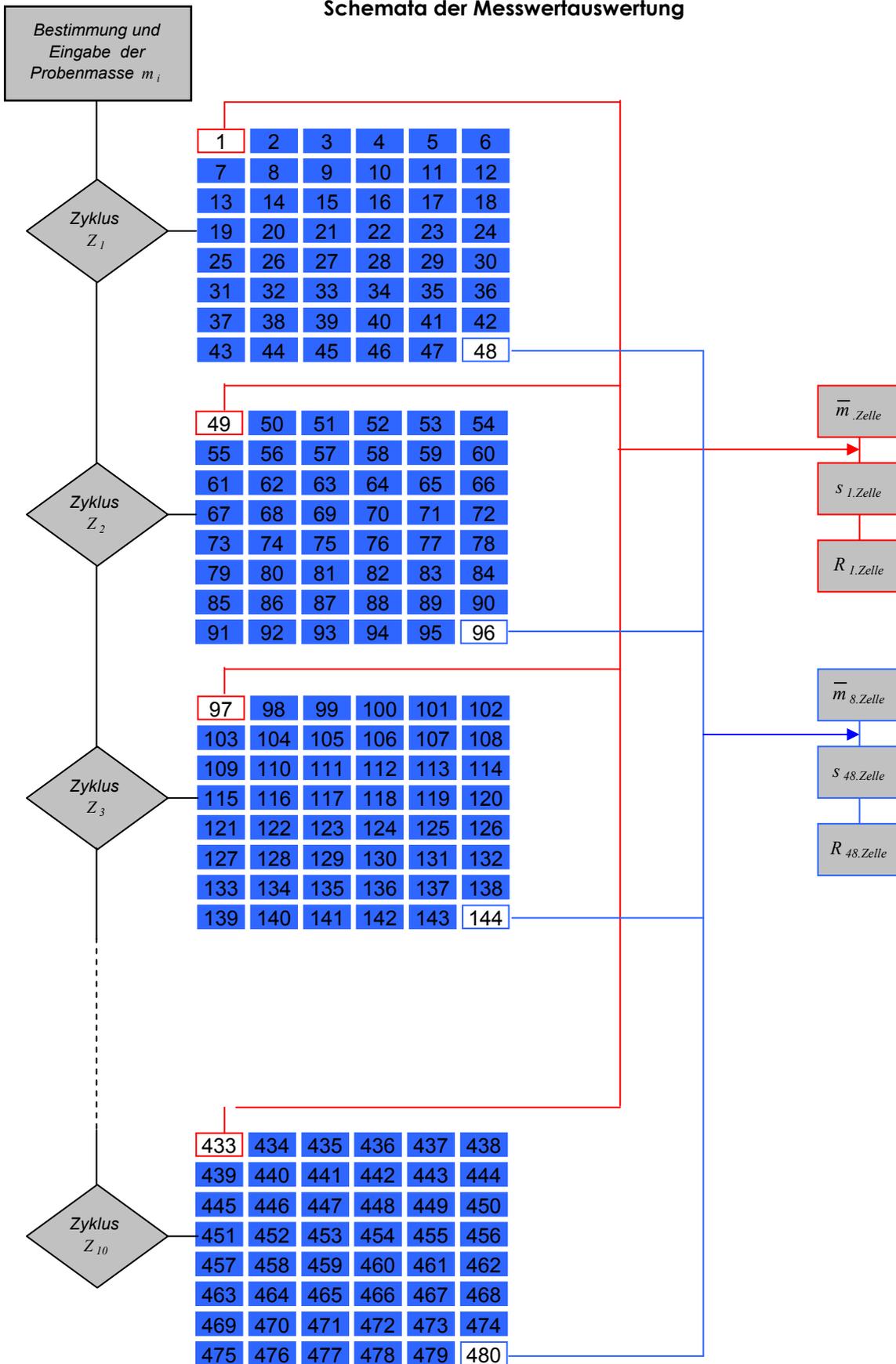
### Anlage 3: Schemata der Messwertauswertung



#### Übersicht der zyklusbezogenen Auswertung

Untersuchung der Verteilung aller Zyklusmassen  $m_{Z_1} \dots m_{Z_{10}}$  innerhalb einer Stichprobe

### Anlage 3: Schemata der Messwertauswertung



#### Übersicht der zellenbezogenen Auswertung

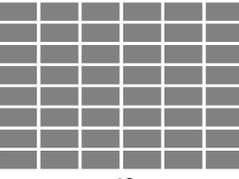
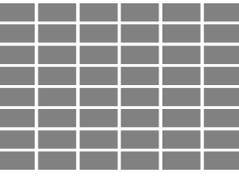
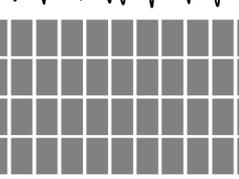
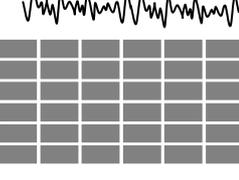
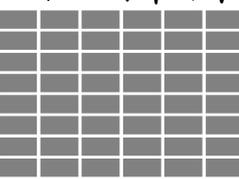
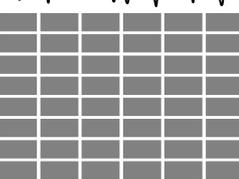
Untersuchung der Verteilung aller 10 Probenmassen einer Stichprobe aus der gleichen Zelle der Form von Zelle 1 bis Zelle 48  $m_{Z_1} \dots m_{Z_{10}}$  innerhalb einer Stichprobe

**Anlage 3:**  
**Schemata der Messwertauswertung**

**Anlage 3:**  
**Schemata der Messwertauswertung**

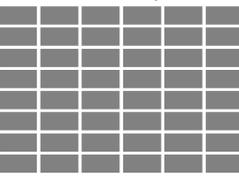
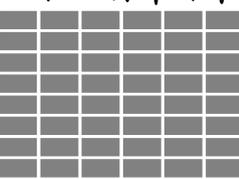
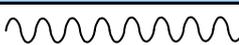
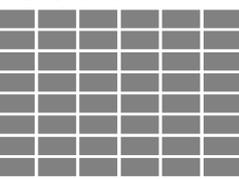
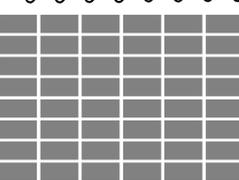
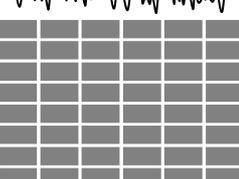
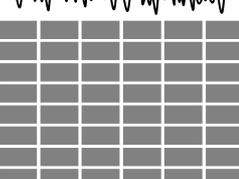
## Anlage 4.1:

### Ergebnisse aller Steinformmaschinen stichprobenbezogen in Übersicht

| Steinformmaschine | empirische Kennwerte      | Füllstufe 1 | Füllstufen 1+2 | Füllstufe 2 | Art der Vibration / Proben je Zyklus $n_z$                                            |
|-------------------|---------------------------|-------------|----------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| SFM 1             | Datensätze                | 1K          | 1K+V           | 1V          | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $f_{\bar{}}$   | 0,957       | 0,998          | 1,367       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,959       | 0,999          | 1,348       |    |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,004       | 1,040          | 1,952       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,878       | 0,949          | 0,885       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,021       | 0,015          | 0,180       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,126       | 0,091          | 1,067       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,022       | 0,015          | 0,132       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 2             | Datensätze                | 2K          | 2K+V           | 2V          | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $f_{\bar{}}$   | 0,931       | 0,962          | 1,240       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,933       | 0,961          | 1,208       |    |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,987       | 0,994          | 1,952       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,837       | 0,935          | 0,888       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,026       | 0,010          | 0,201       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,150       | 0,059          | 1,064       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,028       | 0,010          | 0,162       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 3             | Datensätze                | 3K          | 3K+V           | 3V          | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $f_{\bar{}}$   | 0,915       | 0,976          | 1,400       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,922       | 0,976          | 1,370       |   |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,978       | 1,025          | 2,004       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,833       | 0,939          | 0,954       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,031       | 0,015          | 0,190       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,145       | 0,086          | 1,050       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,034       | 0,015          | 0,136       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 44          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 4             | Datensätze                | 4K          | 4K+V           | 4V          | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $f_{\bar{}}$   | 0,963       | 0,986          | 1,197       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,964       | 0,986          | 1,183       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,998       | 1,052          | 2,037       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,912       | 0,911          | 0,323       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,015       | 0,020          | 0,253       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,086       | 0,141          | 1,714       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,016       | 0,020          | 0,211       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 36          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 5             | Datensätze                | 5K          | 5K             | 5V          | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $f_{\bar{}}$   | 1,059       | 0,974          | 0,209       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 1,062       | 0,974          | 0,186       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,102       | 1,011          | 0,757       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 1,005       | 0,931          | 0,114       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,019       | 0,014          | 0,157       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,097       | 0,080          | 0,643       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,018       | 0,014          | 0,751       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 6             | Datensätze                | 6K          | 6K+V           | 6V          | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $f_{\bar{}}$   | 0,982       | 0,99           | 1,057       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,982       | 0,988          | 1,065       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,082       | 1,046          | 1,468       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,917       | 0,968          | 0,200       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,027       | 0,017          | 0,192       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,165       | 0,078          | 1,268       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,027       | 0,017          | 0,182       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |

