

Large Particle 3D Concrete Printing mit rezyklierter Gesteinskörnung

BBSR-
Online-Publikation
08/2026

von

David Böhrer
Jan-Phillip Zöllner
Prof. Dr. Norman Hack
Prof. Dr. Harald Kloft
Prof. Dr. Inka Mai
Prof. Dr. Dirk Lowke



Large Particle 3D Concrete Printing mit rezyklierter Gesteinskörnung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.19

Projektlaufzeit: 08.2021 bis 12.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

ITE – Institut für Tragwerksentwurf, Braunschweig
Jan-Phillip Zöllner
jan-phillip.zoellner@tu-bs.de

Prof. Dr. Norman Hack
Prof. Dr. Harald Kloft

IBMB – Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig
David Böhler
d.boehler@tu-bs.de

Prof. Dr.-Ing. Inka Mai
Prof. Dr. Dirk Lowke

Redaktion

ITE – Institut für Tragwerksentwurf, Braunschweig

Stand

Juli 2025

Gestaltung

ITE – Institut für Tragwerksentwurf, Braunschweig
IBMB – Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig

Bildnachweis

Titelbild: LP3DCP-Verfahren, Testkörper, ITE
Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 140

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitiervorschlag

Böhler, D.; Zöllner, J.-P.; Hack, N.; Kloft, H.; Mai, I.; Lowke, D., 2026: Large Particle 3D Concrete Printing mit rezyklierter Gesteinskörnung. BBSR-Online-Publikation 08/2026. Bonn. <https://doi.org/10.58007/tc95-kz28>

DOI 10.58007/tc95-kz28
ISSN 1868-0097

Bonn 2026

1 Inhaltsverzeichnis

2	Einführung	9
2.1	Large Particle 3D Concrete Printing (LP3DCP)	9
2.2	Zielstellung	9
3	Forschungskonzept	10
3.1	Hypothese und Konzept der Untersuchungen	10
3.2	Arbeitspakete	12
4	Materialien	14
4.1	Partikelbett	14
4.2	Feinkornbeton	15
4.3	Bewehrung	17
5	Methodisches Vorgehen	18
5.1	Herstellung der LP3DCP-Proben	18
5.2	Ablauf der Untersuchungsreihen	22
	Untersuchungsreihe U1 – Einfluss aus veränderlicher Feinkornbetonrheologie:	23
	Untersuchungsreihe U2 – Einfluss aus veränderlichen Prozessparametern	24
	Untersuchungsreihe U3 – Einfluss aus veränderlicher Feinkornbetonrheologie & Prozessparametern	24
	Untersuchungsreihe U4 – Einfluss aus erhöhtem Auftrag der Feinkornbetonmenge	26
	Untersuchungsreihe U5 – Untersuchung von Konzepten zur Bewehrungsintegration	26
	Untersuchungsreihe U6 – Untersuchung der automatisierten Ausbringung von Partikeln	27
	Untersuchungsreihe U7 – Untersuchung großformatiger Geometrien	29
	Untersuchungsreihe U8 – Untersuchung geometrischer Freiheitsgrade	30
5.3	Untersuchungsmethoden	31
	Charakterisierung der Partikelbettkennwerte	31
	Charakterisierung der Feinkornbetonkennwerte und rheologische Untersuchungen	33
	Untersuchung der Festbetoneigenschaften	36
	Strukturelle Untersuchungen	38
6	Untersuchungsreihe U1: Einfluss aus veränderlicher Feinkornbetonrheologie	42
6.1	Rheologische Kennwerte des Feinkornbetons	42
6.2	Geometrie der hergestellten Streifen	42
6.3	Gefügeuntersuchung	43
6.4	Druckfestigkeit	45
6.5	Zusammenfassung	47
7	Untersuchungsreihe U2: Einfluss aus veränderlichen Prozessparametern	48
7.1	Charakterisierung der Partikelbetten	48
7.2	Rheologische Untersuchungen	49
7.3	Geometrie der hergestellten Streifen	50
7.4	Würfeldruckfestigkeit	50
	Konventionell hergestellte REF-Proben	50
	LP3DCP-Proben	50
7.5	Isotropie	52

7.6	Zusammenfassung	52
8	Untersuchungsreihe U3: Einfluss aus veränderlicher Feinkornbetonrheologie & Prozessparametern	54
8.1	Charakterisierung der Partikelbetten	54
8.2	Rheologische Untersuchungen	56
	Entwicklung eines Feinkornbetons mit über die Zeit gleichbleibenden rheologischen Kennwerten (bestimmt über das Ausbreitmaß)	56
	Rheologische Charakterisierung der Feinkornbetone mit dem ICAR-Rheometer	57
	Einfluss des Spritzprozesses auf die Penetrometer-Fließgrenze	58
	Einfluss des Spritzprozesses auf das Ausbreitmaß	59
8.3	Einfluss auf die Verfahrensgeschwindigkeit der Düse	60
8.4	Einflüsse auf die Spritzlayerbreite wL auf der Partikelbettoberfläche	61
	Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:	61
	Einfluss aus den Eigenschaften des Partikelbetts:	62
	Einfluss aus den Prozessparametern:	64
	Einfluss eines angefeuchteten Partikelbett:	65
8.5	Eindringverhalten	66
	Gesamte Betonhöhe $h_{F,1}$ sowie $h_{F,2}$, ungebundene Zone $h_{U,1}$ sowie $h_{U,2}$ und Kompaktheit K	68
	Aufstehender Beton a_F	72
	Eindringtiefe e	75
8.6	Verbunduntersuchung	79
	Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:	81
	Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:	82
	Einfluss aus den Prozessparametern:	83
	Einfluss aus angefeuchtetem Partikelbett:	84
8.7	Festbetoneigenschaft: Betondichte	85
	Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:	86
	Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:	86
	Einfluss aus den Prozessparametern:	88
	Einfluss aus angefeuchtetem Partikelbett:	88
8.8	Festbetoneigenschaft: Druckfestigkeit	89
	Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:	92
	Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:	93
	Einfluss aus den Prozessparametern:	95
	Einfluss aus angefeuchtetem Partikelbett:	96
8.9	Festbetoneigenschaft: Isotropie des LP3DCP-Betons	97
	Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:	97
	Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:	98
	Einfluss aus den Prozessparametern:	99
	Einfluss aus angefeuchtetem Partikelbett:	100
8.10	Zusammenfassung	101
	Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:	101
	Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:	101
	Einfluss aus den Prozessparametern:	102
	Einfluss aus angefeuchtetem Partikelbett:	102
	Konzept zur Berechnung der Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit:	103

9	Untersuchungsreihe U4: Einfluss aus erhöhtem Auftrag der Feinkornbetonmenge	104
9.1	Einleitung	104
9.2	Partikelbett und Rheologie	104
9.3	Einfluss auf die Spritzlayerbreite wL auf der Partikelbettoberfläche	104
9.4	Eindringverhalten	104
9.5	Verbunduntersuchung	106
9.6	Festbetoneigenschaft: Betondichte, Würfeldruckfestigkeit und Isotropie	107
9.7	Zusammenfassung	107
10	Untersuchungsreihe U5: Untersuchung von Konzepten zur Bewehrungsintegration	109
10.1	Einleitung	109
10.2	Partikelbett und Rheologie	109
10.3	Unbewehrte Biegebalken	110
10.4	Bewehrte Biegebalken	111
	Konventionell hergestellte bewehrte Referenz-Proben	111
	Bewehrungsverbund der LP3DCP-Proben	111
	Bewehrte LP3DCP-Proben	113
10.5	Zusammenfassung	114
11	Untersuchungsreihe U6: Untersuchung der automatisierten Ausbringung von Partikeln	116
11.1	Einleitung	116
11.2	Versuchsreihe 1	116
11.3	Versuchsreihe 2	118
11.4	Zusammenfassung	120
12	Untersuchungsreihe U7: Untersuchung großformatiger Geometrien	121
12.1	Einleitung	121
12.2	Design	121
12.3	Versuchsvorbereitung	122
12.4	Versuchsdurchführung	123
12.5	Nachbearbeitung	124
12.6	Zusammenfassung	126
13	Untersuchungsreihe U8: Untersuchung zu geometrischen Freiheitsgraden	127
13.1	Einleitung	127
13.2	Versuchsreihe 1	127
13.3	Versuchsreihe 2	128
13.4	Zusammenfassung	129
14	Vergleich der ökologischen Aspekte von LP3DCP-Beton	130
15	Zusammenfassung und Ausblick	132
16	Mitwirkende	136
17	Kurzbiographien	137
18	Literaturverzeichnis	139

19	Abbildungsverzeichnis	143
20	Tabellenverzeichnis	154
21	Anlagen	155

Kurzfassung

Das Forschungsvorhaben „Large Particle 3D Concrete Printing (LP3DCP) Using Recycled Aggregates“ erweitert die bisherige Technologie des 3D-Betondrucks, die überwiegend nur sehr feinkörnige Betone einsetzt und bietet einen grundlegend neuen Ansatz durch die Verwendung von grober Gesteinskörnung. Das zu erforschende Verfahren basiert auf dem Partikelbett-3D-Druckverfahren und untersucht die Integration von deutlich größeren Partikeln (bis zu 63 mm Größtkorn) und bindet diese selektiv mittels Spritzbetonapplikation. Durch die Skalierung der Gesteinskörnung und den damit einhergehenden größeren Schichthöhen kann eine deutlich gesteigerte Herstellgeschwindigkeit gegenüber bisher etablierten Partikelbett-Druckverfahren erreicht werden. Die mit dem Spritzbetonprozess verbundene hohe kinetische Energie während der Applikation des Feinkornbetons kann sich dabei positiv auf die Festbetoneigenschaften von LP3DCP-Beton auswirken. Im Hinblick auf die Nachhaltigkeit kann mit dem LP3DCP-Verfahren im Vergleich zu anderen 3D-Betondruckverfahren eine Zementersparung zwischen 19 bis 79 % erzielt werden. Damit lässt sich der CO₂-Fußabdruck von mittels dem LP3DCP-Verfahren hergestellten 3D-gedruckten Betonbauteilen deutlich verbessern. Zudem kann rezyklierte Gesteinskörnung als grobe Gesteinskörnung verwendet und dadurch zukünftig die Primärressourcen geschützt werden. Beide Ansätze erhöhen die Nachhaltigkeit der Strukturen. Die Möglichkeiten, die sich aus der erweiterten Formenfreiheit des LP3DCP-Verfahrens ergeben, werden als hoch eingestuft, da auch mehrfach gekrümmte Bauteile, Bauteile mit komplexer innerer Geometrie sowie auskragende Bauteile hergestellt werden können.

2 Einführung

2.1 Large Particle 3D Concrete Printing (LP3DCP)

Die Grundidee des Large Particle 3D Concrete Printing (LP3DCP)-Verfahrens beruht auf dem selektiven Binden; hierbei sind die mechanischen Eigenschaften von der Verbundqualität der Schichten abhängig.

Zunächst wird eine Schicht grober Gesteinskörnung ausgebracht und im nächsten Schritt wird Feinkornbeton auf die ungebundenen Aggregate gespritzt, sodass sie lokal gebunden werden. Diese Schritte werden wiederholt, bis die angestrebte Geometrie erzeugt wurde. Anschließend kann nach einer Aushärtedauer die Baukammer demontiert werden, damit ungebundene Partikel gelöst werden können. (Mai et al. 2021)

Das LP3DCP-Verfahren ermöglicht es, durch das Hinzufügen grober Gesteinskörnung, den Anteil der Zementmenge zu verringern. Durch die Verwendung von rezyklierten Materialien kann der Primärrohstoffeinsatz reduziert werden. Zusätzlich kann durch die digitale Produktionsmethode Material eingespart werden, sodass Bauteile mit einem deutlich reduzierten CO₂ Anteil realisierbar sind.

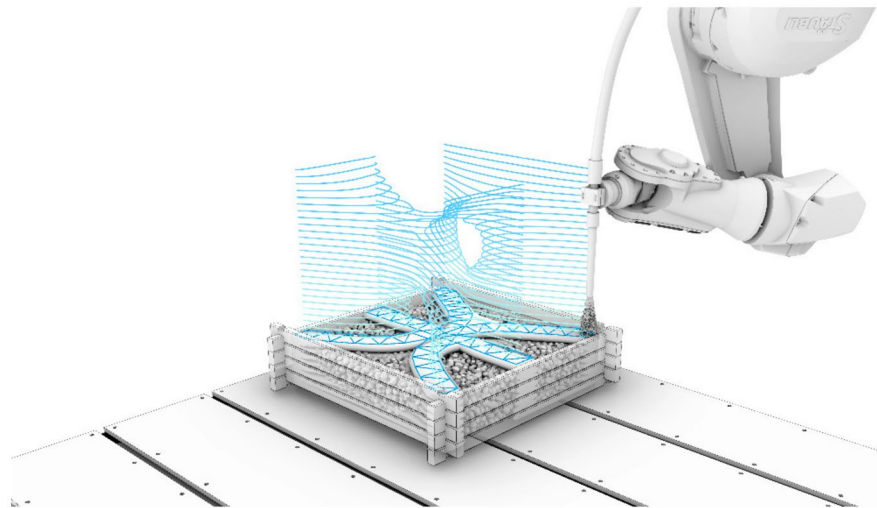


Abbildung 1: Visualisierung des LP3DCP Verfahrens (Foto: ITE)

2.2 Zielstellung

Das wissenschaftlich-technische Ziel der Forschung ist es, die bekannten Partikelbett 3D-Drucktechnologie durch Skalierung seiner Komponenten (Partikel, injizierter Feinkornbeton) als ressourceneffizientes, additives Fertigungsverfahren für die Bauindustrie nutzbar zu machen. Im Vordergrund der Skalierung steht die Absicht, auch mit großer Gesteinskörnung additiv fertigen zu können, um so den Zementgehalt zu reduzieren und die CO₂-Bilanz deutlich zu verbessern sowie den Primärressourceneinsatz über die Nutzung rezyklierter Gesteinskörnung zu reduzieren.

Um diese Ziele zu erreichen, muss das Large Particle 3D Concrete Printing mit rezyklierter Gesteinskörnung zuerst grundlegend erforscht werden. Ein wichtiger Bestandteil der Forschung sind physische Experimente, in denen die zugrundeliegende Material-Prozess-Interaktion durch Probekörper und Laborversuche systematisch untersucht wird. Ferner werden weiterführenden Potentiale aufgezeigt, indem beispielsweise die Bewehrungsintegration oder die Oberflächenbearbeitung prototypisch untersucht werden.

3 Forschungskonzept

3.1 Hypothese und Konzept der Untersuchungen

Das Ziel des Forschungsprojektes ist eine grundlegende Untersuchung des LP3DCP-Prozesses sowie eine Untersuchung auf der materialtechnologischen Ebene durchzuführen. Der LP3DCP-Prozess soll dabei die Herstellung von Bauteilen unter Verwendung von grober Gesteinskörnung sowie hohen mechanischen Eigenschaften adressieren. Durch die Verwendung von grober rezyklierte Gesteinskörnung kann der Primärrohstoffeinsatz reduziert werden (Mai et al. 2021). Für gute mechanische Eigenschaften sowie einen hohen Schichtverbund muss nach Abschluss des 3D-Druckvorgangs der Feinkornbeton die Gesteinskörnung für ein homogenes Gefüge vollständig umschließen. Dabei ist der Eindringprozess eine Interaktion zwischen der Rheologie des Feinkornbetons (bspw. Fließgrenze und Viskosität), den Eigenschaften des Partikelbetts (bspw. Porosität, Form und Rauheit der Gesteinskörner) und den gewählten Prozessparametern (bspw. Beton- und Luftvolumenstrom). Dabei kann in Abhängigkeit der Fließfähigkeit des Feinkornbetons zwischen drei Eindringprinzipien unterschieden werden (vgl. Abbildung 2):



Abbildung 2: Eindringprinzip in Abhängigkeit der Rheologie des Feinkornbetons in ein Partikelbett für sehr fließfähigen (links) Feinkornbeton, fließfähigen (Mitte) und zähen Feinkornbeton (rechts)

- Sehr fließfähiger Feinkornbeton: Die Rheologie des Feinkornbetons ist sehr fließfähig, sodass ein vollständiges Eindringen in das Partikelbett möglich ist (vgl. Abbildung 2 links– 1. Schicht). Wird eine nächste Partikelschicht aufgebracht, liegen die Partikel direkt Korn auf Korn auf der alten Partikelschicht auf. Der Feinkornbeton wird dabei nicht oder nur wenig weiter verdrängt (vgl. Abbildung 2 links – 2. Schicht).
- Fließfähiger Feinkornbeton: Die Rheologie des Feinkornbetons ist weniger fließfähig als in a), sodass der Feinkornbeton nur leicht in das darunter liegende Partikelbett eindringt und ein Anteil auf der Partikelbettoberfläche aufliegt (vgl. Abbildung 2b – 1. Schicht). Bei Applizierung der nächsten Partikelschicht drückt sich dieses in den Feinkornbeton und der Feinkornbeton

wird dabei vertikal verdrängt. Aufgrund der Fließfähigkeit des Feinkornbetons fließt dieser aber nicht oder nur leicht lateral (Abbildung 2 Mitte – 2. Schicht).

- c) Zäher Feinkornbeton: Die Rheologie des Feinkornbetons ist zäher als in a) und b), sodass der Feinkornbeton nicht in das darunterliegende Partikelbettschicht eindringt und komplett auf der Oberfläche der 2. Partikelbettschicht aufliegt (vgl. Abbildung 2 rechts – 1. Schicht). Wird eine nächste Partikelschicht aufgebracht, wird der Feinkornbeton nur noch leicht in die darunterliegende erste Partikelbettschicht und zum größten Teil in die neu aufgebraute zweite Partikelbettschicht verdrängt (vgl. Abbildung 2 links – 2. Schicht). Dabei beginnt auch ein Großteil des Feinkornbetons lateral zu fließen.

Es ist somit von großer Bedeutung, den Eindringprozess des Feinkornbetons in ein Partikelbett zu verstehen und kontrollieren zu können. Hierfür kann auf Ansätze der Selective Paste Intrusion (SPI) zurückgegriffen und die wichtigsten Parameter für die experimentelle Untersuchung abgeleitet werden. Für das SPI-Verfahren konnte gezeigt werden, dass die Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Bauteile stark mit der Eindringtiefe des Zementleims zusammenhängt (Pierre et al. 2018; Lowke et al. 2018). Es wurde gezeigt, dass die Hohlräume in und zwischen den einzelnen Schichten für gute mechanische Eigenschaften vollständig gefüllt sein müssen. Pierre et al. entwickelte hierfür einen analytischen Zusammenhang, mit welchem eine maximale Fließgrenze berechnet werden kann, bis zu welcher der Zementleim das Partikelbett vollständig durchdringt (Pierre et al. 2018). Der Ansatz wurde für das Aufliegen von Zementleimschichten geringer Höhe entwickelt, beim LP3DCP-Prozess wird der Feinkornbeton allerdings mittels Druckluft kinetisch beschleunigt auf das Partikelbett appliziert, wodurch eine Übertragbarkeit und quantifizierbare Aussage zur Eindringtiefe nicht unmittelbar möglich ist. Für eine qualitative Beurteilung und Abschätzung der Zusammenhänge aus der Interaktion des eindringenden Feinkornbetons und des Partikelbetts kann dieser Ansatz aber herangezogen werden. Nach Pierre et al. lässt sich die Eindringtiefe h_{pen} des Feinkornbetons in ein Partikelbett für eine nicht-newtonsche Flüssigkeit in Abhängigkeit der Fließgrenze τ_0 nach GL 1 abschätzen (Pierre et al. 2018):

$$h_{pen} \sim \frac{1}{\tau_0} \quad \text{GL 1}$$

Nach GL 1 führt eine geringe Fließgrenze (unter druckloser Applizierung) zu einer Erhöhung der Eindringtiefe des Feinkornbetons in das Partikelbett. Zudem lässt sich nach Pierre et al. eine maximale Fließgrenze $\tau_{c,max}$ in Abhängigkeit der Packungsdichte φ_s des Partikelbetts berechnen, nach welcher ein vollständiges Eindringen des Feinkornbetons in das Partikelbett gerade noch möglich ist (vgl. GL 2) (Pierre et al. 2018):

$$\tau_{c,max} = \frac{1 - \varphi_s}{\varphi_s} \quad \text{GL 2}$$

Nach Gleichung GL 2 muss für eine zunehmende Packungsdichte die Fließgrenze sinken, damit ein vollständiges Eindringen möglich ist. Beim LP3DCP-Verfahren kann aber eine nach GL 2 rechnerisch zu hohe Fließgrenze aufgrund der Applizierung mittels Druckluft trotzdem zu einem vollständigen Eindringen des Feinkornbetons in das Partikelbett führen. Grund könnte hier die hohe kinetische Energie des applizierten Feinkornbetons sein, welche das Risiko eines schlechten Verbunds in und zwischen den einzelnen Schichten vermutlich mindert (auch wenn der Feinkornbeton ein zähes Fließverhalten aufweist). Unter dieser Annahme wären hohe Fließgrenzen sogar erstrebenswert, da hierdurch eine höhere geometrische Präzision erreicht werden könnte.

Es wird daher erwartet, dass die gewählten Prozessparameter des Spritzbetonverfahrens einen Einfluss auf das Eindringverhalten besitzen. Aus dem Shotcrete (SC3DP) -Prozess ist bereits bekannt, dass der Düsenabstand, der Luft- und Betonvolumenstrom sowie die Düsen-Verfahrgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die Festbetoneigenschaften wie bspw. Layerhöhe und -breite aber auch Betondichte

besitzen (Dressler et al. 2020; Böhler et al. 2022). Demnach wird auch von einem Einfluss der Prozessparameter auf LP3DCP-Probekörper ausgegangen.

Grundsätzlich kann das Eindringverhalten (vgl. Abbildung 2) über zwei Ansätze kontrolliert werden (Mai et al. 2021):

- i. Optimierung der rheologischen Eigenschaften (insbesondere der Fließgrenze) durch die Zugabe von bspw. Fließmittel und Stabilisierer. Einerseits ist eine niedrige Fließgrenze des Feinkornbetons für ein vollständiges Eindringen in das Partikelbett notwendig, andererseits erhöht dies auch das Risiko einer geringeren geometrischen Präzision.
- ii. Optimierung der Packungsdichte des Partikelbetts. Eine hohe Packungsdichte führt zu einem geringeren Eindringen des Feinkornbetons in das Partikelbett (vgl. GL 1 und GL 2), was wiederum die mechanische Leistungsfähigkeit reduzieren kann.

Für eine zukünftige Anwendung als Stahlbeton ist eine Einbindung der Bewehrung in den LP3DCP-Beton mit einem mechanischen Verbund zwischen Beton und Bewehrung erforderlich. Bei konventionell hergestelltem Beton steigt die Verbundtragfähigkeit mit zunehmender flächiger Umschließung der Bewehrung durch den Beton. Beim LP3DCP-Verfahren kann der Einbau der horizontalen Bewehrung zwischen den einzelnen Schichten vor oder nach dem Aufbringen des Feinkornbetons auf die Partikelschicht erfolgen. Wird die Bewehrung vor dem Aufbringen des Feinkornbetons eingebracht, muss der Feinkornbeton in der Lage sein, die Bewehrung selbstständig zu umströmen und vollständig zu umschließen. Durch das Aufbringen des Feinkornbetons von oben ist denkbar, dass es insbesondere an der Unterseite der Bewehrung zu einem geringen Verbund kommen könnte. Wird die Bewehrung nach dem Aufbringen des Feinkornbetons in den noch frischen Feinkornbeton eingelegt, könnte mindestens die Unterseite vollständig eingebunden sein. Die Oberseite der Bewehrung könnte dann beim Aufbringen der nächsten Schicht eingebunden werden. Bei erfolgreicher Abstimmung der rheologischen Eigenschaften mit den Kennwerten des Partikelbettes wird für beide Einlegereihenfolgen eine ähnliche Verbundfestigkeit erwartet.

Zusätzlich zu den materialtechnischen Eigenschaften wird die LP3DCP-Technik hinsichtlich Ihrer geometrischen Freiheitsgrade untersucht. Es wird erwartet, dass der applizierte Feinkornbeton die zuvor ausgelegten Partikelschichten nicht komplett durchdringt, stattdessen nur die zuoberst liegende Partikelschicht vollständig umschließt, somit können ungebundene Partikel als Trägerschicht für komplexe Geometrien wie Auskragung genutzt werden. Zu erwartende geometrische Abweichungen von 3D Modell zu gedrucktem Objekt werden untersucht, um Rückschlüsse auf mögliche Druckbarkeit ziehen zu können.

Sofern keine Nachbearbeitung der LP3DCP-Geometrien stattfindet, bildet sich an den äußeren Rändern eine unebene Oberflächenstruktur, da außenliegende Partikel nur teilweise gebunden werden können. Diese Oberflächenbeschaffenheit kann gezielt im Entwurfsprozess genutzt werden, zusätzlich werden die Möglichkeiten der Nachbearbeitung untersucht. Hierzu werden Probekörper, mithilfe einer CNC-Fräse, schrittweise abgeschliffen, um unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten generieren zu können.

3.2 Arbeitspakete

Das Forschungsvorhaben LP3DCP wird in einem kooperativen Forschungsteam, bestehend aus dem Institut für Tragwerksentwurf (ITE) sowie dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) an der TU Braunschweig, umgesetzt. Das Forschungskonzept untergliedert sich in vier aufeinander aufbauende Arbeitspakete (AP1 bis AP4), welche durch acht Untersuchungsreihen U1 bis U8 bearbeitet werden. Die Untersuchungsreihen U1 bis U5 werden dabei hauptverantwortlich vom iBMB durchgeführt und adressieren die AP1 und AP3. Die Untersuchungsreihen U6 bis U8 werden hauptverantwortlich vom ITE durchgeführt und adressieren die AP2 und AP3. Eine umfängliche Beschreibung der

Untersuchungsreihen ist in Abschnitt 4.3 adressiert und mit den entsprechenden Methoden nach Abschnitt 4.4 untersucht. Die vier Arbeitspakete unterteilen sich wie folgt:

1. **Materialtechnologie (iBMB):**

Ziel des AP1 ist eine umfangreiche Charakterisierung der Kennwerte der eingesetzten Partikelbettsysteme hinsichtlich bspw. der Sieblinie, Packungsdichte und Kornform. Daneben wird basierend auf den bestehenden Feinkornbetonrezepturen eine zementreduzierte Feinkornbetonrezeptur mit robuster Rheologie über die Zeit entwickelt. Die Feinkornbetone werden schlussendlich rheologisch charakterisiert (Ausbreitmaß, Fließgrenze und Viskosität). Das AP 1 wird in den Untersuchungsreihen U1 bis U4 adressiert.

2. **Digitale Prozesskette (ITE):**

Anpassungen des Robotersystems im Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) für das LP3DCP-Verfahren, Weiterentwicklung digitaler Entwurfs- und Planungswerkzeuge, sowie das Entwickeln nutzbarer Tools und deren Abstimmung an das robotische System. Das AP 2 wird in den Untersuchungsreihen U6 bis U8 adressiert.

3. **Material- und Prozessinteraktion (iBMB & ITE):**

iBMB: Die Interaktion zwischen den Material- und Prozessparametern und deren Einfluss auf das Eindringverhalten und die LP3DCP-Festbetoneigenschaften werden im Detail untersucht. Hierfür werden systematisch die Material- und Prozessparameter variiert und die relevanten Parameter identifiziert. Die LP3DCP-Probenvariationen werden zudem hinsichtlich ihres Eindringverhaltens während des LP3DCP-Prozesses und dem resultierenden Schichtenverbund untersucht und basierend auf den Erkenntnissen grundlegende Eindringmodelle entwickelt. Diese Untersuchungen erfolgen in den Untersuchungsreihen U1 bis U4. Daneben werden in der Untersuchungsreihe U5 erstmalig großformatige unbewehrte und bewehrte Biegebalken und der Einfluss der Bewehrungsintegration untersucht.

ITE: Experimentelle Untersuchung zu geometrischen Freiheitsgraden, sowie Nachbearbeitungsstrategien angepasst an das LP3DCP-Verfahren. Das AP 3 wird in den Untersuchungsreihen U6 bis U8 adressiert.

4. **Evaluation des Gesamtverfahrens (iBMB & ITE):**

Auf der Grundlage der vorhergehenden Arbeitspakete wird das LP3DCP-Verfahren hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit, Anwendungsmöglichkeiten und Zukunftsfähigkeit bewertet. Dies erfolgt im Rahmen der Zusammenfassung im letzten Kapitel.

4 Materialien

4.1 Partikelbett

In Tabelle 1 sind die Eigenschaften der eingesetzten Partikelbetten für die Untersuchungsreihe U1 (Partikelbett A & B), Untersuchungsreihe U2 (Partikelbett C & D) und Untersuchungsreihe U3 - U5 (Partikelbett E, F & G) dargestellt. Die Rezyklat-Partikelbetten A & B wiesen eine Verunreinigung auf und konnten daher nicht eindeutig dem Rezyklatgesteinskörnungstyp 1 oder 2 zugeordnet werden. Aus diesem Grund wurden für die nachfolgende Untersuchungsreihe U2 die beiden Partikelbetten C & D verwendet. Die Basalkörnung der Partikelbetten C & D erwies sich jedoch als sehr schwer bearbeitbar, z. B. beim Sägen der Proben. Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen wurden daher in den Untersuchungsreihen U3 - U5 die Partikelbetten E, F & G eingesetzt.

Die Partikelbetten A und B bestehen aus trockener, rezyklierter Gesteinskörnung der Korngruppe 16-32 mm sowie 4-32 mm. Beide Partikelbetten besitzen eine Dichte von 1620 kg/m^3 . Partikelbett A enthält nur Gesteinskörnung aus einer Korngruppe, d. h. dass das größte Partikel höchstens den doppelten Durchmesser des kleinsten Partikels besitzt ($d_{\max} \leq 2 d_{\min}$, hier: 16-32 mm, vgl. (Schwanda 1959)). Partikelbett B setzt sich im Größenverhältnis von 1:4 (hier: 4-8 mm und 16-32 mm) aus zwei einzelnen Korngruppen zusammen, sodass ein Volumenverhältnis von $V_{4-8}/V_{16-32} = 0,27$ erreicht wird. Für dieses Verhältnis wird ein Packungsdichtemaximum erwartet (Oger et al. 1986; Larrard): In lagenweiser Schichtung erzielt das Partikelbett A eine Porosität von 0,59 und das Partikelbett B mit einer Packungsdichte von 0,56 einen etwas geringen Wert.

Die Partikelbetten C und D bestehen aus natürlicher, gebrochener Basalt-Gesteinskörnung mit einer Korngruppe von 16-32 mm sowie 32-63 mm. Das Partikelbett C und D besitzt eine Dichte von 2930 kg/m^3 sowie 2910 kg/m^3 . Beide Partikelbetten C und D weisen in lagenweiser Schichtung mit 0,43 die gleiche Porosität auf und besitzen damit weniger freien Porenraum als die beiden Partikelbetten A und B.

Die Partikelbetten E und F bestehen aus natürlicher, gebrochener Kalkstein-Gesteinskörnung mit einer Korngruppe von 8-32 mm (KS8-32) sowie 32-63 mm (KS16-32). Das Rezyklat-Partikelbett G besteht aus gebrochenem reinem Beton der Korngruppe von 16-32 mm (Rez16-32). Die Kalkstein-Partikelbetten E und F besitzen mit einer Dichte von jeweils 2701 kg/m^3 eine etwas höhere Dichte als das Rezyklat-Partikelbett G mit einer Dichte von 2560 kg/m^3 . Mit einer Porosität zwischen 0,41 (F, G) und 0,43 (E) liegt die Porosität im ähnlichen Bereich wie das Basalt-Partikelbett. Das Rezyklat-Partikelbett G besitzt im Vergleich zu den Kalkstein-Partikelbetten E und F eine etwa zwei bis dreimal höhere Wasseraufnahme.

Tabelle 1
Eigenschaften der Partikelbetten (PB) A bis G.; n.b. = nicht bestimmt

Untersuchungsreihe		U1		U2		U3 – U5			U6	U7	U8
Kurzbenennung der PB-Varianten		A	B	C	D	E	F	G	A	A	F
		Rez16-32	Rez4-32	Bas16-32	Bas32-63	KS8-32	KS16-32	Rez16-32	Rez16-32	Rez16-32	KS16-32
Partikelart:		Rezyklat		Basalt		Kalkstein		Rezyklat	Rezyklat	Rezyklat	Kalkstein
Herstellung		gebrochen		gebrochen		gebrochen		gebrochen	gebrochen	gebrochen	gebrochen
Korngruppe:	[mm]	16-32	4-32	16-32	32-63	8-32	16-32	16-32	16-32	16-32	16-32
Schüttdichte ρ_{rd} :	[kg/m ³]	661,5	706,3	1680	1673	1539	1591	1516	661,5	661,5	1591
Rohdichte ρ :	[kg/m ³]	1620	1620	2930	2910	2701	2701	2560	1620	1620	2701
Packungsdichte φ_s :	[-]	0,41	0,44	0,57	0,58	0,57	0,59	0,59	0,41	0,41	0,59
Porosität ϵ :	[-]	0,59	0,56	0,43	0,42	0,43	0,41	0,41	0,59	0,59	0,41
Wasseraufnahme	[M.-%]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1,1	1,4	2,9	n.b.	n.b.	1,4

4.2 Feinkornbeton

In Tabelle 2 ist die Zusammensetzung der Feinkornbetonvarianten (F) für die Untersuchungsreihe U1 (F0), Untersuchungsreihe U2 (F1) sowie Untersuchungsreihen U3 – U5 (jeweils F2, F3 & F4) gezeigt, welche auf die entsprechenden Partikelbetten appliziert werden.

Grundsätzlich bestehen alle Feinkornbetonvarianten F0 – F4 aus einem gewöhnlichen Portlandzement (CEM I 52,5 R) sowie Quarzsand mit einer maximalen Korngröße von 3,15 mm. Die Art und der Volumenanteil der Gesteinskörnung (Quarzsand) bleibt für alle Mischungsvarianten identisch. Für die Feinkornbetone F0 und F1 wird dabei ein pulverförmiger Stabilisierertyp 1 (1.ST) (Rohstoffbasis: Polysaccharid, anorganisches Antiblockmittel, Schüttdichte: 0,9 g/cm³) und für die Feinkornbetone F2 bis F4 ein pulverförmiger Stabilisierertyp 2 (2.ST) (Rohstoffbasis: Polymerbasis, Schüttdichte: 0,9 g/cm³) eingesetzt. Beide Stabilisierer wurden für die kommerzielle Anwendung bei der Herstellung von hochfließfähigen und selbstverdichtenden Betonen entwickelt. Der wesentliche Unterschied zwischen

1.ST und 2.ST liegt dabei in einer nicht scherverdünnenden Wirkungsweise des 2.ST. Der Wechsel zum Stabilisierertyp 2.ST führt zu konstanten rheologischen Kennwerten (bestimmt über das Ausbreitmaß) über einen Zeitraum von mehr als 45 Minuten nach dem Mischen. Eine konstante Rheologie ist relevant, damit Proben, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Mischen hergestellt wurden, ein vergleichbares Eindringverhalten aufweisen und somit für die Auswertungen als vergleichbar definiert werden können. Alle Feinkornbetonvarianten werden mit einem flüssigen Fließmittel (FM) (Basis: Polycarboxylatethers, Dichte: 1,06 g/cm³) hergestellt. Das Fließmittel wurde für die kommerzielle Anwendung in Fertigteilwerken entwickelt. Der Rheologie des Feinkornbetons F0 wird hierbei durch Variation der Stabilisiererdosierung (1.ST) sowie Fließmitteldosierung (FM) variiert. Der Feinkornbeton F1 baut auf der F0-Rezeptur auf, jedoch wird hier der Zementgehalt durch Erhöhung des Kalksteinmehlanteils reduziert (Erhöhung Kalksteinmehlanteil (KSM) von 36L auf 100L je m³ Feinkornbeton). Eine Erhöhung des Kalksteinmehlanteils führt zu einer Reduzierung der Zementmenge und damit zu einer Verringerung des CO₂-Fußabdrucks pro m³ Feinkornbeton.