## Anlage 4.1:

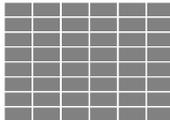
### Ergebnisse aller Steinformmaschinen stichprobenbezogen in Übersicht

| Steinformmaschine | empirische Kennwerte      | Füllstufe 1 | Füllstufen 1+2 | Füllstufe 2 | Art der Vibration / Proben je Zyklus $n_z$                                            |
|-------------------|---------------------------|-------------|----------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| SFM 7             | Datensätze                | 7K          | 7K+V           | 7V          | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $f^-$          | 0,883       | 0,979          | 1,843       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,885       | 0,980          | 1,834       |    |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,931       | 1,029          | 2,380       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,837       | 0,930          | 1,214       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,015       | 0,017          | 0,223       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,094       | 0,099          | 1,166       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,017       | 0,017          | 0,121       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 8             | Datensätze                | 8K          | 8K+V           | 8V          | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $f^-$          | 0,961       | 0,978          | 1,125       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,966       | 0,982          | 1,131       |    |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,999       | 1,027          | 1,739       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,890       | 0,933          | 0,494       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,020       | 0,016          | 0,167       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,109       | 0,094          | 1,245       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,021       | 0,016          | 0,148       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 9             | Datensätze                | 9K          | 9K+V           | 9V          | Harmonische Vibration                                                                 |
|                   | Mittelwert $f^-$          | 1,001       | 1,060          | 1,589       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 1,004       | 1,053          | 1,587       |   |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,044       | 1,085          | 2,041       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,939       | 1,030          | 1,180       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,021       | 0,011          | 0,167       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,105       | 0,055          | 0,861       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,021       | 0,010          | 0,105       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 9.1           | Datensätze                | 9.1K        | 9.1K+V         | 9.1V        | Harmonische Vibration                                                                 |
|                   | Mittelwert $f^-$          | 1,015       | 1,064          | 1,507       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 1,017       | 1,065          | 1,506       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,045       | 1,085          | 1,821       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,983       | 1,043          | 1,177       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,012       | 0,010          | 0,130       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,062       | 0,042          | 0,644       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,012       | 0,009          | 0,086       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 10            | Datensätze                | 10K         | 10K+V          | 10V         | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $f^-$          | 0,987       | 0,971          | 2,251       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,983       | 0,970          | 1,735       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,035       | 1,004          | 2,251       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,932       | 0,938          | 1,149       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,017       | 0,013          | 0,189       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,103       | 0,066          | 1,102       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,017       | 0,013          | 0,084       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 11            | Datensätze                | 11K         | 11K+V          | 11V         | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $f^-$          | 0,984       | 0,956          | 0,705       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,987       | 0,957          | 0,699       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,028       | 0,990          | 1,269       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,934       | 0,914          | 0,225       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,018       | 0,013          | 0,151       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,094       | 0,076          | 1,044       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,018       | 0,014          | 0,214       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |

## Anlage 4.1: Ergebnisse aller Steinformmaschinen stichprobenbezogen in Übersicht

| Zusammenfassung der Datensätze aller Steinformmaschinen " Σ11 " |                           |           |                  |           |  |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|------------------|-----------|--|
| <b>Mittelwerte über alle Steinformmaschinen</b>                 | <b>Datensätze</b>         | $\bar{K}$ | $\overline{K+V}$ | $\bar{V}$ |  |
|                                                                 | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,970     | 0,991            | 1,291     |  |
|                                                                 | Median $f_{0,5}$          | 0,972     | 0,991            | 1,238     |  |
|                                                                 | Maximum $f_{max}$         | 1,019     | 1,032            | 1,806     |  |
|                                                                 | Minimum $f_{min}$         | 0,908     | 0,952            | 0,734     |  |
|                                                                 | Standardabweichung $s$    | 0,020     | 0,014            | 0,183     |  |
|                                                                 | Spannweite $R$            | 0,111     | 0,081            | 1,072     |  |
|                                                                 | Variationskoeffizient $V$ | 0,021     | 0,014            | 0,194     |  |
| <b>Maxima über alle Steinformmaschinen</b>                      | <b>Datensätze</b>         | $K_{max}$ | $K+V_{max}$      | $V_{max}$ |  |
|                                                                 | Mittelwert $\bar{f}$      | 1,059     | 1,064            | 2,251     |  |
|                                                                 | Median $f_{0,5}$          | 1,062     | 1,065            | 1,834     |  |
|                                                                 | Maximum $f_{max}$         | 1,102     | 1,085            | 2,380     |  |
|                                                                 | Minimum $f_{min}$         | 1,005     | 1,043            | 1,952     |  |
|                                                                 | Standardabweichung $s$    | 0,031     | 0,020            | 0,253     |  |
|                                                                 | Spannweite $R$            | 0,165     | 0,141            | 1,714     |  |
|                                                                 | Variationskoeffizient $V$ | 0,034     | 0,020            | 0,751     |  |
| <b>Minima über alle Steinformmaschinen</b>                      | <b>Datensätze</b>         | $K_{min}$ | $K+V_{min}$      | $V_{min}$ |  |
|                                                                 | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,883     | 0,956            | 0,209     |  |
|                                                                 | Median $f_{0,5}$          | 0,885     | 0,957            | 0,186     |  |
|                                                                 | Maximum $f_{max}$         | 0,931     | 0,990            | 0,757     |  |
|                                                                 | Minimum $f_{min}$         | 0,833     | 0,911            | 0,114     |  |
|                                                                 | Standardabweichung $s$    | 0,012     | 0,010            | 0,130     |  |
|                                                                 | Spannweite $R$            | 0,062     | 0,042            | 0,643     |  |
|                                                                 | Variationskoeffizient $V$ | 0,012     | 0,009            | 0,084     |  |

Die rot angelegten Zellen markieren die ungünstigsten Werte.  
 Die grün angelegten Zellen markieren die günstigsten Werte.

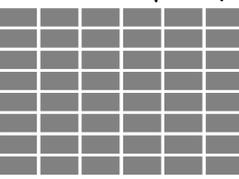
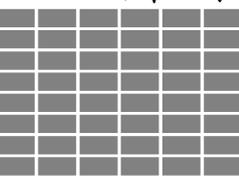
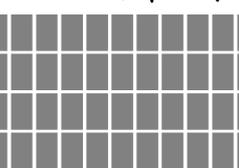
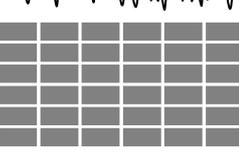
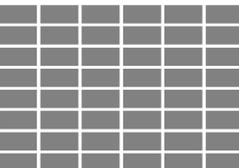
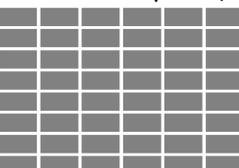
 Anzahl und Anordnung der Proben je Zyklus