Die Feinkornbetone F2 bis F4 basieren auf der Rezeptur F1, jedoch unter Verwendung des Stabilisierertyps 2.ST, der wie oben beschrieben zu einer konstanten Rheologie führt. Gemäß GL 1 und GL 2 wird ein Einfluss der Rheologie der Feinkornbetone auf das Eindringverhalten erwartet. Zur Untersuchung dieses Einflusses wird die Rheologie der Feinkornbetone F2 bis F4 über den Wasser-zu-Feinstoff-Wert (w/f) variiert, wodurch sich die Wasser- und Zementmengen innerhalb der drei Rezepturen unterscheiden.

Im Zuge der Untersuchungsreihe U7 wurde mit F5 auf einen weiteren Feinkornbeton zurückgegriffen, der bereits im SC3DP-Verfahren verwendet wurde. Der gewählte Feinkornbeton (MC Bauchemie-Müller GmbH & Co. KG) hat mit einem Größtkorn von 2 mm gute Eigenschaften zur Pumpbarkeit und eignet sich daher für Prozesse der additiven Fertigung.

Tabelle 2

Zusammensetzung der Feinkornbetone (F) F0 – F5; n.b. = nicht bestimmt; n.v. = nicht verwendet, (maßgebliche Variationen in der Untersuchungsreihe sind **fettgedruckt**)

Untersuchungsreihe		U1	U2	U3 – U5			U6	U7	U8
Kurzbenennung F-Varianten		F0	F1	F2	F3	F4	-	F5	F4
Portlandzement (CEM I 52,5 R)	[kg/m ³]	600	415	511	453	412	-	500	412
Kalksteinmehl	[kg/m ³]	97	270	270	270	270	-	160	270
Gesteinskörnung, d = 0-3,15 mm	[kg/m ³]	1258	1258	1258	1258	1258	-	1180	1258
Wasser	[kg/m ³]	270	265	248	267	280	-	266	280
Stabilisiererdosierung (ST)	[M.-% v. Z.]	0,0 / 0,05 / 0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	n.v.	0,1
Stabilisierertyp		Typ 1	Typ 1	Typ 2	Typ 2	Typ 2	-	n.v.	Typ 2
Fließmitteldosierung (FM)	[M.-% v. G.]	0,4 / 0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	-	n.v.	0,3
Wasser/Feinstoff-Wert (w/f)	[-]	0,39	0,39	0,32	0,37	0,41	-	0,16	0,41
Sollmaß Ausbreitmaß (ABM)	[mm]	300	270	360	500	560	-	440	560

4.3 Bewehrung

In der Untersuchungsreihe U5 werden mit Bewehrungsstahl oder mit Carbonfasern bewehrte Biegebalken hergestellt und untersucht. Die entsprechenden Kennwerte für die beiden Bewehrungsarten sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Bewehrungsarten besteht darin, dass der Bewehrungsstahl als klassischer starrer Stab eingelegt wird, während die Carbonfasern flexibel verformbar als Faserbündel eingelegt werden. Insbesondere beim Einbau einer neuen Lage von Partikeln werden sich bei Stahlbewehrung die Partikel an die Lage der Bewehrung anpassen, während es bei Carbonfaserbewehrung möglich ist, dass sich die Carbonfaserbewehrung an die umgebenden Partikel anpasst.

Bei dem Bewehrungsstahl handelt es sich um Betonstahl B500 mit einem Durchmesser von 6 mm und einer maximalen Gesamttragfähigkeit (Zugfestigkeit) pro Stab von 15,5 kN. Die Carbonfaserbewehrung besteht aus in Epoxidharz getränkten Faserbündeln, wobei jedes Faserbündel aus 50.000 Einzelfasern (Durchmesser 0,007 mm) besteht und pro Carbonfaserbündel eine maximale Gesamttragfähigkeit (Zugfestigkeit) von 7,3 kN aufweist.

Tabelle 3

Kennwerte der Stahlbewehrung (S) und der Carbonfaserbewehrung (CFK) – eingesetzt in der Untersuchungsreihe U5.

Untersuchungsreihe		Stahlbewehrung	Carbonfaserbewehrung
Kurzbenennung		S	CFK
Durchmesser	[mm]	6	0,007
Anzahl je Faserbündel	[Stk.]	-	50.000
Fläche je Bewehrungsstab/ Faserbündels	[mm ²]	28,3	1,9
Streckgrenze Zugfestigkeit	[N/mm ²]	500 550	- 3800
Gesamttragfähigkeit (Streckgrenze Zugfestigkeit) je Bewehrung/ Faserbündel	[KN]	14,1 15,6	- 7,3

5 Methodisches Vorgehen

5.1 Herstellung der LP3DCP-Proben

Zur Durchführung von LP3DCP-Kampagnen stehen an der TU Braunschweig zwei Versuchseinrichtungen, der „Smart Additive Manufacturing Material Investigator“ (SAMMI) sowie das „Digital Building Fabrication Laboratory“ (DBFL), zur Verfügung. Der wesentliche Unterschied zwischen dem SAMMI und dem DBFL ist dabei die maximal mögliche Baugröße sowie die ansteuerbaren Freiheitsgrade der Spritzdüse. In den beiden Versuchständen lassen sich jedoch gleichwertige LP3DCP-Proben herstellen. Die wesentlichen Merkmale der einzelnen Versuchseinrichtungen sind (vgl. Abbildung 3):

- SAMMI: Besitzt eine x-z-Linearachsen-Einheit, womit sich ein Probenstreifen mit einer Länge von 1,4 m und einer Höhe 0,6 m herstellen lassen. Die maximale horizontale Verfahrgeschwindigkeit (x-Achse) des SAMMIs liegt bei 5.0 m/ min. (Mai et al. 2021)
- DBFL: Ist ein Portalsystem, welches mit zwei 3-achsigen Portalen ausgestattet ist. Auf einem der beiden Portale ist ein 6-achsiger Stäubli TX200-Industrieroboter installiert, an dem die Spritzdüse für das LP3DCP-/SC3DP-Verfahren montiert ist. Auf dem zweiten Portal ist ein 5-achsiger Roboter für integrative Aufgaben installiert. Das DBFL bietet einen Bauraum von bis zu 2,5 m × 5,24 m × 10,52 m (Höhe × Breite × Länge). Die maximale horizontale Verfahrgeschwindigkeit (x-y-Achse) liegt bei 44 m/min und in vertikaler Richtung (z-Achse) bei 20 m/min. (Kloft et al. 2020)



Abbildung 3: Versuchseinrichtungen: (links) SAMMI (Credit: iBMB) und (rechts) DBFL

In beiden Versuchseinrichtungen wird mittels einer Betonpumpe (Mader WM Variojet FU) der Feinkornbeton durch einen Schlauch ($\varnothing = 35$ mm) zu einer Düse gepumpt. An der Düse wird das Material unter Zugabe von Druckluft beschleunigt auf das Partikelbett appliziert.

Das Material wird jeweils als 55 Liter-Charge in einem Zwangsmischer (Mader WM Jetmix 125/180) in einem Zeitraum von 4 Minuten gemischt. In einem ersten Schritt wird das Wasser dem Mischer zugeführt. Danach erfolgt in den ersten 2 Minuten unter ständigem Rühren die Zugabe aller trockenen Komponenten (Zement, Kalksteinmehl, Gesteinskörnung & Stabilisierer). Das Fließmittel wird 1 Minute nach Mischbeginn hinzugegeben. Anschließend wird für weitere 2 Minuten kontinuierlich gemischt. Nach dem Anmischen wird jede Charge mittels des Ausbreitmaßes nach (DIN EN 12350-5:2019) auf dessen Konsistenz geprüft, wobei die Abweichung des Ausbreitmaßes im Bereich von ± 20 mm zum Sollmaß liegen soll. Das Sollmaß variiert in Abhängigkeit der Feinkornbetone F0 bis F4 entsprechend der Tabelle 2.

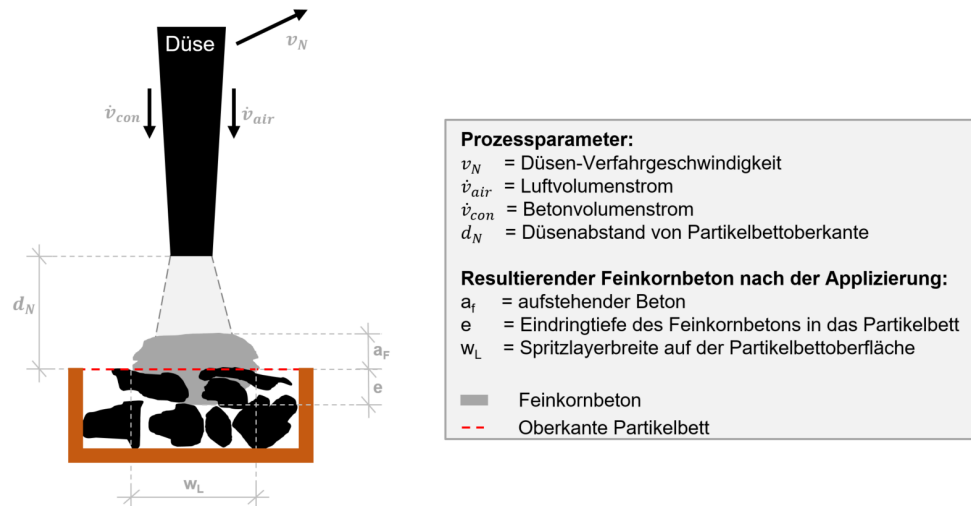


Abbildung 4: Feinkornbetonapplizierung auf ein Partikelbett mit dem Shotcrete-3D-Printing-Verfahren: Einflussnehmende Prozessparameter und resultierender Feinkornbeton auf und in dem Partikelbett nach der Applizierung.

Grundsätzlich können im LP3DCP-Druckprozess neben dem Luftvolumenstrom \dot{v}_{air} weitere Prozessparameter wie der Betonvolumenstrom \dot{v}_{con} , der Düsenabstand zum Partikelbett d_N sowie die Düsen-Verfahrgeschwindigkeit v_N variiert werden (vgl. Abbildung 4). Insbesondere das Verhältnis aus Luft- zu Betonvolumenstrom stellt eine wichtige Interaktion im SC3DP-Prozess dar, da die Betonpartikel mittels des Luftvolumenstroms an der Düse beschleunigt wird. Ein zunehmender Luftvolumenstrom (oder abnehmender Betonvolumenstrom) führt dazu, dass mehr Luft zur Beschleunigung der Betonmasse zur Verfügung steht. Entsprechend geht ein zunehmender Luftvolumenstrom mit einer Zunahme der kinetischen Energie der einzelnen „Betonpartikel“ einher. Die Materialparameter werden bisher ausschließlich über die eigentliche Rezeptur (vgl. Abs. 3.2: Stabilisier- & Fließmitteldosierung, Wasser) bestimmt und sind nicht direkt über die Steuerung im Prozess kontrollierbar. Während der Applikation des Feinkornbetons wird in Abhängigkeit der gewählten Prozessparameter eine spezifische Spritzlayerbreite w_L erzielt (vgl. Abbildung 4). Dabei kann in Abhängigkeit der Rheologie des Feinkornbetons (vgl. Abbildung 2) der Feinkornbeton zum Teil auf der Partikelbettoberkante aufliegen, teilweise oder vollständig eindringen (vgl. Abbildung 4 – aufstehender Feinkornbeton a_f und Eindringtiefe e).

Für einen guten Verbund zwischen den Schichten sowie der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird immer die Menge an Feinkornbeton aufgebracht, sodass nach dem Eindringprozess der gesamte Porenraum zwischen der Gesteinskörnung gefüllt wird (vgl. Abbildung 3(a) und (b)). Dies kann durch die Düsen-Verfahrgeschwindigkeit v_N gesteuert werden und berechnet sich in Abhängigkeit des im Prozess vorliegenden Betonvolumenstroms \dot{v}_{con} , der tatsächlich vorliegenden Spritzlayerbreite w_L , der Layerhöhe h_L und der Packungsdichte φ_s (vgl. GL 3) (Mai et al. 2021):

$$v_N = \frac{\dot{v}_{con}}{w_L h_L (1 - \varphi_s)} \quad \text{GL 3}$$

Der Betonvolumenstrom \dot{v}_{con} wird entsprechend den Anforderungen direkt über die Steuerungseinheit eingestellt und wird zusätzlich über „Auslitern“ vor dem eigentlichen Versuchsstart überprüft. In Abhängigkeit der gewählten Material- & Prozessparameter stellen sich unterschiedliche Layerbreiten w_L ein, welche vor jeder Probenherstellung an Probepritzstreifen überprüft und gemessen werden (Böhler et al. 2022). Es wird direkt auf das entsprechende Partikelbett gespritzt, um dort die Spritzlayerbreite w_L zu ermitteln (vgl. Abbildung 3). Die Spritzlayerbreite w_L kann dabei von den gewählten Material- und Prozessparametern wie bspw. Materialzusammensetzung, Partikelbettart sowie Luft- und Betonvolumenstrom abhängen. Die Layerhöhe h_L ergibt sich aus dem Größtkorn d_{max} des Partikelbetts,

daher $h_L = d_{max}$. Die Packungsdichte φ_s wird anhand eines über mehrere Lagen aufgeschichteten Partikelbetts (entspricht einer lockeren Lagerung) ermittelt.

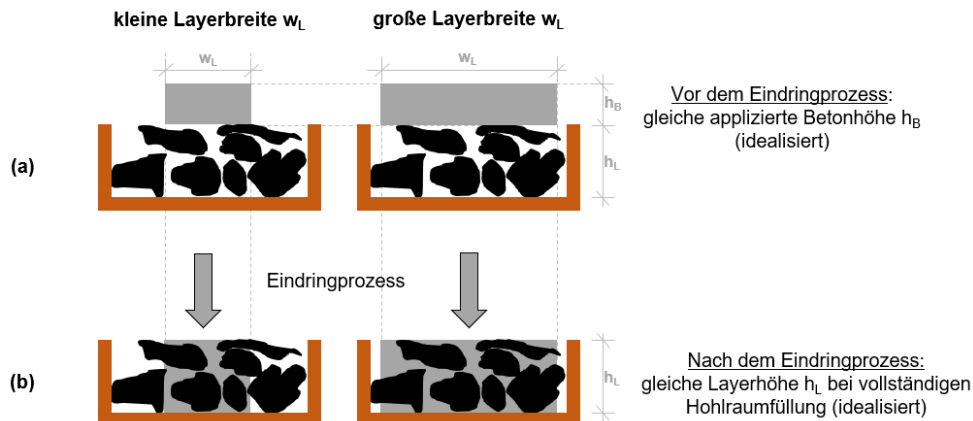


Abbildung 5: Schematische Darstellung der aufzubringende Betonmenge: 1. Layerbreite w_L ergibt sich aus der Wahl der Material- und Prozessparameter. 2. Berechnung der Verfahrensgeschwindigkeit der Düse so, dass (a) vor dem Eindringprozess immer so viel Beton appliziert wird, dass (b) nach dem Eindringprozess die Hohlräume zwischen dem Partikelbett vollständig gefüllt sind.

Für das Partikelbett stehen Bauboxen mit einer Grundfläche $200 \times 1000 \text{ mm}^2$ zur Verfügung (vgl. Abbildung 4). Entsprechend des Größtkorns der hier verwendeten Partikelbetten können die Schichten mit einer Layerhöhe h_L von 32 oder 63 mm eingebaut werden. Vor Beginn eines Versuchs wird für jede Schicht die passende Menge an Partikeln entsprechend der Schüttdichte abgewogen und in Gefäßen bereitgestellt. Der Einbau der Partikel erfolgt händisch durch Aufschütten und homogenes Verteilen der Partikel auf die vorherige Schicht. Anschließend werden die Partikel mit leichtem händischem Druck in die vorherige Feinkornbetonschicht gedrückt, sodass sie mit der Schichtoberkante bündig abschließen. Das Material wird mit einem konstanten Düsenabstand d_N zur Partikelbettoberfläche von 200 mm aufgetragen. In abwechselnder Reihenfolge erfolgt nun der Einbau des Partikelbetts und das Aufbringen des Feinkornbetons. Mit der Baubox können in Abhängigkeit der Layerhöhe h_L jeweils sechs (Größtkorn bis 32 mm) oder drei (Größtkorn bis 63 mm) Schichten aufgebracht werden.

Nach Herstellung der Proben verbleiben diese für ca. einen Tag im Versuchsraum am DBFL (keine definierten klimatischen Bedingungen) und werden dann bis zu weiterführenden Verarbeitungen und Prüfungen unter 20°C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit eingelagert.

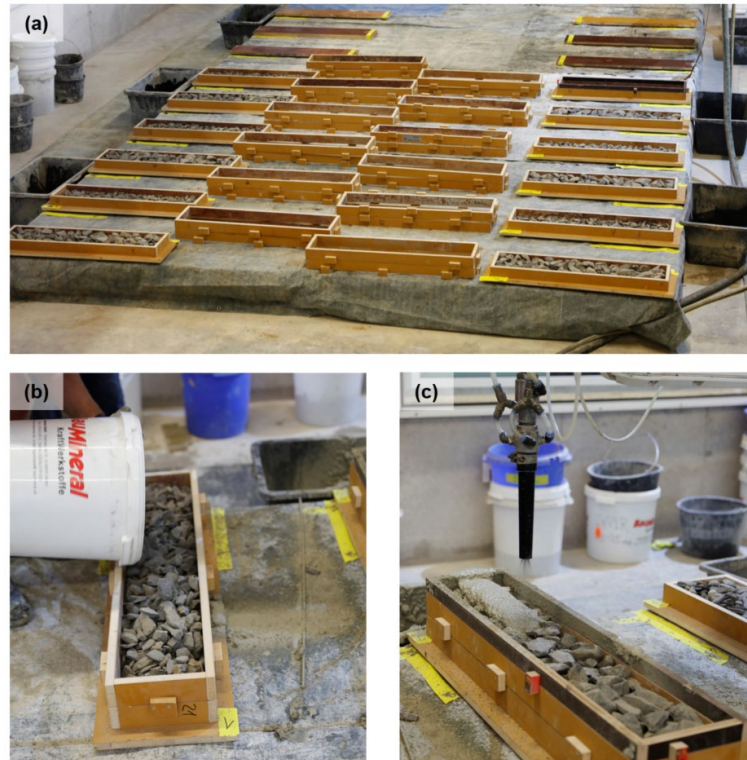


Abbildung 6: Herstellung der Probe der Untersuchungsreihe U2 (DBFL): (a) Bauboxen sowie mitwachsende Schalung (b) Aufbringen der Gesteinskornschicht (c) Applizierung des Feinkornbetons

5.2 Ablauf der Untersuchungsreihen

Im folgenden Abschnitt wird der Ablauf der einzelnen Untersuchungsreihen erläutert. In Tabelle 4 ist eine Übersicht über die wesentlichen Variationen der Prozess- und Materialparameter in Abhängigkeit der Untersuchungsreihen gezeigt. Die innerhalb der Untersuchungsreihen angewendeten Prüfmethoden können dem Abschnitt 4.4 sowie der Tabelle 5 entnommen werden. Die in Tabelle 4 dargestellten Prozessparameter Betonvolumenstrom \dot{V}_{con} , Luftvolumenstrom \dot{V}_{air} und Düsenabstand d_N wurden entsprechend dem typischen Anwendungsfenster sowie -grenze der Prozessparameter innerhalb des SC3DP-Prozesses ausgewählt. In diesen Prozessparameterbereichen und -grenzen konnten innerhalb des SC3DP-Prozesses gute geometrische Abmessungen sowie Festbetoneigenschaften erzielt werden. Die Verfahrensgeschwindigkeit v_d ergibt sich aus der Anwendung der Gleichung GL 3. In den nachfolgenden Abschnitten werden die gewählten Prozessparameter wie folgt verkürzt angegeben: Erst wird der Prozessparameter (Betonvolumenstrom \dot{V}_{con} (con) oder Luftvolumenstrom \dot{V}_{air} (air)) und danach die gewählte Volumengröße definiert. So steht beispielsweise die Angabe con0,8 für einen Betonvolumenstrom \dot{V}_{con} von 0,8 m³/h.

Tabelle 4

Übersicht der wichtigsten Variation der Prozess- & Materialparameter (Feinkornbeton (FKB), Partikelbett (PB)) in Abhängigkeit der Untersuchungsreihen U1 – U8 (maßgebliche Variationen in der Untersuchungsreihe sind **fettgedruckt**)

Untersuchungsreihe (U)		U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8
mit Fokus		Rheologie	Prozess- para- meter	Rheologie & Prozess- parameter	Erhöhte FKB- Menge	Biege- prüfung	Partikel- beschi- ckung	Demons- trator	Geomet. Frei- heiten
Prozessparameter									
Betonvol.-strom \dot{V}_{con}	m ³ /h	0,8	0,6 / 1,3	0,8 / 1,0	1,0	0,8	-	0,6	0,8
Luftvolu.-strom \dot{V}_{air}	m ³ /h	45	30 / 40	30 / 50	50	30	-	30	30
Düsenabstand d_N	cm	20	20	30	30	30	-	20	30
Verfahrensgeschw. v_d		GL 3	GL 3	GL 3	abweichend	GL 3	-	abweichend	GL 3
Materialparameter									
Benennung		F0	F1	F2 – F4	F4	F4	-	F5	F4
Stabilisiererdos.	M.-% v. Z.	0,0/0,05/0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	n.b.	0,1
Stabilisierertyp (ST)		1.ST	1.ST	2.ST	2.ST	2.ST	-	n.b.	2.ST
Fließmittel (FM)	M.-% v. G.	0,4/0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	-	n.b.	0,3
Wasser/Feinstoff	[-]	0,39	0,39	0,41/0,37 / 0,32	0,41	0,41	-	0,16	0,41
Materialparameter									
Benennung		A / B	C / D	E / F & G	F	F	F	A	F
Partikelart		Rezyklat	Basalt	Kalkstein & Rezyklat	Kalk- stein	Kalk- stein	Kalk- stein	Rezy- klat 16-32	Kalk- stein
Korngruppe	mm	16-32 / 4-32	16-32 / 32-63	8-32 / 16- 32	16-32	16-32	16-32		16-32

Tabelle 5

Übersicht der durchgeführten Untersuchungen in den Untersuchungsreihen U1 – U8 (Feinkornbeton (FKB))

Untersuchungsreihe (U)	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8
mit Fokus	Rheologie	Prozessparameter	Rheologie & Prozessparameter	Erhöhte FKB-Menge	Biegeprüfung	Partikelbeschickung	Demonstrator	Geometrische Freiheitsgrade
Rheologie	✓	-	✓	✓	✓	-	-	-
Geometrie	✓	-	✓	✓	-	-	✓	✓
Gefügeuntersuchung	✓	-	✓	✓	✓	✓		✓
Druckfestigkeit:								
LP3DCP-Proben	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-
Konventionelle Referenzen	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-
Eindringverhalten	-	-	✓	✓	-	-	-	✓
Großformatige Biegebalkenprüfung	-	-	-	-	✓	-	-	-

Untersuchungsreihe U1 – Einfluss aus veränderlicher Feinkornbetonrheologie:

In der Untersuchungsreihe U1 wird der Einfluss aus veränderlichen Materialparametern (vgl. Tabelle 4) und somit variierenden rheologischen Eigenschaften auf Laborebene untersucht. Hierfür wird die Feinkornbetonrezeptur F0 verwendet und dabei systematisch die Stabilisierer- (0,0; 0,05 und 0,1 M.-% des Zementgehalts) sowie die Fließmitteldosierung (0,4 und 0,5 M.-% der Gesamtmasse) variiert. Dies führt zu sechs sich in der Rheologie unterscheidenden Feinkornbetonen, welche auf die beiden Partikelbettvarianten Rezyklat A (Rez16-32) und B (Rez4-32) aufgespritzt werden. Die Herstellung erfolgt an der Versuchseinrichtung SAMMI unter Berücksichtigung der Berechnung der Verfahrgeschwindigkeit nach Gleichung 3. Die rheologischen Kennwerte der F0-Rezeptur werden mittels dem Viskomat XL charakterisiert (Abs. 4.3). Entsprechend der Abbildung 7 werden immer 6 Layer hergestellt. Für jede Probenkombination wird ein Bohrkern für die Gefügeuntersuchung sowie Würfel zur Untersuchung der Druckfestigkeit entnommen. Die Würfel werden dabei mittig im Querschnitt sowie mit einer Zwischenschicht in der Mitte des Würfels angeordnet und entnommen (vgl. Abbildung 7 - Querschnitt). Zudem wird die geometrische Präzision der Proben nach dem Ausgraben aus der Baubox ermittelt. (Mai et al. 2021)

Für die Herstellung der konventionell gefertigten Referenz-Proben (REF) wird der reine Feinkornbeton direkt aus dem Schlauch des SC3DP-Setups in eine 15er-Würfelschalung gepumpt (daher $\dot{V}_{air} = 0 \text{ m}^3/\text{h}$) und verdichtet. Nachfolgend wird mittig aus dem 15er-Würfel die tatsächliche Probe mit einer Kantenlänge von 10 cm herausgesägt.

der Ergebnisse auch dann möglich ist, wenn in der großmaßstäblichen DBFL-Versuchsanlage prozessbedingte Wartezeiten entstehen. Die Konsistenz der Varianten F2 – F4 (zäher – fließfähiger) wird über den Wasser- zu Feinstoffanteil gesteuert, wohingegen die Stabilisierer- sowie Fließmitteldosierung in dieser Untersuchungsreihe konstant gehalten werden. Die rheologische Charakterisierung erfolgt mittels dem ICAR Plus Rheometer. Zusätzlich werden die Feinkornbetone nach dem Aufspritzen mittels der Penetrationswiderstandsmessung charakterisiert (initiale Fließgrenze sowie Strukturaufbau über die Zeit).

Die Erfahrungen mit dem Basalt-Partikelbett der Untersuchungsreihe U2 (sehr schwer zu sägen; plattige Kornform) führt dazu, dass in der Untersuchungsreihe U3 leichter zu sägende Kalkstein-Partikelbetten E und F (KS8-32 und KS16-32) sowie Rezyklat-Partikelbett G (Rez16-32) eingesetzt werden. Für diese Partikelbetten werden neben der Rohdichte, Packungsdichte und Porosität zudem auch die Sieblinien, die Kornform sowie die Wasseraufnahme charakterisiert.

Im Allgemeinen werden die Partikelbetten, wie vom Steinbruch geliefert, ohne weitere Behandlungen eingesetzt. Für weiterführende Untersuchungen wird für eine Probenkombination die Oberfläche des Partikelbetts KS16-32 angefeuchtet, um die Situation nachzustellen, wenn die rezyklierten Partikelbetten auf einer Baustelle bewittert gelagert werden. Wichtig hierbei ist, dass die auf der Gesteinskörnung aufliegende Staubschicht während der Befeuchtung nicht abgewaschen wird. Hierfür wird die Gesteinskörnung mittels einer Sprühflasche unter permanentem Mischen in einem Eimermischer so lange besprüht, bis die Oberfläche inkl. Staubschicht vollständig befeuchtet ist.

Die Herstellung der Proben erfolgt an der großmaßstäblichen Versuchseinrichtung DBFL unter Berücksichtigung der Berechnung der Verfahrensgeschwindigkeit nach GL 3. Zur Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter werden der Betonvolumenstrom \dot{V}_{con} (0,8 und 1,0 m³/h) und Luftvolumenstrom \dot{V}_{air} (30 und 50 m³/h) systematisch variiert. Entsprechend der Abbildung 9 werden für alle Probenkombinationen immer 6 Layer hergestellt. Für jede Probenkombination werden Würfel zur Untersuchung der Druckfestigkeit entnommen. Wie zuvor erfolgt die Anordnung der Würfel dabei mittig im Querschnitt sowie mit der Zwischenschicht in der Mitte des Würfels. Außerdem wird für jede Probenkombination die querschnittsbezogene Verbundqualität sowie die Spritzlayerbreite des Feinkornbetons auf der Partikeloberfläche ermittelt.

Zur Untersuchung des Eindringverhaltens wird entsprechend der Abbildung 9 nur der oberste Layer hergestellt, sodass der eindringende Feinkornbeton sich frei im Partikelbett ausbreiten kann. Danach werden die Proben in Druckrichtung mittig halbiert und den aufstehenden Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche sowie die Eindringtiefe e des Feinkornbetons in das Partikelbett ermittelt (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 22).

Für die Herstellung der konventionell hergestellten Referenz-Proben (REF) werden wie zuvor sowohl a) Würfel mit reinem Feinkornbeton sowie b) Würfel mit Feinkornbeton und Partikel hergestellt. Der Feinkornbeton wird hier direkt aus dem Zwangsmischer entnommen und bei den REF-Proben mit nur Feinkornbeton direkt in die 15er-Würfelschalung eingebracht und verdichtet. Für die REF-Proben, bestehend aus Feinkornbeton und Partikel wird der Feinkornbeton mit dem entsprechenden Partikelbett in einem Eimermischer vorab vermischt und danach auch in 15er-Würfelschalung eingebracht sowie verdichtet. Die REF-Proben werden unter Einhaltung des gleichen Volumenverhältnisses von Feinkornbeton zu Partikel wie beim LP3DCP-Prozess hergestellt. Nach der Erhärtung werden alle REF-Proben mittig aus dem 15er-Würfel auf die tatsächliche Kantenlänge von 10 cm zugesägt.

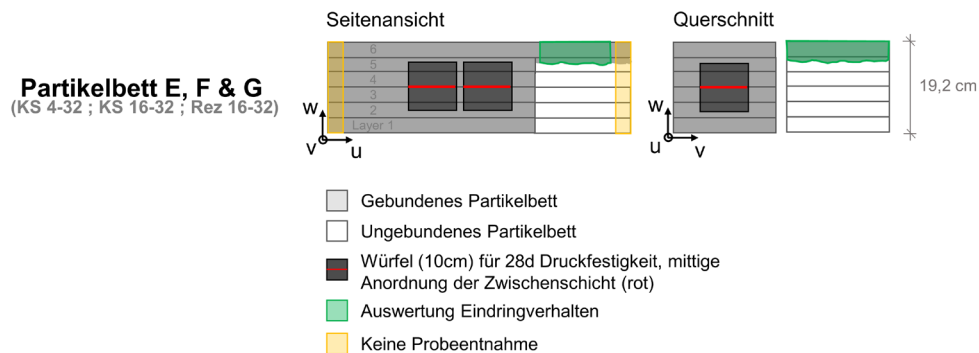


Abbildung 9: Prinzip der Probenahme aus den Spritzstreifen der Untersuchungsreihe U3 für das Partikelbett E, F und G mit einer Layerhöhe von jeweils 3,2 cm, Gesamthöhe von 19,2 cm. Koordinatenrichtung u = Druckrichtung = Länge von 100 cm.

Untersuchungsreihe U4 – Einfluss aus erhöhtem Auftrag der Feinkornbetonmenge

Zur Untersuchung des Einflusses von einem erhöhten Auftrag von Feinkornbeton wird in der Untersuchungsreihe U4 von der Gleichung 3 abgewichen und die Verfahrgeschwindigkeit im Vergleich zu Verfahrgeschwindigkeit nach Gleichung 3 auf 70 % reduziert (was mit einer um 43 % höheren applizierten Betonmenge korrespondiert). Die Herstellung und Verarbeitung der Probe erfolgt ansonsten entsprechend der Untersuchungsreihe U3 (vgl. Abbildung 9) mit einem Betonvolumenstrom $\dot{V}_{con} = 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ und Luftvolumenstrom $\dot{V}_{air} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ und dem Kalkstein-Partikelbett F (KS16-32).

Untersuchungsreihe U5 – Untersuchung von Konzepten zur Bewehrungsintegration

In der Untersuchungsreihe U5 wird das Tragverhalten von konventionell sowie mittels des LP3DCP-Verfahrens hergestellten großformatigen Biegebalken untersucht. Zur Untersuchung der LP3DCP-Biegezugfestigkeit werden insgesamt sieben Biegebalken am DBFL hergestellt. Die Herstellung erfolgt für alle Proben unter konstanten Prozessparametern ($\dot{V}_{air} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$; $\dot{V}_{con} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$) mit dem Feinkornbeton F4. Es werden unbewehrte Proben mit den Partikelbetten E, F und G (KS8-32; KS16-32; Rez16-32) sowie bewehrte Biegebalken nur mit dem Partikelbett F (KS 16-32) angefertigt. Die bewehrten Biegebalken unterscheiden sich dabei in der Bewehrungsart sowie in der Einlegereihenfolge. Als Bewehrungsarten werden $2 \times 6 \text{ mm}$ -Bewehrungsstahl (S) und $2 \times$ Kohlefaserbündelstränge (CFK) eingesetzt (vgl. Abbildung 10). Der mittlere Abstand zwischen den beiden Bewehrungssträngen beträgt 60 mm. Zudem wird die Einlegereihenfolge der Bewehrung variiert (1. Partikelbett, 2. Bewehrung, 3. Feinkornbeton (PB-B-FKB) oder 1. Partikelbett, 2. Feinkornbeton, 3. Bewehrung (PB-FKB-B)). Nach der Erhärtung werden mittig aus dem Querschnitt die Biegebalken mit einer Abmessung von $15 \times 15 \times 70 \text{ cm}^3$ ($b \times h \times l$) herausgesägt.