 Schockvibration

 Harmonische Vibration

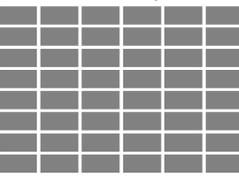
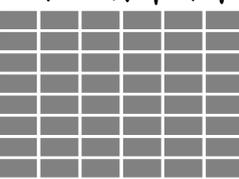
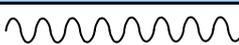
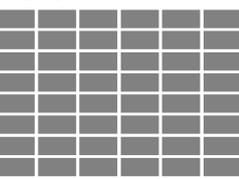
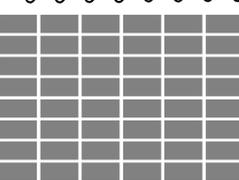
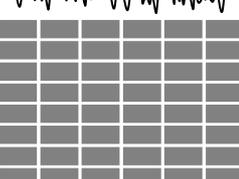
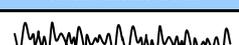
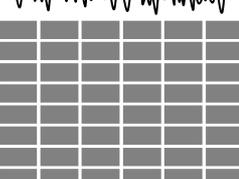
## Anlage 4.2:

### Ergebnisse aller Steinformmaschinen zyklusbezogen in Übersicht

| Steinformmaschine | empirische Kennwerte      | Füllstufe 1 | Füllstufen 1+2 | Füllstufe 2 | Art der Vibration / Proben je Zyklus $n_z$                                            |
|-------------------|---------------------------|-------------|----------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| SFM 1             | Datensätze                | <b>1K</b>   | <b>1K+V</b>    | <b>1V</b>   | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,957       | 0,998          | 1,373       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,959       | 0,999          | 1,373       |    |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,974       | 1,003          | 1,481       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,944       | 0,993          | 1,189       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,009       | 0,004          | 0,085       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,030       | 0,010          | 0,292       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,009       | 0,004          | 0,062       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
| SFM 2             | Datensätze                | <b>2K</b>   | <b>2K+V</b>    | <b>2V</b>   | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,931       | 0,962          | 1,238       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,928       | 0,962          | 1,266       |    |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,954       | 0,967          | 1,300       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,923       | 0,960          | 1,030       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,009       | 0,002          | 0,083       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,031       | 0,007          | 0,270       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,010       | 0,002          | 0,067       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
| SFM 3             | Datensätze                | <b>3K</b>   | <b>3K+V</b>    | <b>3V</b>   | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,801       | 0,976          | 1,402       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,800       | 0,975          | 1,413       |   |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,820       | 0,986          | 1,559       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,791       | 0,965          | 1,245       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,009       | 0,006          | 0,095       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,029       | 0,021          | 0,314       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,011       | 0,006          | 0,068       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 44          |                                                                                       |
| SFM 4             | Datensätze                | <b>4K</b>   | <b>4K+V</b>    | <b>4V</b>   | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,963       | 0,986          | 0,899       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,966       | 0,987          | 0,890       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,968       | 0,995          | 1,024       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,949       | 0,977          | 0,801       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,060       | 0,017          | 0,065       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,019       | 0,018          | 0,223       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,062       | 0,017          | 0,072       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 36          |                                                                                       |
| SFM 5             | Datensätze                | <b>5K</b>   | <b>5K</b>      | <b>5V</b>   | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 1,059       | 0,974          | 0,232       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 1,059       | 0,971          | 0,214       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,074       | 0,993          | 0,503       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 1,029       | 0,963          | 0,096       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,014       | 0,009          | 0,114       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,045       | 0,030          | 0,407       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,013       | 0,009          | 0,491       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
| SFM 6             | Datensätze                | <b>6K</b>   | <b>6K+V</b>    | <b>6V</b>   | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,982       | 0,990          | 1,247       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,981       | 0,989          | 1,259       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,002       | 0,997          | 1,385       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,969       | 0,983          | 1,078       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,010       | 0,004          | 0,100       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,033       | 0,014          | 0,307       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,010       | 0,004          | 0,080       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |

## Anlage 4.2:

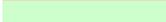
### Ergebnisse aller Steinformmaschinen zyklusbezogen in Übersicht

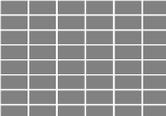
| Steinformmaschine | empirische Kennwerte      | Füllstufe 1 | Füllstufen 1+2 | Füllstufe 2 | Art der Vibration / Proben je Zyklus $n_z$                                            |
|-------------------|---------------------------|-------------|----------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| SFM 7             | Datensätze                | 7K          | 7K+V           | 7V          | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,883       | 0,979          | 1,842       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,883       | 0,981          | 1,861       |    |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,889       | 1,001          | 2,063       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,879       | 0,960          | 1,667       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,003       | 0,013          | 0,130       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,010       | 0,041          | 0,396       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,003       | 0,013          | 0,071       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 8             | Datensätze                | 8K          | 8K+V           | 8V          | Schockvibration                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,962       | 0,978          | 1,126       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,960       | 0,979          | 1,124       |    |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,969       | 0,982          | 1,205       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,956       | 0,973          | 1,050       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,005       | 0,003          | 0,056       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,013       | 0,009          | 0,155       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,005       | 0,003          | 0,050       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 9             | Datensätze                | 9K          | 9K+V           | 9V          | Harmonische Vibration                                                                 |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 1,001       | 1,060          | 1,589       |    |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 1,004       | 1,060          | 1,571       |   |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,017       | 1,065          | 1,751       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,981       | 1,055          | 1,485       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,014       | 0,004          | 0,059       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,036       | 0,010          | 0,266       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,014       | 0,004          | 0,037       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 9.1           | Datensätze                | 9.1K        | 9.1K+V         | 9.1V        | Harmonische Vibration                                                                 |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 1,015       | 1,064          | 1,507       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 1,014       | 1,065          | 1,512       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,017       | 1,065          | 1,527       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 1,013       | 1,062          | 1,486       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,001       | 0,001          | 0,014       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,004       | 0,003          | 0,041       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,001       | 0,001          | 0,009       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 10            | Datensätze                | 10K         | 10K+V          | 10V         | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 1,043       | 0,971          | 1,742       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 1,043       | 0,971          | 1,760       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 1,053       | 0,978          | 1,952       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 1,030       | 0,967          | 1,577       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,008       | 0,003          | 0,123       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,023       | 0,011          | 0,375       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,008       | 0,003          | 0,071       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |
| SFM 11            | Datensätze                | 11K         | 11K+V          | 11V         | Schockvibration                                                                       |
|                   | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,984       | 0,956          | 0,705       |  |
|                   | Median $f_{0,5}$          | 0,985       | 0,955          | 0,704       |  |
|                   | Maximum $f_{max}$         | 0,990       | 0,964          | 0,757       |                                                                                       |
|                   | Minimum $f_{min}$         | 0,976       | 0,956          | 0,645       |                                                                                       |
|                   | Standardabweichung $s$    | 0,005       | 0,007          | 0,038       |                                                                                       |
|                   | Spannweite $R$            | 0,014       | 0,008          | 0,112       |                                                                                       |
|                   | Variationskoeffizient $V$ | 0,005       | 0,007          | 0,054       |                                                                                       |
|                   |                           |             |                | 48          |                                                                                       |
|                   |                           |             |                |             |                                                                                       |