Die Untersuchung der konventionell hergestellten Referenz-Biegebalken (REF) erfolgt insgesamt an neun Biegebalken, welche direkt in klassischen Stahlschalungen mit einer Abmessung von $15 \times 15 \times 70 \text{ cm}^3$ ($b \times h \times l$) hergestellt werden. Analog zu den LP3DCP-Proben werden auch die REF-Proben mit der Feinkornbetonvariante F4 hergestellt. Auch hier werden unbewehrte sowie bewehrte Proben mit den Partikelbetten E, F und G (KS 8-32; KS 16-32; Rez 16-32) angefertigt. Die bewehrte Biegebalken unterscheiden sich analog zu den LP3DCP-Proben in der Bewehrungsart ($2 \times 6 \text{ mm}$ -Bewehrungsstahl (S) und $2 \times$ Kohlefaserbündelstränge (CFK) sowie Abstand zwischen den beiden Bewehrungssträngen = 60 mm, vgl. Abbildung 10(a)). Die Bewehrung wird mit Abstandshalter zuvor in der Stahlschalung fixiert. Der Feinkornbeton (direkt aus dem Zwangsmischer) sowie die Partikelbetten werden als 10 kg-Batches in einem Eimermischer vorgemischt und danach in die Schalung schichtweise eingebaut und verdichtet. Dabei soll das gleiche Volumenverhältnis von Feinkornbeton zu Partikel wie beim LP3DCP-Prozess (analog zu den Würfeldruckfestigkeitsproben) verwendet werden. Für die Partikelbetten F und G (KS 16-32; Rez 16-32) erwies sich das Mischen und Verarbeiten aber als äußerst schwierig, sodass bei diesen Proben der Feinkornbetonanteil um ca. 8 % beziehungsweise 4 % erhöht werden musste.

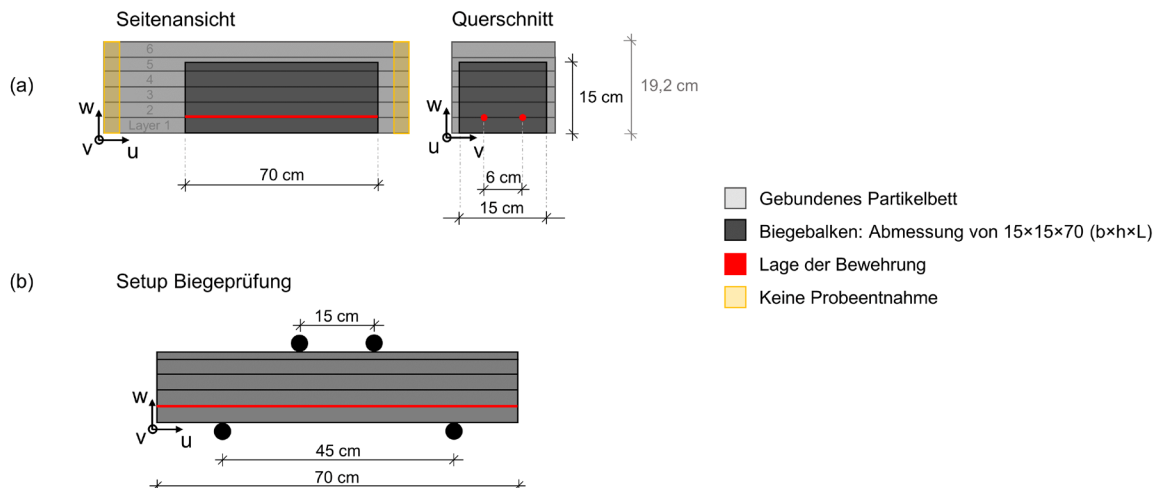


Abbildung 10: Biegebalken: a) Prinzip der Probenahme aus den Spritzstreifen sowie (b) Setup zur Vierpunktbiegeprüfung der Biegebalken (gültig sowohl für konventionell (REF) wie auch mittels des SC3DP-Verfahrens hergestellte Biegebalken). Koordinatenrichtung u = Druckrichtung.

Untersuchungsreihe U6 – Untersuchung der automatisierten Ausbringung von Partikeln

Der bisherige Workflow bei der Erstellung von Probekörpern oder Geometrien ist stark abhängig von händischen Arbeitsschritten, so werden Aggregate manuell innerhalb der Schalung ausgelegt und verteilt, bis die angestrebte Layerhöhe besteht und Feinkornbeton appliziert werden kann. Dieser Ablauf ist auf einen kleineren Arbeitsbereich beschränkt, da Schalungen eine gewisse Größe nicht überschreiten können, da ansonsten eine händische Bearbeitung nicht mehr möglich wäre. Mit Blick auf eine mögliche industrielle Nutzung des LP3DCP-Verfahrens und einer Bearbeitung von Schalungsgrößen jenseits der 1m x 1m ist die automatisierte Auslegung von Aggregaten ein essenzieller Bestandteil eines zukünftigen LP3DCP-Verfahrens. Da zeitgleich zur automatisierten Ausbringung der Partikel ebenfalls Untersuchungen zu modularen Schalungsmethoden durchgeführt wurden, muss die Ausbringungsmethodik auf unterschiedliche Größenordnungen und Methodiken der Schalung reagieren können.

Die Produktionsstätte an der TU Braunschweig verfügt über einen Versuchsraum mit zwei Portalen. Portal 1 verfügt über fünf Achsen und wird vornehmlich für Fräsarbeiten genutzt. Portal 2, ein Stäubli TX200 mit 6 Achsen, wird vornehmlich für das Aufbringen des Feinkornbetons mittels Shotcrete-Methode genutzt.

Für die zunehmende Automatisierung wird Portal 1 in den Versuchsablauf des LP3DCP eingebunden, um die Ausbringung und Verteilung der Partikel innerhalb der Schalung zu ermöglichen. Hierzu kommt Portal 1 zum Einsatz und verteilt Partikel in Abhängigkeit der gewählten Gesteinskörnung.

In der ersten Versuchsreihe wird die Verteilung der Partikel untersucht, hierfür wird ein Bereich von 1,50m x 1,00m definiert mit dem Ziel, eine gleichmäßige Verteilung der Partikel in Schichthöhe in Abhängigkeit der Korngröße zu erreichen. Getestet wird eine rezyklierte Gesteinskörnung von 16mm-32mm. Für die Testreihe wird 39,6kg der rezyklierten Gesteinskörnung in unterschiedlichen Geschwindigkeiten sowie Abständen des Tools zum Partikelbett gegenübergestellt.

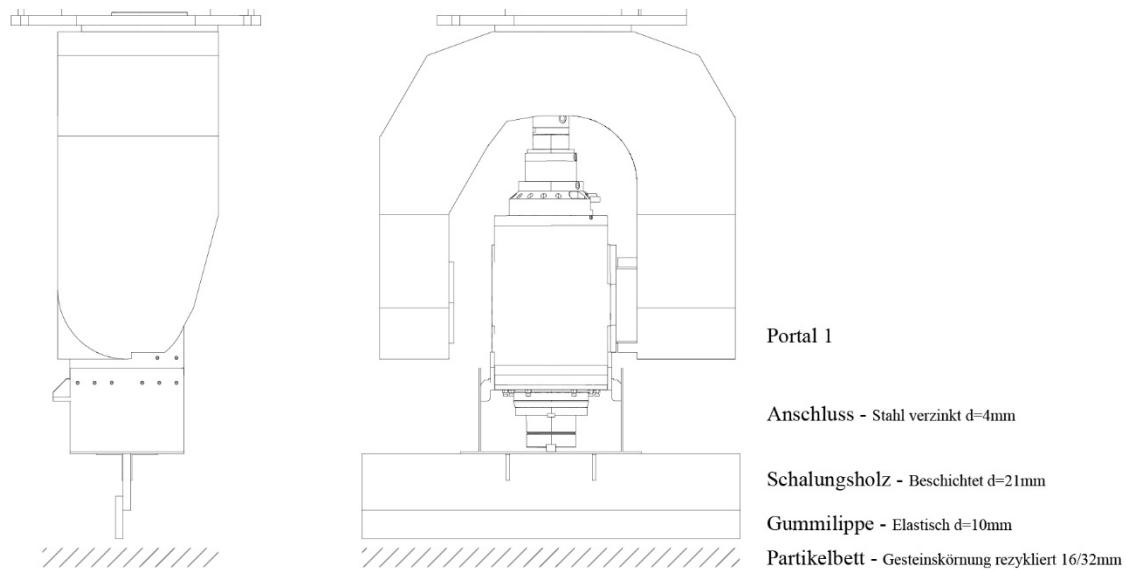


Abbildung 11: Verteilungstool

In einer zweiten Versuchsreihe wird das Prinzip der Ausbringung mit dem vorangegangenen Versuch der Verteilung kombiniert. Ziel ist es, mit einem Tool die Arbeitsschritte des Einlegens und Verteilens zu ermöglichen. Untersucht werden hierbei ebenfalls Abstände von Partikelbett zum Tool an Portal 1 sowie Verfahrensgeschwindigkeiten der robotischen Einheit.

Zunächst werden die Partikel manuell eingelegt und über das in Abbildung 11 gezeigte Verteilungstool verteilt. Die Menge von 39,6kg Gesteinskörnung wird durch die Größe der Schalung sowie die Rohdichte der Gesteinskörnung ermittelt. Ziel ist es, über das Portal 1 die Gesteinskörnung von Seite A zu Seite B zu transportieren und gleichzeitig ein homogenes Verteilungsbild in Schichthöhe zu erreichen. Da das in Abbildung 11 gezeigte Tool über eine elastische Gummilippe verfügt, die während des Schiebeprozesses nachgibt, ist der Abstand des Tools zum Partikelbett Gegenstand der Untersuchung. Zusätzlich zum Abstand des Tools zum Partikelbett wird die Verfahrensgeschwindigkeit als Parameter untersucht, mit dem Ziel, Interlayerzeiten zwischen den Feinkornapplikationen möglichst gering zu halten, da ein Verbund der einzelnen Schichten zueinander unter Umständen gefährdet sein könnte.

Untersucht wird über neun Durchgänge hinweg die Geschwindigkeit des Portals sowie die Entfernung des Tools zum Partikelbett. Ziel ist es, eine homogene Schicht der Gesteinskörnung auszulegen, ohne dabei Leerstellen oder Häufungen von Partikeln zu erhalten und gleichzeitig eine möglichst hohe Verfahrensgeschwindigkeit zu erreichen, um Interlayerzeiten zwischen zu druckenden Schichten möglichst kurz zu halten. Als Ausgangshypothese wird davon ausgegangen, dass eine Entfernung des Tools zum Partikelbett von 32mm ideal ist, da somit die Entfernung des Tools deckungsgleich mit der hier verwendeten Korngröße der Partikel wäre. Vorstudien haben gezeigt, dass eine elastische Komponente am Tool notwendig ist, da ansonsten die Partikel dazu neigen, sich ineinander zu verzahnen und dadurch stärker zu einer Leerstellenbildung neigen. Verwendet wird eine rezyklierte Gesteinskörnung mit einer Größe von 16-32mm und einer Rohdichte von 1258 kg/m^3 somit konnte ermittelt werden, dass bei einer Schalungsgröße von $1,00 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$ ein Gewicht von 39,6 kg notwendig ist, um für einen Layer Gesteinskörnung flächendeckend auslegen zu können.

In einer zweiten Versuchsreihe wird das Prinzip der Ausbringung mit dem vorangegangenen Versuch der Verteilung kombiniert. Ziel ist es, mit einem Tool die Arbeitsschritte des Einlegens und Verteilens zu ermöglichen.

Wie in Abbildung 12 zu sehen ist, wird ein Beschickungskorb genutzt, welcher eine vordefinierte Menge an Partikeln unterschiedlicher Korngröße halten kann. Zusätzlich dazu kann die geladene Menge durch Steuerung des 2-Wege Luftventils punktgenau geöffnet werden, sodass der Transport von Partikeln in die Schalung gewährleistet ist. Der Beschickungskorb verfügt ebenfalls über eine elastische Gummilippe am unteren Ende des Korbes und soll die Gesteinskörnung ähnlich wie in Versuchsreihe 1 über eine vordefinierte Länge von 1m gleichmäßig verteilen. Um eine Vergleichbarkeit der beiden Versuchsreihen zu garantieren, werden ebenfalls 39,6kg der Gesteinskörnung von 16-32mm genutzt. Zusätzlich werden deutlich höhere Verfahrensgeschwindigkeiten eingeführt, um mögliche negative Effekte auf das Ablagebild sichtbar zu machen.

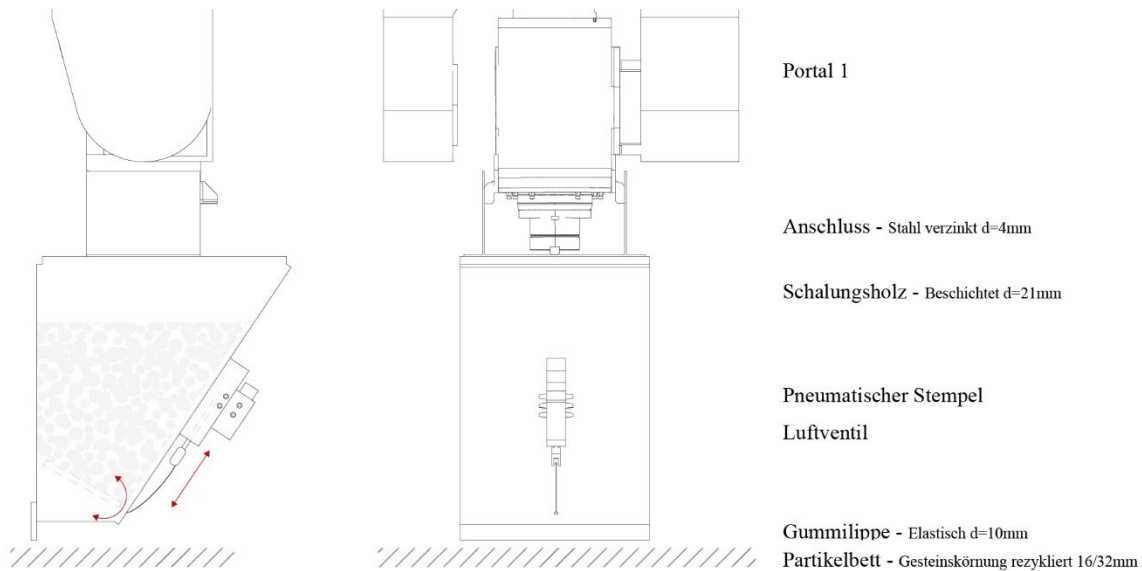


Abbildung 12: Beschickungskorb am Portal 1

Untersuchungsreihe U7 – Untersuchung großformatiger Geometrien

Ausgehend vom Forschungsauftrag des LP3DCP und dem Wunsch eines Demonstrators wurde im Frühjahr 2023 ein Seminar mit dem Schwerpunkt Large Particle 3D Concrete Printing zusammen mit Studierenden veranstaltet. Die Studierenden wurden dabei in die Technik des LP3DCP eingeführt und konnten erste eigene Versuche unter Anleitung des ITE durchführen. Ziel des Seminars war es, einen gemeinsamen Demonstrator zu entwickeln und offene Forschungsfragen zu adressieren, diese wurden zunächst definiert und dann in Kleingruppen weiterbearbeitet. Die Schwerpunkt Themen innerhalb des Seminars beinhalteten:

1. Materialität / Oberflächenbearbeitung
2. Integration von Bewehrung
3. Schalungsdesign

Zusätzlich zu den Forschungsfragen wurde das Design in einem iterativen Prozess gemeinsam mit den Studierenden entwickelt und während einer gemeinsamen Produktionskampagne realisiert. Die Studierenden wurden dabei während des Semesters begleitet und Forschungsfragen präzisiert.

Ein Problem der selektiv bindenden Druckmethoden ist das Einfangen ungebundener Partikel, so werden Aggregate innerhalb einer geschlossenen Form eingeschlossen, ohne dabei durch Feinkornbeton gebunden zu werden. Diese Partikel tragen zu einem hohen Eigengewicht bei, ohne strukturelle Vorteile einzubringen. Um das Eigengewicht möglichst zu verringern, wird versucht, eine weitere Art der

Aggregate einzuführen, so soll der Kern des Demonstrators aus Blähton bestehen. Dadurch ist die stützende Funktion des Partikelbetts gegeben, ohne strukturelle Abstriche machen zu müssen.

Abgeleitet von den Anforderungen an den Demonstrator und den vorangegangenen Schwerpunktthemen der Studierenden werden neue Strategien in den Druckprozess mit eingebunden, die zuvor nicht zu tragen gekommen sind. So soll in der Untersuchungsreihe U7 eine Alternative zu der bisher verwendeten Holzlattenschalung erprobt werden, da sich die Holzlatten gut für die Verarbeitung kleinerer Proben eignen, aber bei einer großen Masse an Aggregaten deutliche Verformungen aufweisen (Ausbeulen der Schalung). Um dem entgegenzuwirken, wurde in der Vorarbeit zusammen mit den Studierenden das Potenzial von Schalungssteinen erörtert und als passend für das LP3DCP-Verfahren bewertet.

Um das angestrebte Design realisieren zu können, werden drei Schalungen aufgebaut, die jeweils ein Einzelmodul des späteren Demonstrators beinhalten sollen. Nach der Aushärtungszeit werden die Objekte ausgeschalt und an den vorab definierten Flächen abgefräst, bevor sie im finalen Schritt durch die angelegten Leerrohre miteinander verbunden werden können.

Untersuchungsreihe U8 – Untersuchung geometrischer Freiheitsgrade

In der Untersuchungsreihe U8 wird der erweiterte geometrische Freiheitsgrad experimentell untersucht. Im ersten Schritt liegt der Fokus auf einem einfachen linearen Anstieg. So werden drei Proben mit einem Anstiegswinkel von 30°, 50° und 70° gedruckt, mit dem Ziel, Auskragungen und Überhänge zu erzeugen.