## Anlage 4.2:

### Ergebnisse aller Steinformmaschinen zyklenbezogen in Übersicht

| Zusammenfassung der Datensätze aller Steinformmaschinen " Σ11 " |                           |           |                  |           |  |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|------------------|-----------|--|
| <b>Mittelwerte über alle Steinformmaschinen</b>                 | <b>Datensätze</b>         | $\bar{K}$ | $\overline{K+V}$ | $\bar{V}$ |  |
|                                                                 | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,965     | 0,991            | 1,242     |  |
|                                                                 | Median $f_{0,5}$          | 0,965     | 0,991            | 1,246     |  |
|                                                                 | Maximum $f_{max}$         | 0,977     | 1,000            | 1,376     |  |
|                                                                 | Minimum $f_{min}$         | 0,953     | 0,985            | 1,112     |  |
|                                                                 | Standardabweichung $s$    | 0,012     | 0,006            | 0,080     |  |
|                                                                 | Spannweite $R$            | 0,024     | 0,015            | 0,263     |  |
|                                                                 | Variationskoeffizient $V$ | 0,013     | 0,006            | 0,094     |  |
| <b>Maxima über alle Steinformmaschinen</b>                      | <b>Datensätze</b>         | $K_{max}$ | $K+V_{max}$      | $V_{max}$ |  |
|                                                                 | Mittelwert $\bar{f}$      | 1,059     | 1,064            | 1,842     |  |
|                                                                 | Median $f_{0,5}$          | 1,059     | 1,065            | 1,861     |  |
|                                                                 | Maximum $f_{max}$         | 1,074     | 1,065            | 2,063     |  |
|                                                                 | Minimum $f_{min}$         | 1,030     | 1,062            | 1,667     |  |
|                                                                 | Standardabweichung $s$    | 0,060     | 0,017            | 0,130     |  |
|                                                                 | Spannweite $R$            | 0,045     | 0,041            | 0,407     |  |
|                                                                 | Variationskoeffizient $V$ | 0,062     | 0,017            | 0,491     |  |
| <b>Minima über alle Steinformmaschinen</b>                      | <b>Datensätze</b>         | $K_{min}$ | $K+V_{min}$      | $V_{min}$ |  |
|                                                                 | Mittelwert $\bar{f}$      | 0,801     | 0,956            | 0,232     |  |
|                                                                 | Median $f_{0,5}$          | 0,800     | 0,955            | 0,214     |  |
|                                                                 | Maximum $f_{max}$         | 0,820     | 0,964            | 0,503     |  |
|                                                                 | Minimum $f_{min}$         | 0,791     | 0,956            | 0,096     |  |
|                                                                 | Standardabweichung $s$    | 0,001     | 0,001            | 0,014     |  |
|                                                                 | Spannweite $R$            | 0,004     | 0,003            | 0,041     |  |
|                                                                 | Variationskoeffizient $V$ | 0,001     | 0,001            | 0,009     |  |

 Die rot angelegten Zellen markieren die ungünstigsten Werte.  
 Die grün angelegten Zellen markieren die günstigsten Werte.

 Anzahl und Anordnung der Proben je Zyklus

 Schockvibration

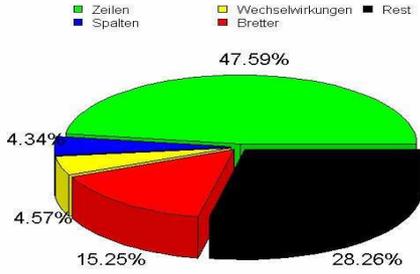
 Harmonische Vibration

# Anlage 5: Übersicht der Ergebnisse der Streuungszerlegung

*Im Ergebnis der 1. Füllstufe  
(Kernfüllung)*

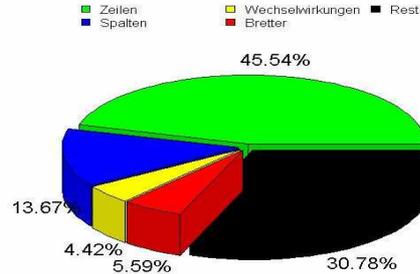
*Im Ergebnis beider Füllstufen  
(Kern- und Vorsatzfüllung)*

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



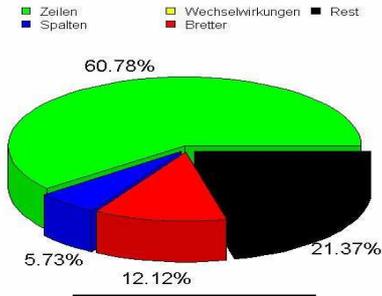
Stichprobe K1

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



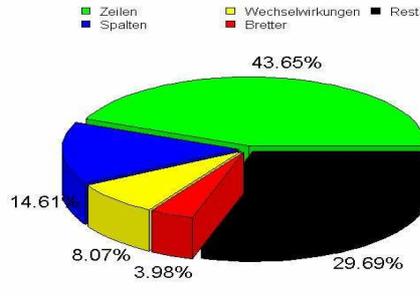
Stichprobe K+V1

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



Stichprobe K2

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



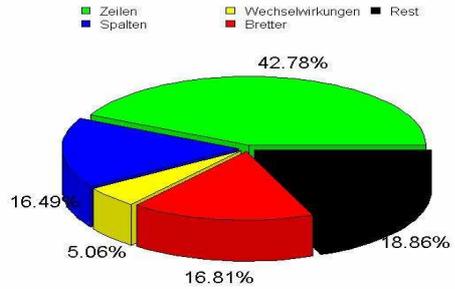
Stichprobe K+V2

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



Stichprobe K3

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



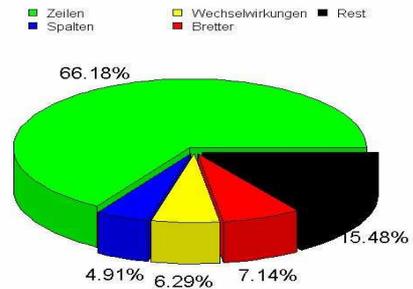
Stichprobe K+V3

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



Stichprobe K4

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



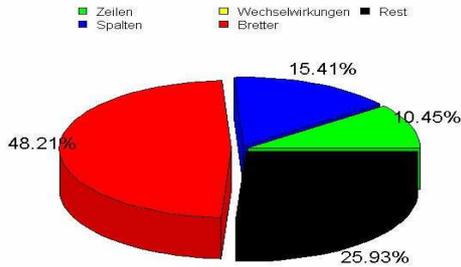
Stichprobe K+V4

# Anlage 5: Übersicht der Ergebnisse der Streuungszerlegung

Im Ergebnis der 1. Füllstufe  
(Kernfüllung)

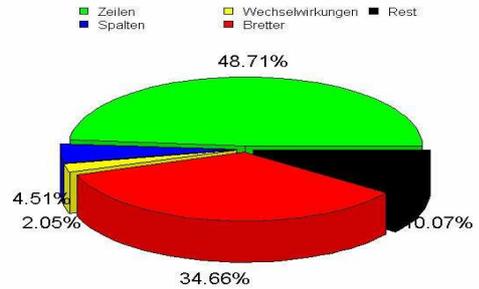
Im Ergebnis beider Füllstufen  
(Kern- und Vorsatzfüllung)

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



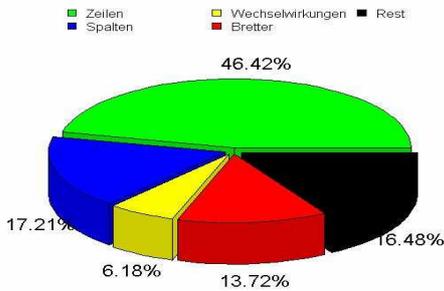
Stichprobe K5

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



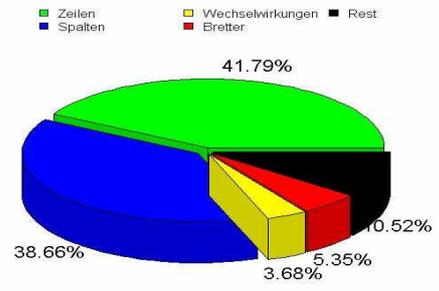
Stichprobe K+V5

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



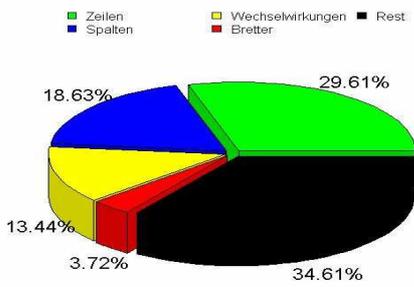
Stichprobe K6

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



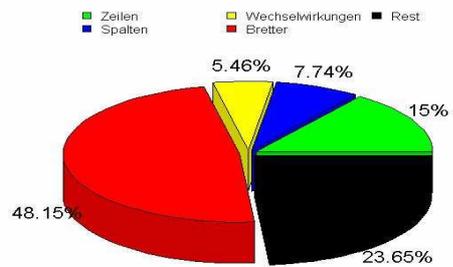
Stichprobe K+V6

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



Stichprobe K7

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



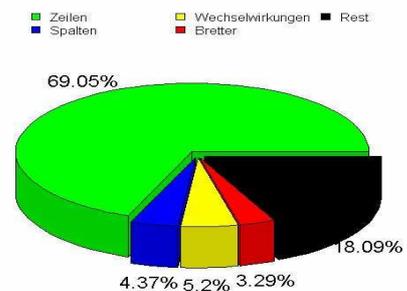
Stichprobe K+V7

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



Stichprobe K8

**Streuungszerlegung nach Variationsursache**



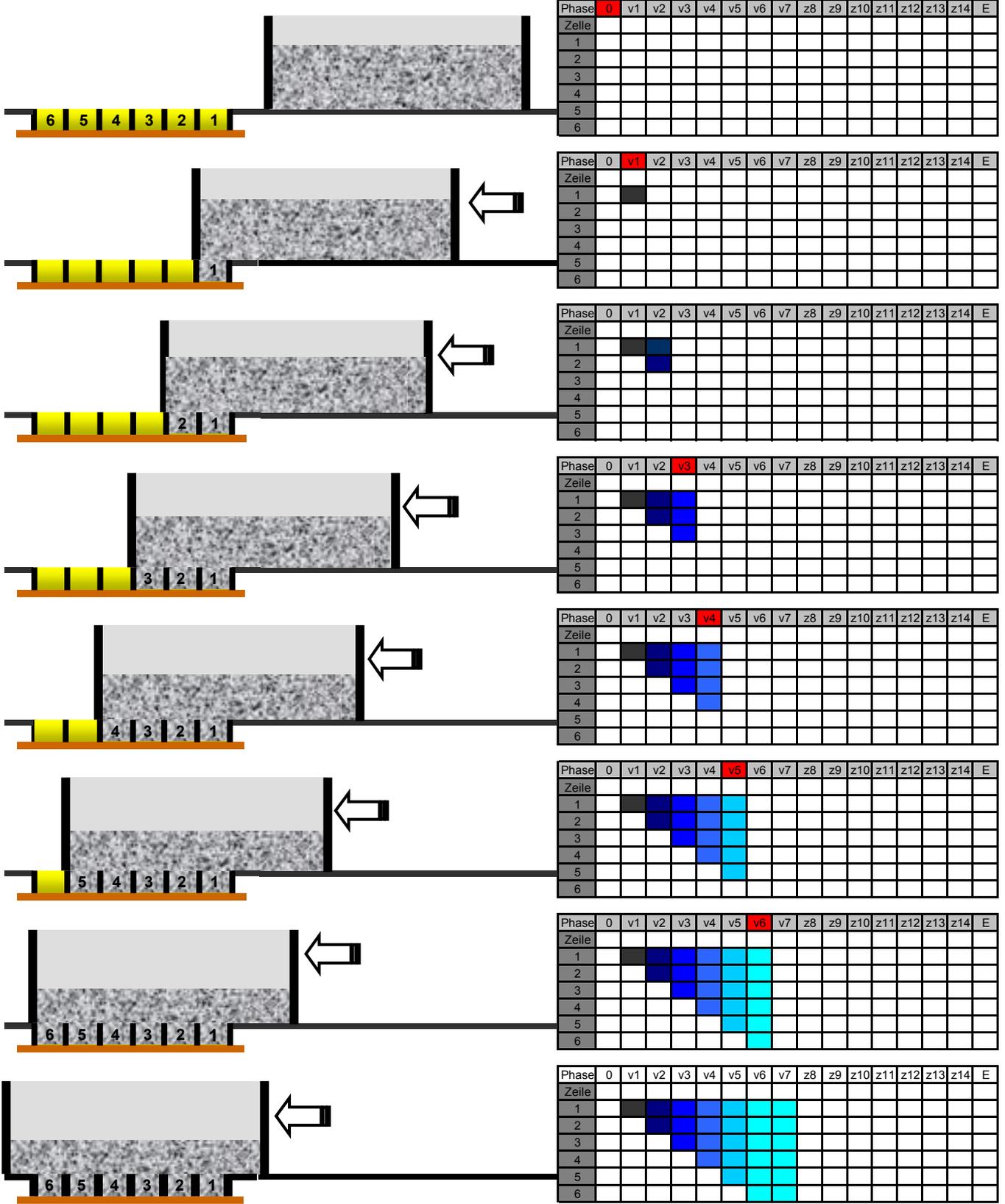
Stichprobe K+V8

# Anlage 6:

## Zellendruckschema in Abhängigkeit von der geradlinigen Bewegung des Füllwagens

Positionen des Füllkastens

Zellendruckmatrizen



Modellprämissen:

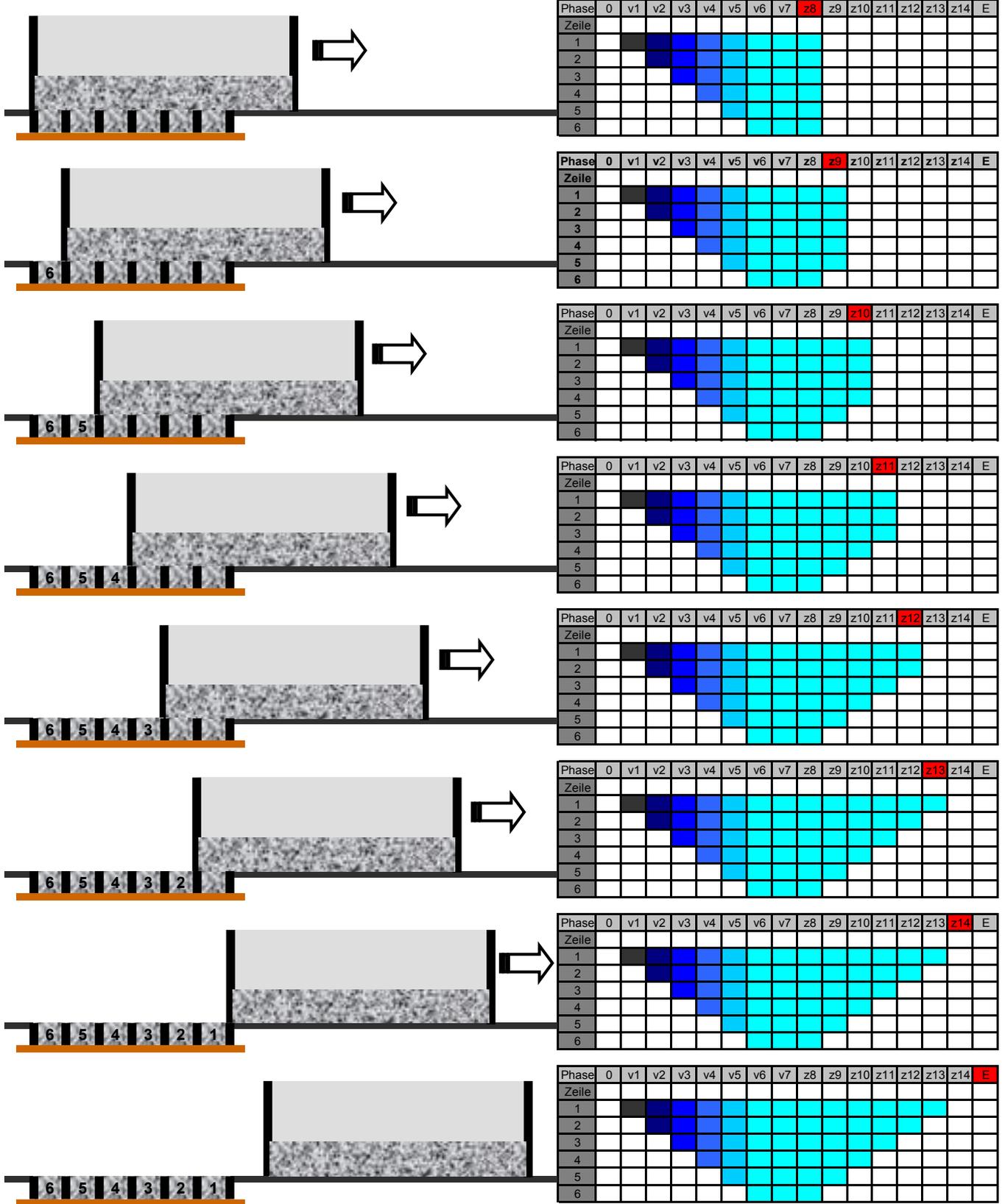
- Die Füllflächenkennzahl  $A_{TR} / A_{FR}$  beträgt näherungsweise 1.
- Das Gemenge verhält sich wie eine ruhende Newtonsche Flüssigkeit.