Im darauffolgenden Schritt werden drei Proben mit einem Bogenmotiv gedruckt, Schwerpunkt hierbei liegt auf der Ermittlung von sinnvollen Auflösungen für einen angestrebten Detaillierungsgrad. Das hier verwendete Bogenmotiv wird über drei Proben hinweg jeweils mit ansteigender Schichtanzahl gedruckt. Die erste Probe wird mit vier Schichten gedruckt, Probe zwei mit sechs und Probe drei mit acht. Die anzunehmenden Geometrien sind in Abbildung 13 zu sehen, hierbei wird für beide Probegruppen eine Schichtbreite von 12cm sowie eine Schichthöhe von 32mm angenommen, abgeleitet aus der verwendeten Korngröße der Partikel von 8-32mm.

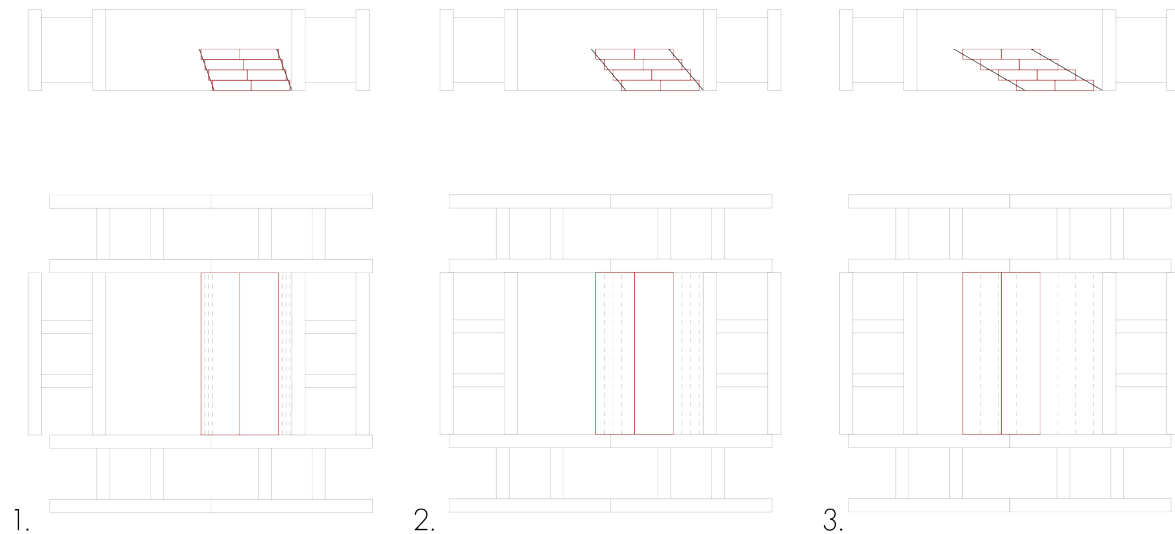


Abbildung 13: Anstiegswinkel der linearen Proben; in rot markiert angenommene Layer und die daraus resultierende Auflösung

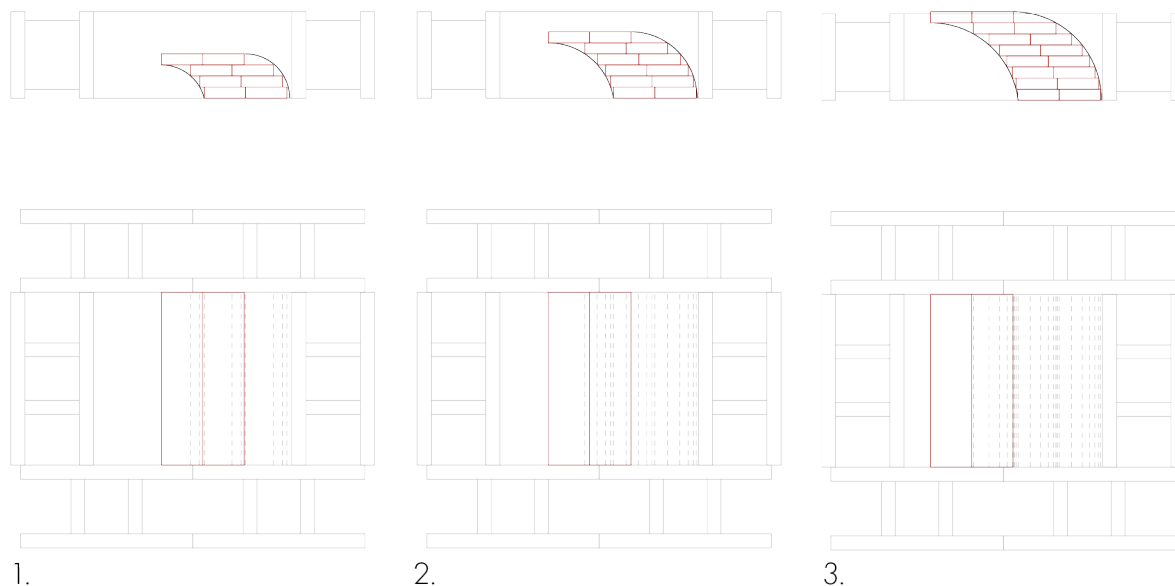


Abbildung 14: Verlauf Bogenmotiv; in rot markiert angenommene Layer und die daraus resultierende Auflösung

5.3 Untersuchungsmethoden

Im folgenden Abschnitt sind die Untersuchungsmethoden beschrieben. In der Klammer am Ende jeder Überschrift ist angegeben, in welcher Untersuchungsreihe die jeweilige Methode eingesetzt wurde (Bsp.: Die „Bestimmung der Sieblinien (U3 bis U5)“ erfolgt für die in den Untersuchungsreihen U3 bis U5 verwendeten Partikel).

Charakterisierung der Partikelbettkenwerte

Bestimmung der Sieblinien (U3 bis U5)

Die Bestimmung der Sieblinie erfolgt in Anlehnung an die (DIN EN 933-1:2021), jedoch ohne vorherige Waschung der Partikel.

Bestimmung der Rohdichte (U1 bis U5) und der Wasseraufnahme (U3 bis U5)

Die Bestimmung der Rohdichte ρ_{roh} erfolgt in Anlehnung an die (DIN EN 1097-6:2022). Für die nachfolgende Bestimmung der Schüttdichte, Packungsdichte und Porosität sowie der Berechnung der Verfahrensgeschwindigkeit nach GL 3 wird aber die Rohdichte der Gesteinskörnung bei dem aktuell vorliegenden Feuchtigkeitsgehalt benötigt. Hierfür wird die Gleichung zur Berechnung der „Rohdichte auf ofentrockener Basis“ verwendet, jedoch die Masse M4 („Masse der ofengetrockneten Messprobe in Luft“) ersetzt durch die Masse der feuchten Gesteinskörnung, daher bei aktuell vorliegendem Feuchtigkeitsgehalt.

Die Bestimmung der Wasseraufnahme WA_{24} erfolgt entsprechend (DIN EN 1097-6:2022).

Bestimmung der Schüttdichte, Packungsdichte und der Porosität (U1 bis U5)

Zur Bestimmung der mittleren Schüttdichte $\rho_{schü}$ werden die Partikel lagenweise in die Schalungen (vgl. Abbildung 6) entsprechend dem Einbauprozess während der tatsächlichen LP3DCP-Proben-Herstellung eingebaut. Nach jeder Lage wird das Gewicht der Partikel ermittelt. Zur Berechnung der mittleren Schüttdichte wird das Gewicht und Volumen der Lagen 3 bis 6 oder 2 bis 3 (für Größtkorn: 32 oder 63 mm) berücksichtigt. Die erste(n) Lage(n) bleiben unberücksichtigt, da sich hier die Partikel noch nicht frei hinlegen können und somit gestört sind und so zu einer Überschätzung der Porosität führen würden. Danach erfolgt die Berechnung der Packungsdichte $\varphi_s = \rho_{schü} / \rho_{roh}$ sowie der Porosität $\epsilon = 1 - \varphi_s$.

Charakterisierung der Kornform, spez. Partikeloberfläche und effektiver Porenradius (U2 bis U5)

Zur Charakterisierung der Partikelform werden je Partikelbettvariante ca. 200 einzelne Partikel berührungslos auf einer Fläche verteilt und abfotografiert (vgl. Abbildung 15). Danach werden die Bilder mittels dem Programm ImageJ (Schneider et al. 2012) und dem Plugin „ParticleSizer“ (Thorsten Wagner 2016) hinsichtlich der Sphärizität S und des Formfaktors ψ_c nach GL 4 und GL 5 und ausgewertet. Die Sphärizität S wird mit dem realen Umfang (P_{Real}) und der realen Fläche (A_{Real}) des Partikels berechnet und beschreibt die Kugelförmigkeit eines Partikels. Eine perfekte Kugel weist die größte Sphärizität mit $S = 1$, 0 auf (Sympatec 2023). Der Formfaktor ψ_c lässt sich mittels der kürzesten (B) sowie längsten (L) Seite des Partikels berechnen und ist ein Maß für die Plattigkeit des Partikels (das Partikel ist kugelförmig ($\psi_c = 1,0$) oder länglich geformt ($\psi_c = 0,5$) ist) (Stieß 2009).

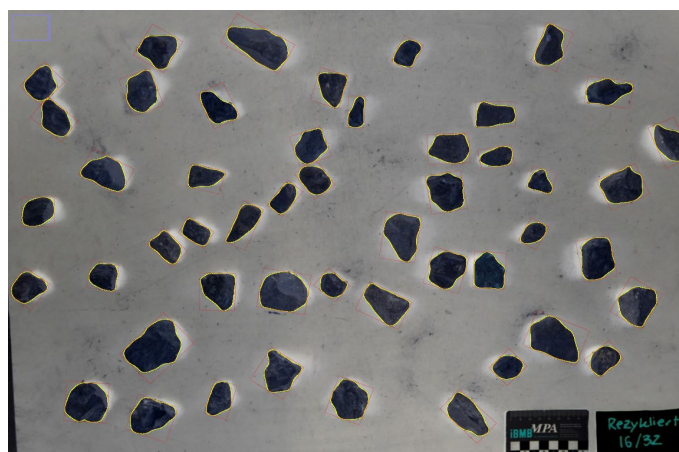


Abbildung 15: Charakterisierung der Kornform mittels ImageJ (Schneider et al. 2012)

$$s = \frac{2 \sqrt{\pi \cdot A_{Real}}}{P_{Real}}$$

GL 4

$$\psi_c = \frac{B}{L} \quad \text{GL 5}$$

Die spezifische Partikeloberfläche A_{Spez} beschreibt die Fläche der einzelnen Partikel innerhalb eines Partikelbetts und lässt sich nach GL 6 mittels des mittleren Korndurchmessers d_{50} sowie der Rohdichte ρ_{roh} abschätzen. Eine zunehmende spezifische Partikeloberfläche A_{Spez} lässt sich mit einem zunehmenden Fließwiderstand in Verbindung setzen und steigt mit abnehmendem mittleren Korndurchmesser d_{50} an. (Pierre et al. 2018)

$$A_{Spez} = \frac{6}{d_{50} \cdot \rho_{roh}} \quad \text{GL 6}$$

Nach GL 7 kann unter Berücksichtigung der Porosität ϵ , der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und der Rohdichte ρ_{roh} der äquivalenter Porenradius R_{pore} abgeschätzt werden (Hapgood et al. 2002).

$$R_{pore} = \frac{2\epsilon}{(1 - \epsilon)A_{Spez} \cdot \rho_{roh}} \quad \text{GL 7}$$

Charakterisierung der Feinkornbetonkennwerte und rheologische Untersuchungen

Dichte des Feinkornbetons (U1 bis U5)

Die Frischbetondichte des Feinkornbetons wird nach (DIN EN 12350-6:2019) ermittelt.

Ausbreitmaß (U1 bis U5)

Zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Rheologie wird jede Mischung mittels des Ausbreitmaßes (ABM) nach (DIN EN 12350-5:2019) überprüft. Die Frischbetonprobe wird im Anschluss nach dem Mischregime direkt aus dem Zwangsmischer (Mader WM Jetmix 125/180) entnommen und beprobt, wobei die Abweichung des Ausbreitmaßes im Bereich von ± 20 mm vom Sollmaß liegen soll. Das Sollmaß variiert in Abhängigkeit der Feinkornbetone F0 bis F4 entsprechend der Tabelle 2. Danach erfolgt die Weitergabe des Feinkornbetons in die Betonpumpe.

Zudem wird das Ausbreitmaß (ABM_{SC3DP}) des Feinkornbetons punktuell, aber mindestens an zwei Proben, nach dem Spitzprozess ermittelt. Hierfür wird der Feinkornbeton nach dem Pump- & Spritzprozess in einen Eimer gespritzt und direkt im Anschluss entsprechend der (DIN EN 12350-5:2019) beprobt.

Rheologische Stabilität des Feinkornbetons (U2 bis U5)

Ab Untersuchungsreihe U2 und U3 werden mehrere Chargen der gleichen Feinkornbetonvarianten hintereinander im DBFL verarbeitet. Damit ein Vergleich der Rheologie mit unterschiedlichen Feinkornbetonchargen hergestellten Proben möglich ist, muss die Rheologie des Feinkornbetons auch unter prozessbedingten Wartezeiten über mindestens 45 min stabil bleiben. Hierfür werden mit einem Zwangsmischer der Firma Zyklus (ZK 30 HE) Batches von jeweils 27 Litern hergestellt. Das Mischregime entspricht dabei dem der tatsächlichen LP3DCP-Kampagne. Durch die Verwendung dieses Zyklus-Zwangsmischer kann der Materialeinsatz im Vergleich zu dem Zwangsmischer von Mader bei ähnlicher Scherratenintensität um etwa 50 % reduziert werden. Danach erfolgt die Entnahme des Feinkornbetons aus dem Mischer zur Ermittlung des Ausbreitmaß nach (DIN EN 12350-5:2019) im Abstand von jeweils ca. 7 – 10 min innerhalb eines Zeitraums von mindestens 45 min. Die Feinkornbetone werden als stabil definiert, wenn die Abweichung des Ausbreitmaßes über die Zeit im Bereich von ± 20 mm vom mittleren Ausbreitmaß liegt.

Achtung: Der unter Laborbedingungen eingesetzte Zwangsmischer Zyklus (ZK 30 HE) weicht von dem während der LP3DCP-Kampagnen eingesetzten Zwangsmischer Mader WM Jetmix 125/180 ab. Hierdurch werden in Abhängigkeit des Zwangsmischertyps die Feinkornbetone unterschiedlich geschert sowie homogenisiert. Dadurch können die Ausbreitmaße, ermittelt unter Laborbedingungen, nicht direkt mit den Ausbreitmaßen verglichen werden, welche während der LP3DCP-Kampagnen ermittelt wurden.

Charakterisierung & Auswertung der Rheologie des gespritzten Feinkornbetons (U1)

Zur Charakterisierung der Feinkornbeton-Rheologie ist ein Mischregime entwickelt worden, das den rheologischen Eigenschaften des Materials während des Mischvorgangs im Zwangsmischer (vgl. Abs. Herstellung der LP3DCP-Proben) nahekommt. Dies wurde in Vorversuchen für ein Mischvolumen von vier Litern verifiziert. Die benötigten Materialien werden bei 20°C vorgelagert. (Mai et al. 2021)

- 1) a) Das Mischregime (0:00 bis 4:00 min) sieht wie folgt aus (Mai et al. 2021): Zugabe der Feinkornbetonbestandteile in den Mischer (0:00 bis 1:00 min): Zuerst wird der Zement, das Kalksteinmehl und der Stabilisierer in den Mischer gegeben und der Mischer danach angestellt. Von 0:00 bis 0:15 min wird das Wasser und von 0:15 bis 1:00 min die Gesteinskörnung hinzugegeben. Nach 1:00 min wird das Fließmittel in den Mischer gegeben. Der mit einem Sternrotor ausgestattete Mischer (EL 5 Profi, Eirich, Hardheim, Deutschland) dreht mit 125 s^{-1} und der Mischtopf mit 45 s^{-1} .
- 2) Mischen des Gemenges für weitere 3 min (1:00 bis 4:00 min)

b) Charakterisierung des Feinkornbetons im Rheometer (ab 4:00 min) (Mai et al. 2021):

Zwischen Minute 4:00 bis 6:30 werden 3 Liter des Feinkornbetons in den Behälter des Rheometers gegeben und für 10 s vorgeschert. Bei 6:30 min wird das Rheometer und somit das Scherprofil gestartet, welches eine definierte Abfolge von Scherungen (durch Rotation) des Feinkornbetons beschreibt (vgl. Abbildung 16).

Das drehzahlgesteuerte Rheometer (Viskomat XL, Schleibinger, Buchbach, Deutschland) besitzt einen 6-flügeligen Vane-Paddle und einen zylindrischen Behälter (Flügelhöhe $h_{\text{vane}} = 70 \text{ mm}$, Flügelradius $r_{\text{vane}} = 35 \text{ mm}$, Zylinderradius $r_{\text{zyl}} = 67,5 \text{ mm}$).

Das Scherprofil (vgl. Abbildung 16) besteht aus einem linearen Anstieg bis zur maximalen Rotationsgeschwindigkeit und einer anschließenden treppenstufenartigen Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit. Jede Treppenstufe besitzt eine Dauer von 15 Sekunden.

c) Auswertung der im Rheometer gemessenen Daten (Mai et al. 2021):

Zur Auswertung der rheologischen Eigenschaften des Feinkornbetons werden die ersten acht Treppenstufen für eine Auswertung mithilfe des Bingham-Modells herangezogen (vgl. Abbildung 16). Hierfür werden bei jeder Treppenstufe die letzten fünf Sekunden (vgl. Abbildung 16 – graue Linie) des Drehmoments (Nm) gemittelt und anschließend mittels der Reiner-Riwlin-Gleichung über das Bingham Modell die plastische Viskosität und die Fließgrenze berechnet (Estellé et al. 2008; Koehler und Fowler 2004). In Abbildung 14 ist das Scherprofil (blaue Linie) und eine beispielhafte Messung (schwarze Linie) der Probe ST0.0_SP 0.4 dargestellt.