# Anlage 6:

## Zellendruckschema in Abhängigkeit von der geradlinigen Bewegung des Füllwagens

Positionen des Füllkastens

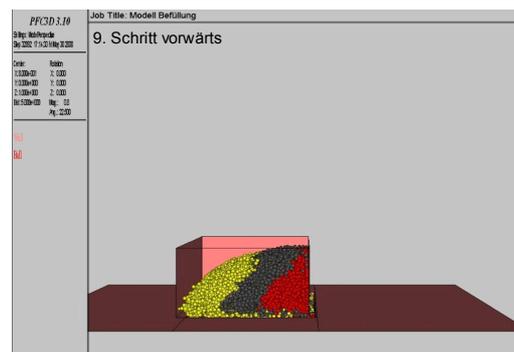
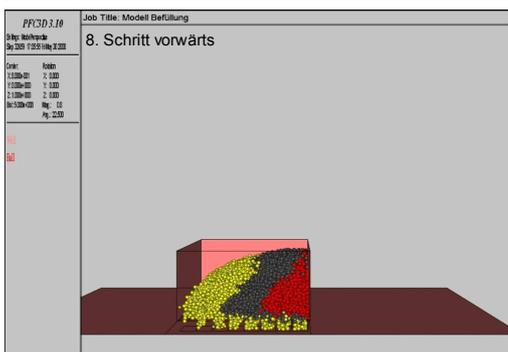
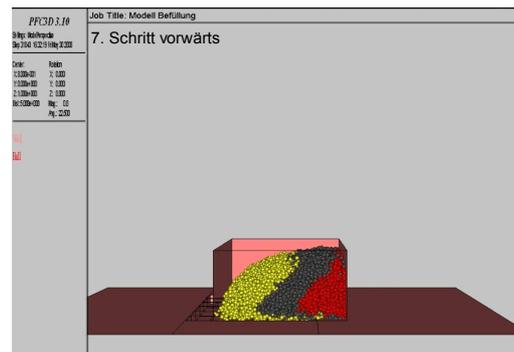
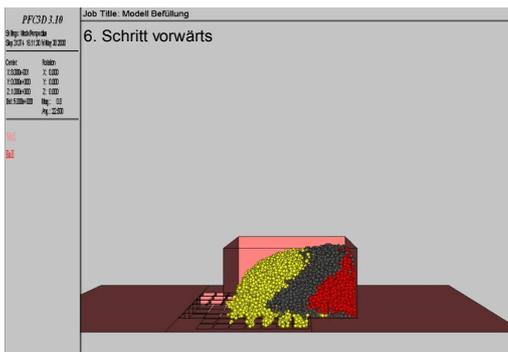
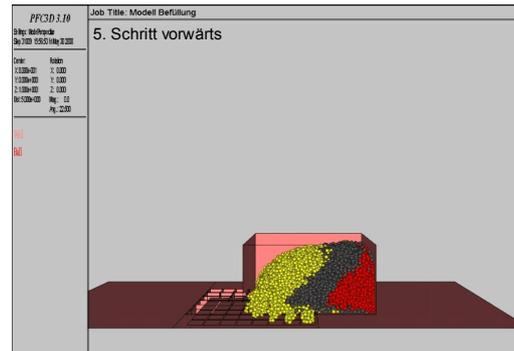
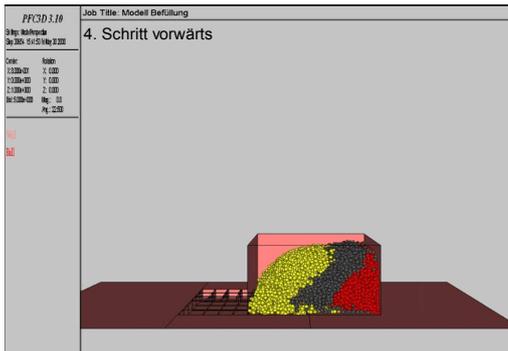
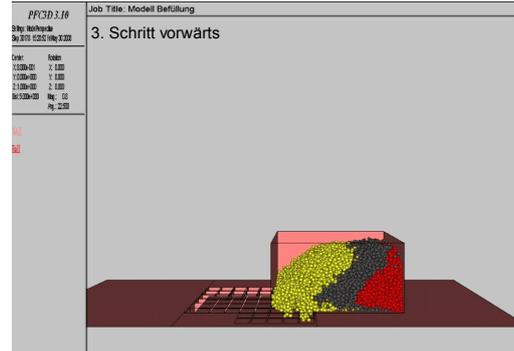
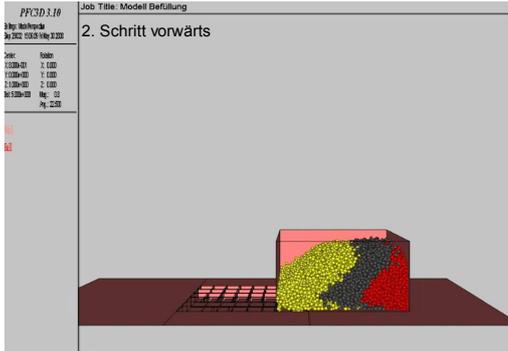
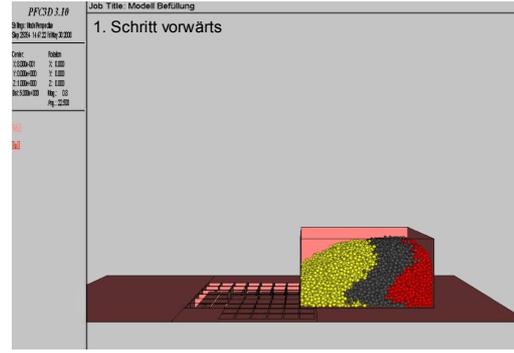
Zellendruckmatrizen