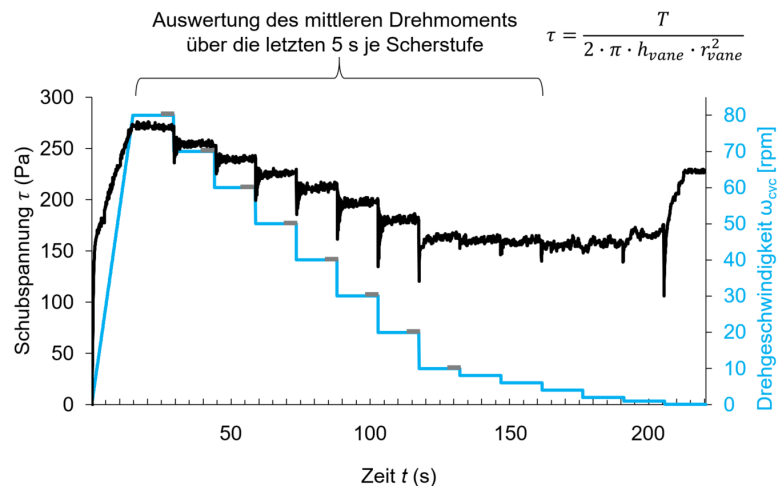


Abbildung 16: Scherprotokoll des Rheometers am Beispiel der Probe ST0.0_SP0.4 (Scherspannung in Schwarz; Drehzahl in Blau)

Charakterisierung & Auswertung der Rheologie der Feinkornbetone F2 – F4 (U3 bis U5)

Die rheologische Charakterisierung der Feinkornbetone F2 - F4 erfolgt am DBFL direkt nach dem Anmischen im Zwangsmischer (vgl. Abs. „Herstellung der LP3DCP-Proben“) mittels dem ICAR Plus Rheometer. Hierfür wird ein "Vane-in-cup"-Aufbau verwendet, welcher aus einem Rheometertopf mit einem Radius von 130 mm und einem 4-Flügel-Vane-Paddel mit einem effektiven Durchmesser sowie einer Höhe von jeweils 127 mm besteht, vgl. Abbildung 17(a) und (b). Zur Verhinderung von „wall slip“ sind an den Seiten des Rheometertopfs 10 mm tiefe Leisten angebracht. Für die Untersuchungen wird jeweils ein Betonvolumen von ca. 12,5 L verwendet.

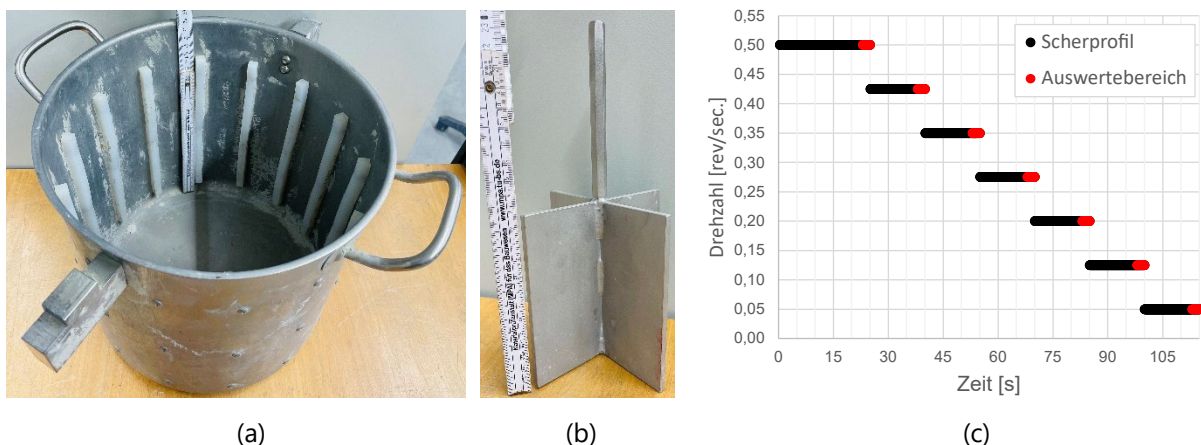


Abbildung 17: ICAR Plus Rheometer: (a) Rheometertopf, (b) 4-Flügel-Vane-Paddel, (c) Scherprofil

Das Geschwindigkeitsprofil beginnt mit einer Vorscherung von 0,5 rev/s für 10 Sekunden, wodurch die Struktur aufgebrochen und der Thixotropieeffekt minimiert wird. Danach nimmt die Geschwindigkeit in sieben Stufen von 0,5 bis 0,05 rev/s ab. Jede Stufe benötigt 15 Sekunden, um den stationären Zustand zu erreichen. Das Konzept des Geschwindigkeitsprofils stammt von (Baumert und Garrecht 2020) sowie (González-Taboada et al. 2017). Für die anschließende Auswertung wird über die letzten 2 Sekunden jeder Stufe das mittlere Drehmoment berechnet (vgl. Abbildung 17(c)). Die Ermittlung der rheologischen Parameter (Fließgrenze τ_0 und plastische Viskosität μ nach dem Bingham-Modell) erfolgt mittels des Reiner-Riwlin-Ansatzes (Koehler und Fowler 2004; Estellé et al. 2008) sowie unter Zuhilfenahme eines iterativen nichtlinearen Optimierungsverfahren gelöst durch eine Solver-Funktion in MS-Excel.

Charakterisierung & Auswertung der (initialen) Fließgrenze der Feinkornbetone F2 – F4 mittels der Penetrationswiderstandsmessungen (U3 bis U5)

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, könnte das Eindringverhalten von Feinkornbetonen in ein Partikelbett unter anderem von der Fließgrenze τ_0 abhängen. Hierbei kann für den LP3DCP-Prozess insbesondere die initiale Fließgrenze nach 0 Minuten (Initiale-0 min-Fließgrenze $\tau_{0,Pen,it,0min}$), die mittlere Fließgrenze (Initiale-10 min-Fließgrenze $\tau_{0,Pen,it,10min}$) der ersten 10 Minuten sowie Geschwindigkeit des Strukturaufbaus (Strukturaufbau a_{St}) zwischen 0 und 10 Minuten unterschieden werden:

$\tau_{0,Pen,it,0min}$: Beschreibt die Fließgrenze nach Verlassen der Düse beim Auftreffen auf das Partikelbett (daher bei 0 min) und kann somit einen Einfluss auf das initiale Eindringverhalten des Feinkornbetons in das Partikelbett besitzen.

$\tau_{0,Pen,it,10min}$: Mittelwert aus 0; 5 und 10 min-Fließgrenzen. In dem hier gewählten Material-Prozessparameter-Setup verbleibt immer Feinkornbeton auf der Partikelbettoberfläche liegen (aufstehender Feinkornbeton a_F). In einem nächsten Schritt wird innerhalb der ersten 10 min die nächste Partikelschicht auf den noch fließfähigen Beton aufgebracht. In Abhängigkeit der Fließfähigkeit können dann folgende Fließmechanismen entstehen:

1. Fließfähiges System: Der aufliegende Feinkornbeton wird durch die neu aufgebrachte Partikelschicht weiter nach unten und/oder oben verdrängt.
2. Weniger fließfähiges System: Der aufliegende Feinkornbeton wird durch die neu aufgebrachte Partikelschicht nur noch wenig weiter nach unten und/oder oben verdrängt, aber vermehrt in horizontale Richtung verzogen.

a_{St} : *Wie stark erfolgt der Strukturaufbau während des Einbaus des Partikelbetts zwischen 0 und 10 Minuten.*

Zur besseren Interpretation der Ergebnisse der Festigkeitsprüfung sowie Strukturuntersuchungen werden daher Penetrationswiderstandsmessungen durchgeführt. Hierfür werden zwei SC3DP-Layer auf ein Schalungsbrett appliziert, unter gleichen Prozessparametern (Beton-, Luftvolumenstrom, Düsenabstand) wie während des LP3DCP-Prozesses. Die Penetrationswiderstandsmessungen erfolgen zwischen 0 bis 120 Minuten nach Ende der Applizierung mittels eines handgeführten Spritzbetonpenetrometer (Mecmesin, UK; Abmessung der Penetrometernadel: Durchmesser = 3 mm, zylindrische Höhe = 12,5 mm; Kegelhöhe = 2,5 mm). Dabei werden zwischen Penetrometermessungen in der Mitte sowie Penetrometermessungen am Rand des Spritzstreifens unterschieden. Nach dem Ansatz von (Lootens et al. 2009) kann mit dem gemessenen Penetrationswiderstand (daher gemessenen Normalkraftwert) die Fließgrenze des Feinkornbetons berechnet werden.

Untersuchung der Festbetoneigenschaften

Druckfestigkeit (U1 bis U5), Dichte (U3 bis U5), Isotropie und Ausschöpfung von LP3DCP- und konventionell hergestellten Proben (U2 bis U5)

Die 28d-Druckfestigkeit f_{cm} wird an LP3DCP- und konventionell hergestellten Referenz-Proben (REF) mit einer Kantenlänge von 10 cm nach (DIN EN 12390-3:2019) ermittelt. Die Proben werden bis zur Prüfung unter genormten Bedingungen (20 C, 65 % r.F.) gelagert. An jeder Würfelprobe wird nach der Entnahme aus dem Spritzstreifen die Abmessungen und das Gewicht ermittelt und daraus die Betondichte ρ_B bestimmt. Danach werden die für die Lastaufnahme vorgesehenen Flächen der Proben entsprechend der (DIN EN 12390-3:2019) abgeglichen.

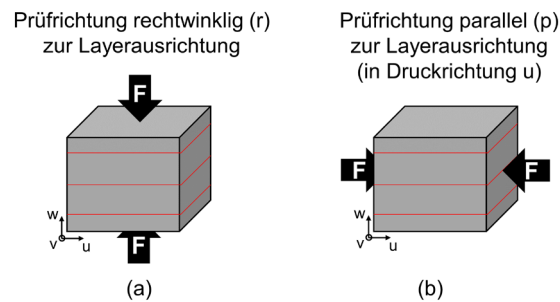


Abbildung 18: Würfeldruckfestigkeit: (a) Prüfung rechtwinklig (r) sowie parallel (p) zur Layerausrichtung. Die Koordinatenachse u beschreibt die Druckrichtung.

Zur Untersuchung der LP3DCP-Druckfestigkeit werden jeweils zwei oder vier (U1 oder U2 & U3) LP3DCP-Würfel rechtwinklig ($f_{cm,r}$) sowie parallel ($f_{cm,p}$) zur Layerausrichtung geprüft (vgl. Abbildung 18). Hierfür werden mittig aus dem Spritzstreifenquerschnitt die Würfel so herausgesägt, dass bei einer Prüfung parallel zum Schichtenverlauf die Zwischenschicht zwischen zwei Schichten in der Belastungsmittte angeordnet werden kann (vgl. Abb. Abbildung 7 bis Abbildung 9 – rote Linien).

Zudem wird in den Untersuchungsreihen U2 bis U4 die Isotropie I berechnet, welches das Verhältnis aus der Druckfestigkeit rechtwinklig im Verhältnis zur Druckfestigkeit parallel zur Layerausrichtung darstellt. Die Isotropie wird demnach wie folgt berechnet:

$$I = f_{cm,r}/f_{cm,p} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{GL 8}$$

Die Isotropie I liegt dabei zwischen 0 und 100 % und eine Isotropie von 100 % entspricht einem komplett isotropen Baustoff, d.h. die Eigenschaften sind unabhängig der Belastungsrichtung. Konventionell hergestellte Betone werden per Definition als isotrope Baustoffe angenommen, I entspricht 100 %.

Es wird zudem die Ausschöpfung A berechnet, daher wie nahe die LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit $f_{cm,LP3DCP}$ an die REF-Würfeldruckfestigkeit $f_{cm,REF}$ liegt. Die Ausschöpfung wird demnach wie folgt berechnet:

$$A = f_{cm,LP3DCP}/f_{cm,REF} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{GL 9}$$

Die REF-Probe bezieht sich dabei auf eine konventionell hergestellte Würfeldruckfestigkeitsprobe, bestehend aus Feinkornbeton und der entsprechenden Gesteinskörnung des eingesetzten Partikelbetts. Eine Ausschöpfung von 100 % bedeutet, dass die LP3DCP-Proben die gleiche Festigkeit im Vergleich zu den konventionellen Proben erzielen. Fällt der Wert unter 100 %, erzielt die LP3DCP-Probe geringe Werte und kann ein Indiz für bspw. einen schlechten Verbund sein.

4-Punkt-Biegezugfestigkeit & Bewehrungsverbund (U5)

Die 28d-Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}$ wird sowohl an LP3DCP- wie auch an konventionell hergestellten Referenz (REF)-Biegebalken mit den Abmessungen von $15 \times 15 \times 70 \text{ cm}^3$ ($b \times h \times l$) nach (DIN EN 12390-5:2019) an einem 4-Punkt-Biegeversuch ermittelt (vgl. Abbildung 10b). Die Proben werden bis zur Prüfung unter genormten Bedingungen (20 °C, 65 % r.F.) gelagert. Zur Vermeidung von Spannungsspitzen werden die für die Lastaufnahme vorgesehenen Flächen der Proben entsprechend der (DIN EN 12390-3:2019) abgeglichen. Die Prüfung erfolgt lagegerecht mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,05 mm/s.

Wie für die Würfeldruckfestigkeit kann auch für die Biegezugfestigkeit die Ausschöpfung A berechnet werden, daher die LP3DCP-Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl,LP3DCP}$ im Verhältnis zur REF-Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl,REF}$:

$$A = f_{ct,fl,LP3DCP}/f_{ct,fl,REF} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{GL 10}$$

Daneben wird die Güte des Bewehrungsverbunds visuell beurteilt. Hierfür werden jeweils vier Scheiben aus dem Querschnitt der bewehrten Biegebalken herausgesägt. Die vier Scheiben (somit acht sichtbare Bewehrungsstränge) werden dann visuell auf die Güte des Verbunds zwischen Bewehrung und Feinkornbeton beurteilt. Kriterien zur Beurteilung des Verbunds sind dabei, ob die Bewehrung vollkommen in Feinkornbeton eingebettet ist (gut) oder ob Fehler wie bspw. Luftporen zwischen Bewehrung und Feinkornbeton vorliegen (schlecht).

Strukturelle Untersuchungen

Gefüge-/ Verbunduntersuchung mittels Mikro-Computertomographie (μ CT) (U1)

Zur qualitativen Beurteilung der inneren Struktur hinsichtlich des Verbunds zwischen zwei Schichten werden jedem Probenstreifen Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm entnommen (vgl. Abbildung 7). Die Bohrkern werden dann nachfolgend mittels eines μ CT gescannt (GE phoenix, Spannung: 160 kV, Stromstärke: 240 μ A, Anzahl der Bilder: 1000, Bilddurchschnitt: 3, Filter: 0,1 mm Cu, Belichtung: 500 ms für alle Proben, Voxelkantenlänge: 131 μ m, Multiscan mit 4 Schnitten; Gesamtscanzeit: 2 h 13 min). Anschließend erfolgt die Rekonstruktion der CT-Rohdaten mittels der Software Phoenix datos|x2 (GE Sensing & Inspection Technologies, Boston, MA, USA). Mit der Software VG Studiomax 2.2 (Volume Graphics, Heidelberg, Deutschland) werden die gescannten Bohrkern auf ihre Porosität analysiert. Hierbei wird das Volumen von der Mitte der Schicht 1 bis zur Mitte der Schicht 3 herangezogen. Die darin enthaltenen Volumina werden in Feststoffe und Hohlräume unterteilt und hieraus die Porosität bestimmt. (Mai et al. 2021)

Gefüge-/ Verbunduntersuchung mittels grafischer Auswertung (ImageJ) (U3, U4)

Ein weiteres Verfahren zur qualitativen Beurteilung der inneren Struktur hinsichtlich des Verbunds zwischen zwei Schichten ist die grafische Auswertung mittels des Programmes ImageJ (Schneider et al. 2012). Hierfür wird in einem ersten Schritt der gesägte Querschnitt in Bereiche mit Verbund (vgl. Abbildung 19(b) – nicht markiert) sowie keinem Verbund/Fehlstellen (vgl. Abbildung 19(b) – gelb markiert) eingeteilt. Als Fehlstelle werden jene Bereiche definiert, welche:

- a. nicht Teil der gesägten Ebene sind und daher an dieser Stelle Luft vorliegt
- b. oder durchgesägte Gesteinskörnung oder Zementstein, welche aber an keiner Stelle mit Bereichen mit gutem Verbund verknüpft ist.

Der Auswertebereich beschränkt sich dabei auf die mittleren 10 cm sowie 2. bis 5. Layer des Querschnitts (vgl. Abbildung 19(b) – grün markiert). Der 1. Layer wird hierbei nicht berücksichtigt, da dort die Lage der Gesteinskörnung aufgrund des direkt darunterliegenden Bodens gestört ist. Der 6. Layer ist für die Auswertung auch nicht repräsentativ, da die letzte Feinkornbetonschicht nicht mehr mit Gesteinskörnung bedeckt wird und somit dies das Eindringverhalten beeinflussen kann.