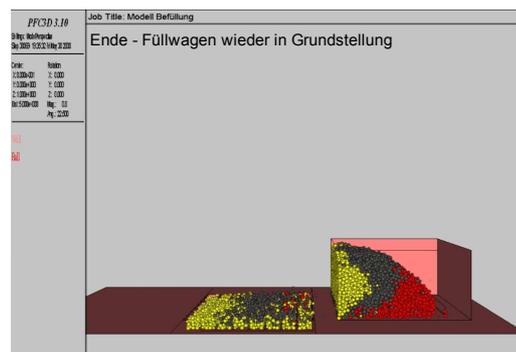
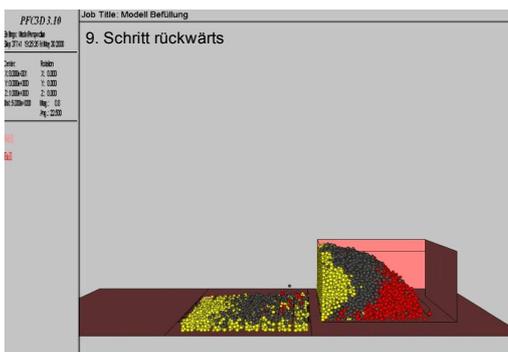
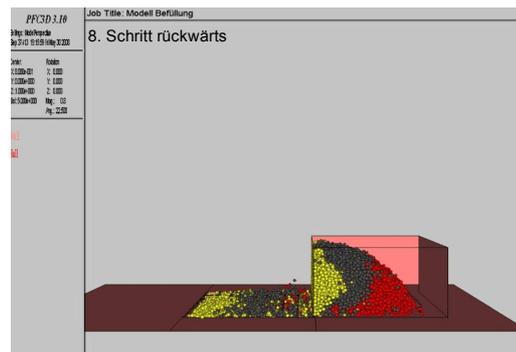
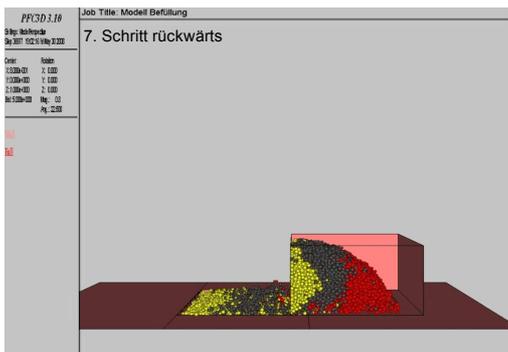
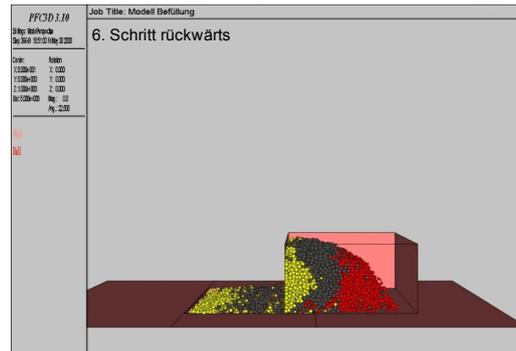
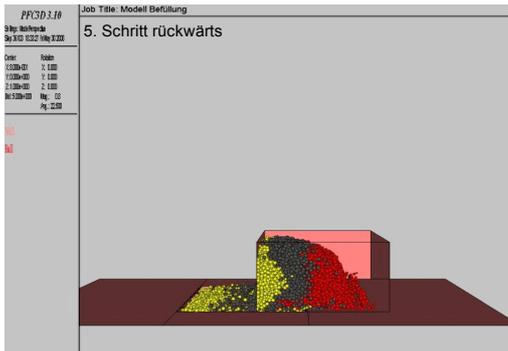
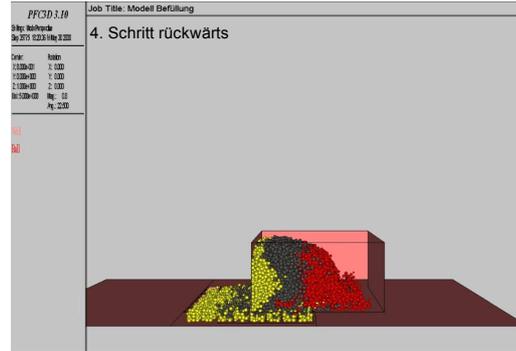
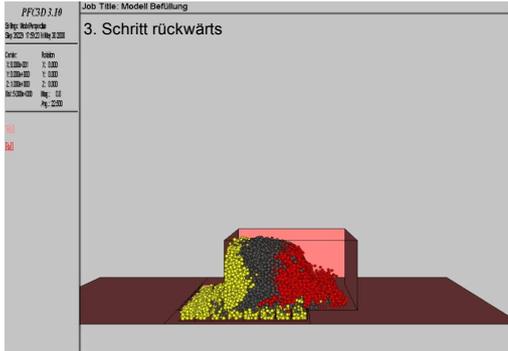
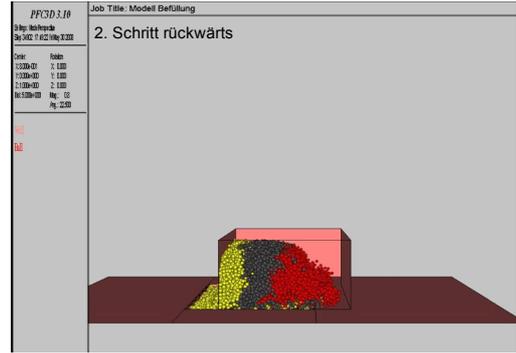
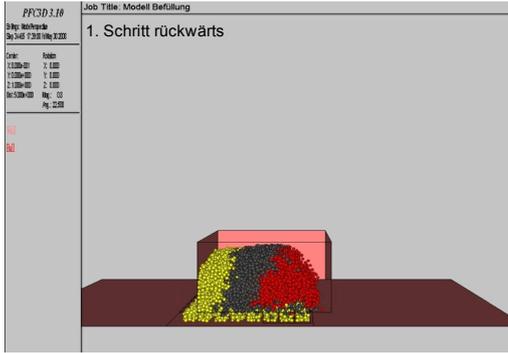
Modellprämissen:

- Die Füllflächenkennzahl  $A_{TR} / A_{FR}$  beträgt näherungsweise 1.
- Das Gemenge verhält sich wie eine ruhende Newtonsche Flüssigkeit.

# Anlage 7.1: Ausgewählte Momentaufnahmen aus der Simulation des Füllprozesses im PFC3D



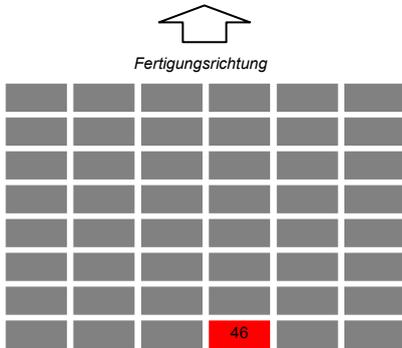
# Anlage 7.1: Ausgewählte Momentaufnahmen aus der Simulation des Füllprozesses im PFC3D



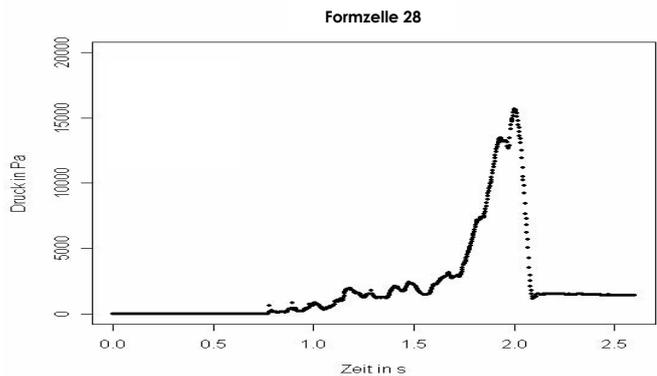
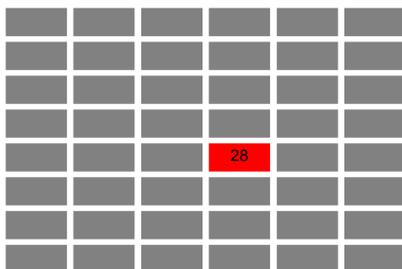
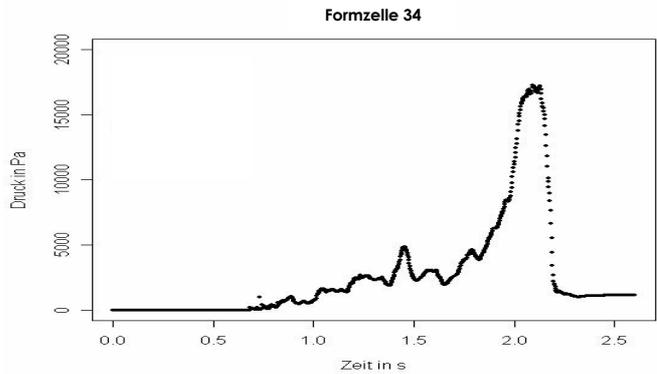
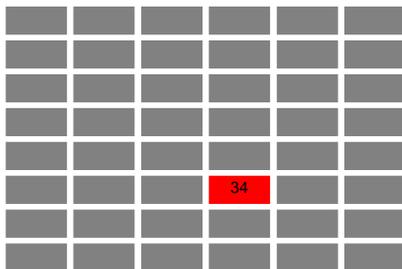
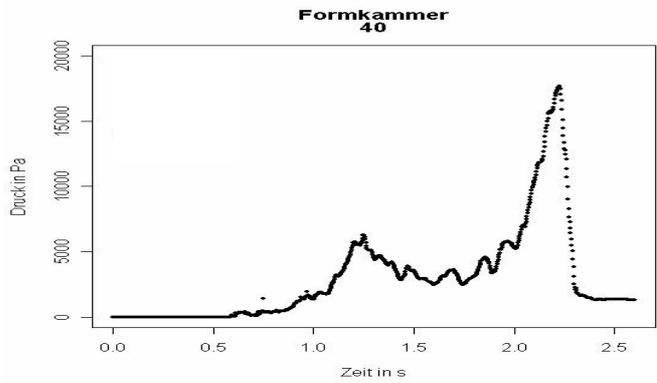
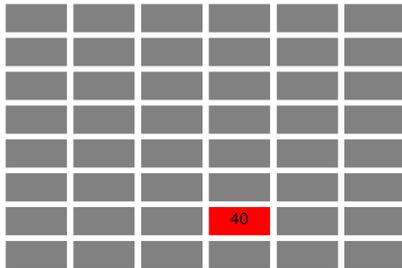
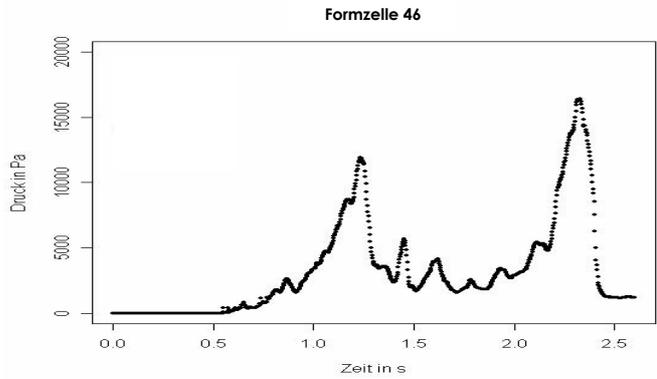
# Anlage 7.2:

## Ausgewählte Zellendruck-Zeit-Funktionen innerhalb eines Zyklus erzeugt aus der Simulation des Füllprozesses im PFC3D

Zeilen und Spaltenlage der Zelle in Fertigungsrichtung



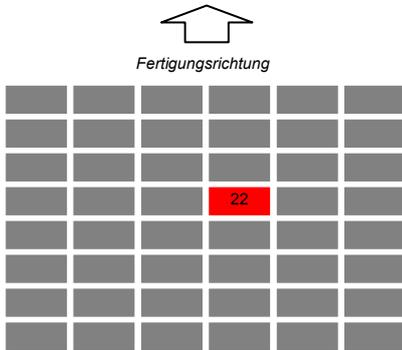
Druck-Zeitfunktion am Zellenboden



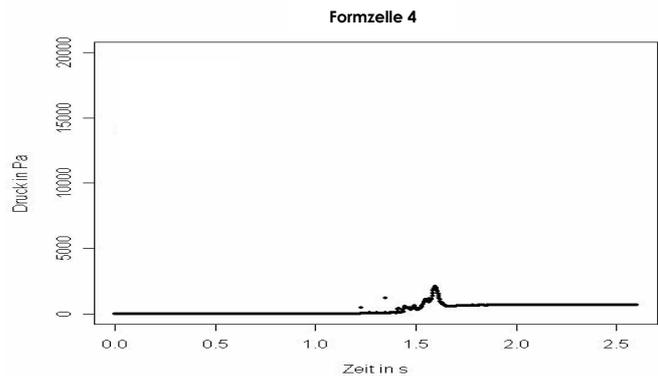
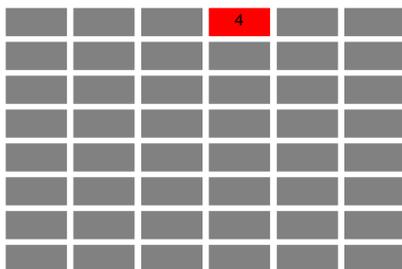
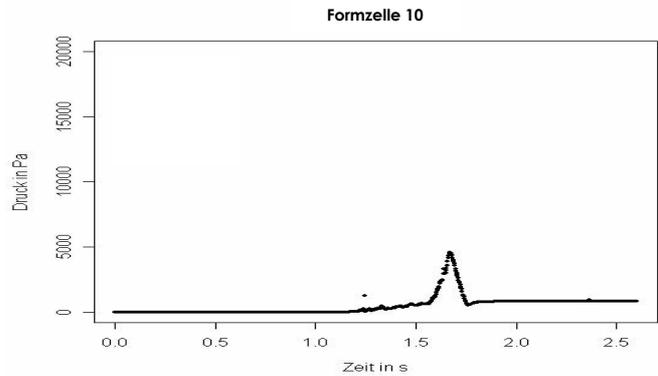
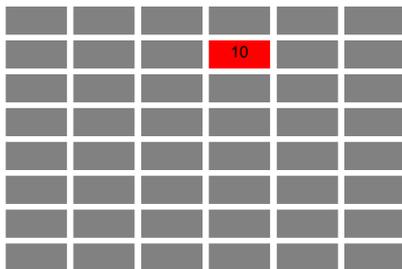
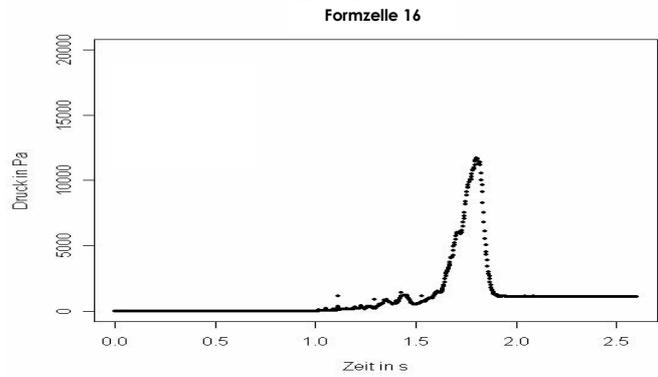
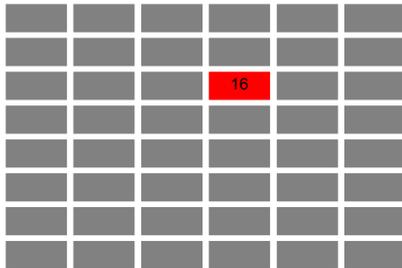
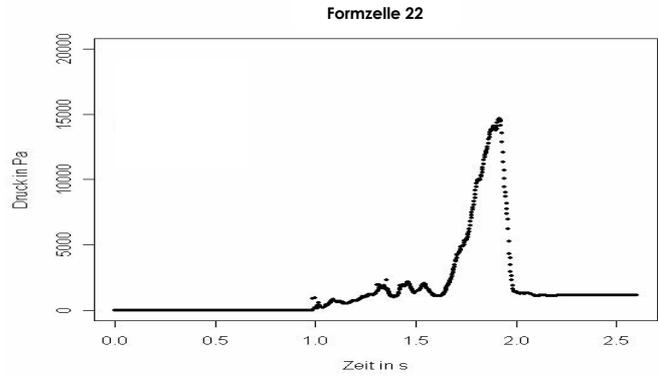
## Anlage 7.2:

Ausgewählte Zellendruck-Zeit-Funktionen innerhalb eines Zyklus erzeugt aus der Simulation des Füllprozesses im PFC3D

Zeilen und Spaltenlage der Zelle in Fertigungsrichtung



Druck-Zeitfunktion am Zellenboden



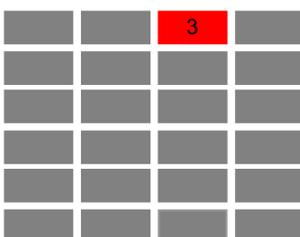
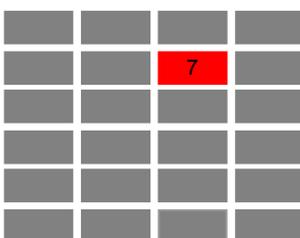
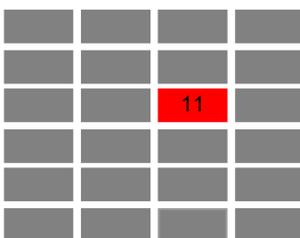
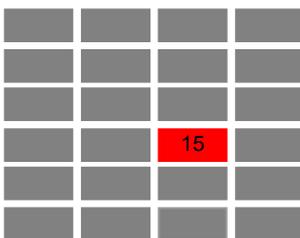
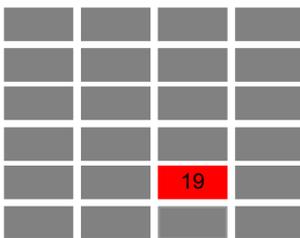
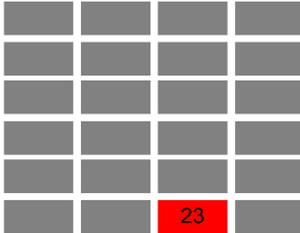
# Anlage 8:

Ausgewählte Zellendruck-Zeit-Funktionen innerhalb eines Zyklus erzeugt im Verifizierungsversuch

Zeilen und Spaltenlage der Zelle in Fertigungsrichtung



Fertigungsrichtung



Druck-Zeitfunktion am Zellenboden