Nach Einteilung der Bereiche wird das Bild mittels ImageJ binarisiert, d.h. in Bereiche mit Verbund sowie Bereich ohne Verbund (vgl. Abbildung 19(b) – schwarz und weiß) eingeteilt. ImageJ gibt als Ergebnis die Gesamtfläche A_{ges} (grüner Kasten) sowie die ungebundenen Flächen A_{ug} (weiß) sowie gebundenen Flächen A_g (schwarz) aus. Nach GL 11 kann die querschnittsbezogene Verbundfläche QV dann ermittelt werden. Bei einem Wert von $QV = 100 \%$ gilt der Querschnitt als vollständig gebunden, alle Hohlräume sind mit Feinkornbeton gefüllt.

$$QV = \frac{A_g}{A_{ges}} \cdot 100 \quad [\%]$$

GL 11

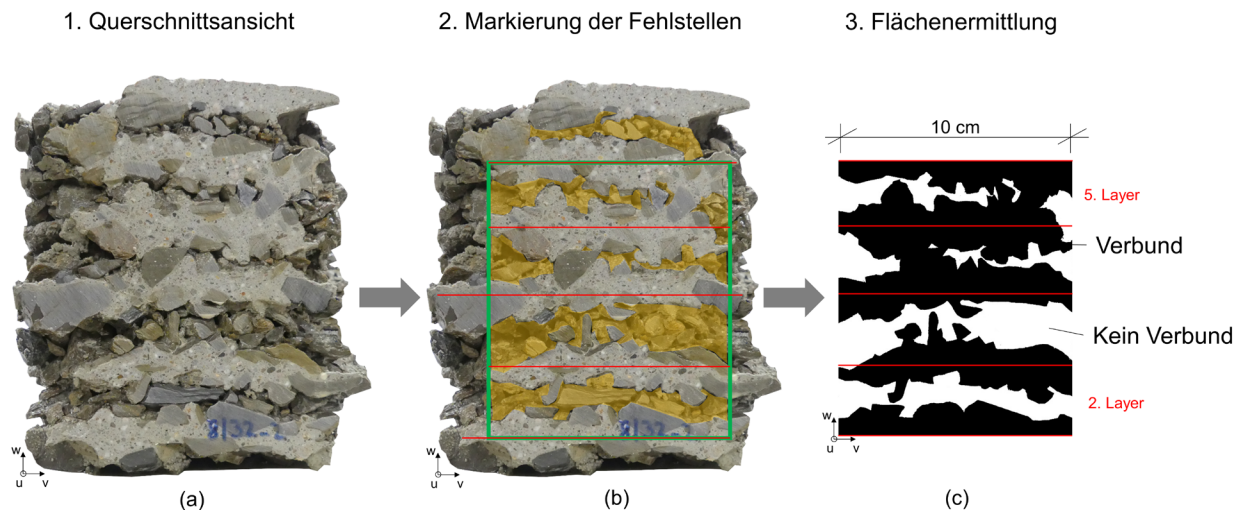


Abbildung 19: Ermittlung der Bereiche mit und ohne Verbund: (a) Querschnittsansicht der unbearbeiteten Probe, (b) Querschnittsansicht nach Markierung der Fehlstelle und (c) nach Binarisierung und Ermittlung der Flächenanteile „Verbund“ sowie „kein Verbund“ mittels ImageJ

Geometrische Präzision (U1, U3, U4)

Die Bestimmung der geometrischen Präzision der Streifen erfolgt über zwei Verfahren. In der Untersuchungsreihe U1 werden die Abmessungen direkt nach dem Ausgraben aus der Baubox mittels eines Zollstocks an mind. zwei Stellen bestimmt (Mai et al. 2021).

In der Untersuchungsreihe U3 werden die gedruckten LP3DCP-Streifen grafisch mittels eines Matlab-Tools ausgewertet. Hierfür wird zuerst ein Bild von der LP3DCP-Probe aufgenommen und danach die Spritzlayerbreite w_L mit dem Tool ermittelt (vgl. Abbildung 20(a) und (b)). Die Abtastrate des Tools beträgt 2 mm. Als Spritzlayerbreite w_L wird dabei der auf der Partikeloberfläche aufliegende Feinkornbeton in V-Richtung berücksichtigt. Dabei bleiben die Bereiche unberücksichtigt, welche oberflächlich leichte Spritzrückstände aufweisen.

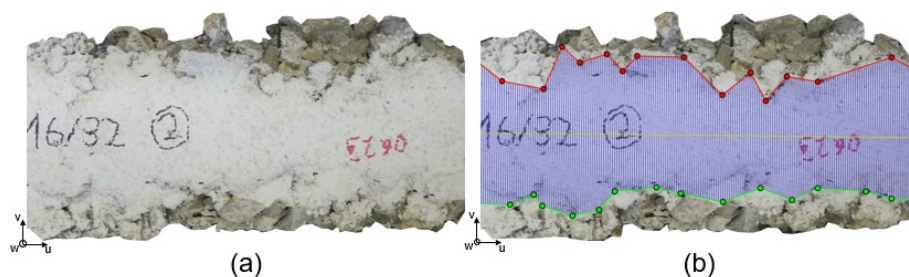


Abbildung 20: Ermittlung aus einer (a) Ursprungsdatei mittels eines Matlab-Tools die (b) Spritzlayerbreite w_L .

Eindringverhalten (Aufstehender Feinkornbeton a_F , Eindringtiefe e_1 und e_2) (U3, U4)

Zur Untersuchung und Beurteilung des Eindringverhaltens von Feinkornbeton in das Partikelbett wird in einem ersten Schritt der über der obersten Partikelbettoberkante aufstehende Feinkornbeton a_F ermittelt (vgl. Abbildung 21). Hierfür wird an jeder Probenvariante an mindestens drei Punkten die Gesamthöhe des Spritzstreifenquerschnitts h_{QS} ermittelt und gemittelt. Wird entsprechend der GL 12 von der Gesamthöhe des Spritzstreifenquerschnitts h_{QS} die Höhe der Oberkante des sechsten Layers $h_{6.Layer} = 192 \text{ mm}$ abgezogen, wird der aufstehende Feinkornbeton a_F erhalten:

$$a_F = h_{QS} - h_{6.Layer} \quad [\text{mm}] \quad \text{GL 12}$$

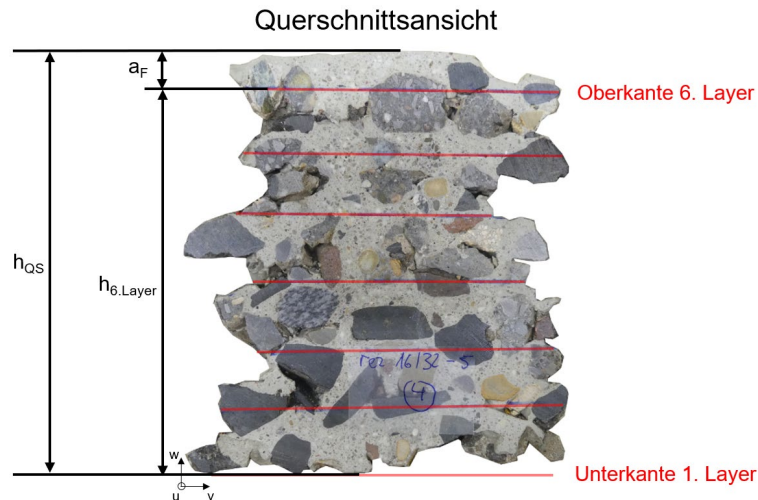


Abbildung 21: Ermittlung des aufliegenden Feinkornbetons a_F auf der obersten Partikelbettoberkante

In einem zweiten Schritt werden die Proben mit nur einem aufgespritzten Feinkornbetonlayer zur Untersuchung der Eindringtiefe herangezogen (vgl. Abbildung 9). Der Vorteil dieser Proben liegt darin, dass der Feinkornbeton während des Eindringprozesses frei in das Partikelbett eindringen kann und nicht durch darunterliegende Feinkornbetonschichten beeinflusst wird. Hierbei liegt ein Teil des Feinkornbetons auf der Partikelbettoberkante auf (aufstehende Feinkornbeton a_F), der andere Feinkornbetonanteil ist in das Partikelbett eingedrungen (Eindringtiefe e). Die Betonhöhe h_F setzt sich entsprechend GL 13 aus dem aufstehenden Feinkornbeton a_F und der Eindringtiefe e zusammen:

$$h_F = a_F + e \quad [\text{mm}] \quad \text{GL 13}$$

Zu Ermittlung der Betonhöhen $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$ wird der Probequerschnitt mittig entlang der Druckrichtung u aufgesägt (vgl. Abbildung 22(b)). Die aufgesägte Probenfläche wird danach fotografiert (vgl. Abbildung 22(a)). Auf jedem Bild ist die gesägte Querschnittsfläche (Abbildung 22(b) – blau umrandet) sowie Bereiche mit überstehender aber nicht angesägter Gesteinskörnung zu erkennen (grauer Bereich unterhalb der blauen Markierung). Die Betonhöhen $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$ erfolgt unter Zuhilfenahme eines Matlab-Skripts. Entsprechend der Abbildung 22(b) werden in Abhängigkeit der zwei Auswertevarianten (Betonhöhen $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$) die vertikale Höhe in den rot markierten Bereichen in einem Abstand von 1 mm abgetastet und daraus eine mittlere Betonhöhe $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$ ermittelt. In Abbildung 23 ist beispielhaft ein Bild vor (links) und nach (rechts) der Auswertung mit dem Skript gezeigt. Durch Umstellung der GL 13 kann nachfolgend dann die Eindringtiefe e berechnet werden, da die Betonhöhe h_F und der aufstehende Feinkornbeton a_F nun bekannt ist.

Die beiden Betonhöhen $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$ und somit auch die Eindringtiefen e_1 und e_2 unterscheiden sich wie folgt:

- Betonhöhe $h_{F,1}$ & Eindringtiefe e_1 : Die Ermittlung der Betonhöhe erfolgt im gesamten Bereich der gesägten Fläche (vgl. Abbildung 22(b) rote Fläche). Da in die Ermittlung neben dem Bereich des Feinkornbetons auch die Gesteinskörnung mit einfließt, wird hierdurch die Betonhöhe $h_{F,1}$ & Eindringtiefe e_1 systematisch überschätzt.
- Betonhöhe $h_{F,2}$ & Eindringtiefe e_2 : Die Ermittlung der Betonhöhe erfolgt auch hier im Bereich der gesägten Fläche (vgl. Abbildung 22(b) rote Fläche). Jedoch wird die Betonhöhe nur an Stellen bestimmt, an denen der Feinkornbeton auch „frei“ fließen konnte (d.h. nicht durch ein Gesteinskorn zum Stehen gebracht wurde). Ist das Gesteinskorn von dem Feinkornbeton umschlossen, wird die Eindringtiefe über die Fläche hinweg ermittelt. Diese Auswertungsvariante kommt der tatsächlichen Eindringtiefe des Feinkornbetons am nächsten. Allerdings geht die Ermittlung auch mit einer Reduzierung der Datenpunkte sowie einer gewissen Subjektivität bei der Auswahl der auszuwertenden Bereiche einher.

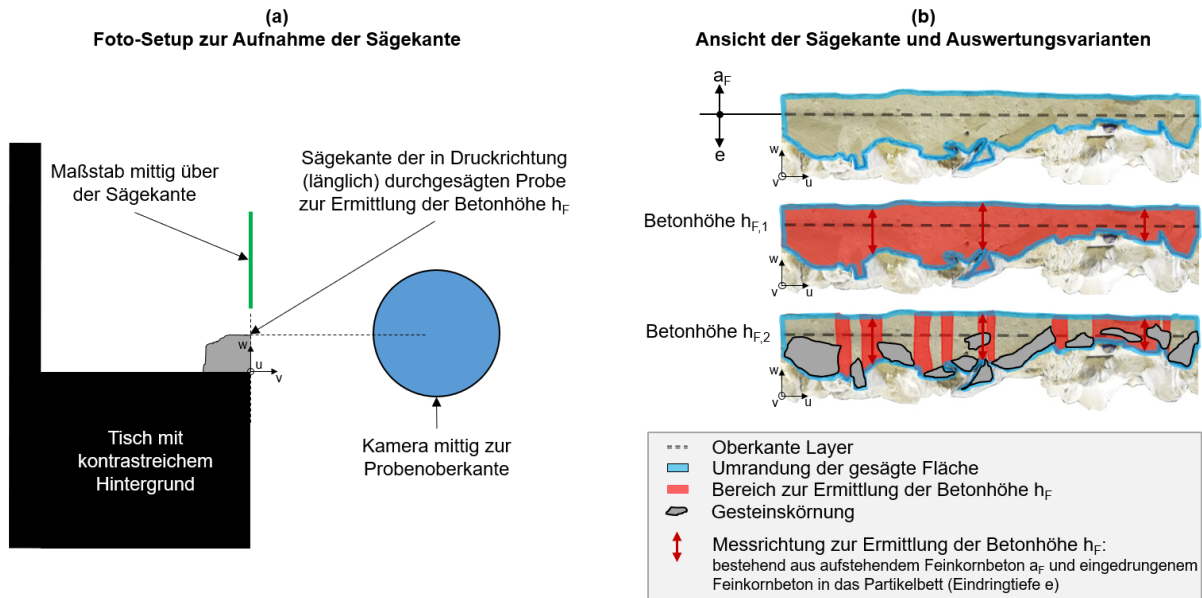


Abbildung 22: (a) Foto-Setup zur Aufnahme der mittig in Längsrichtung durchgesägten Probe und (b) Auswertungsvarianten zur Ermittlung der Betonhöhen $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$ (rot markierte Flächen): oben - in der Mitte durchgesägte Probe (Schnittkante blau markiert); V1: Auswertung der Eindringtiefe im Bereich der Schnittkante; V2: Auswertung der Eindringtiefe im Bereich, in dem der Feinkornbeton frei ausfließen kann; V3: Auswertung der Eindringtiefe im Gesamtbereich (inkl. überstehende Gesteinskörnung).

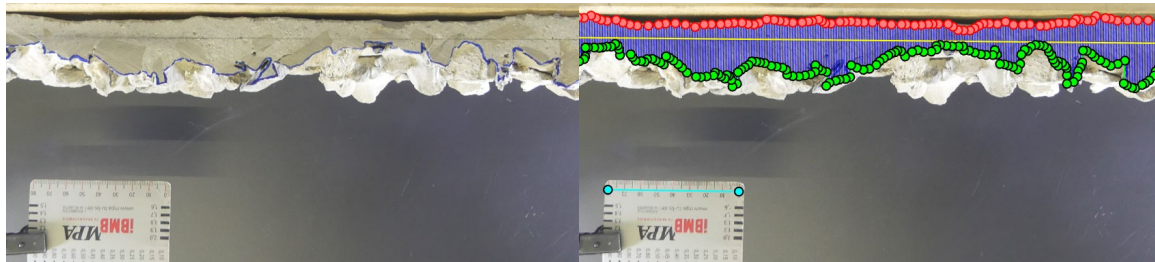


Abbildung 23: links: Aufgenommenes Bild zur grafischen Auswertung der Eindringtiefe; rechts: Mittels Matlab ausgewertete Betonhöhe $h_{F,1}$

6 Untersuchungreihe U1: Einfluss aus veränderlicher Feinkornbetonrheologie

6.1 Rheologische Kennwerte des Feinkornbetons

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Untersuchung der rheologischen Kennwerte des Feinkornbetons F0 vorgestellt (vgl. Tabelle 2). In Abbildung 24 ist die (a) Fließgrenze τ_0 und die (b) plastische Viskosität μ in Abhängigkeit der Stabilisierer- (ST: 0,0; 0,05 und 0,1 M.-% von der Gesamtmasse (v. G.) sowie Fließmitteldosierung (FM: 0,4 und 0,5 M.-% vom Zementgehalt (v. Z.) gezeigt. Es ist zu erkennen, dass unabhängig von der Fließmitteldosierung sowohl die Fließgrenze τ_0 wie auch die plastische Viskosität μ mit steigender Stabilisiererdosierung ansteigt. Dieses Verhalten ist zu erwarten, da viskositätsmodifizierende Mittel wie bspw. Stabilisierer die Kohäsion und Stabilität von zementbasierten Materialien verbessern (Gelardi et al.). Dies lässt sich im Wesentlichen auf drei physikalisch-chemische Mechanismen zurückführen (Khayat und Mikanovic 2012; Khayat 1998; Mai et al. 2021):

- Wasserretention, die die Viskosität der flüssigen Phase erhöht,
- die Bildung eines Gels und Polymerverflechtung, die die Mobilität von Wasser blockiert,
- Partikel-Polymer-Wechselwirkung, die zu Partikel-Partikel-Brückenbildung und somit zu eingeschlossenem Wasser führt.

Diese drei Mechanismen sind für die Zunahme der Fließgrenze τ_0 und der plastischen Viskosität μ der Suspension verantwortlich und zeigen sich mit zunehmender Stabilisiererdosierung ausgeprägter (Mechaymech und Assaad 2019; Palacios und Flatt). Auffällig ist, dass für eine Stabilisiererdosierung von 0,1 % und eine Fließmitteldosierung von 0,5 % (ST0,1_FM0,5) eine deutlich größere plastische Viskosität μ beobachtet werden kann als bei einer Fließmitteldosierung von 0,4 % (ST0,1_FM0,4) (vgl. Abbildung 24 – (rechts)). Für niedrigere Stabilisiererdosierungen von 0,05 % oder 0 % ist dieser Effekt nicht zu erkennen. Das könnte auf eine nachteilige Interaktion zwischen den beiden Zusatzmitteln Stabilisierer und Fließmittel zurück geführt werden (Plank). (Mai et al. 2021)

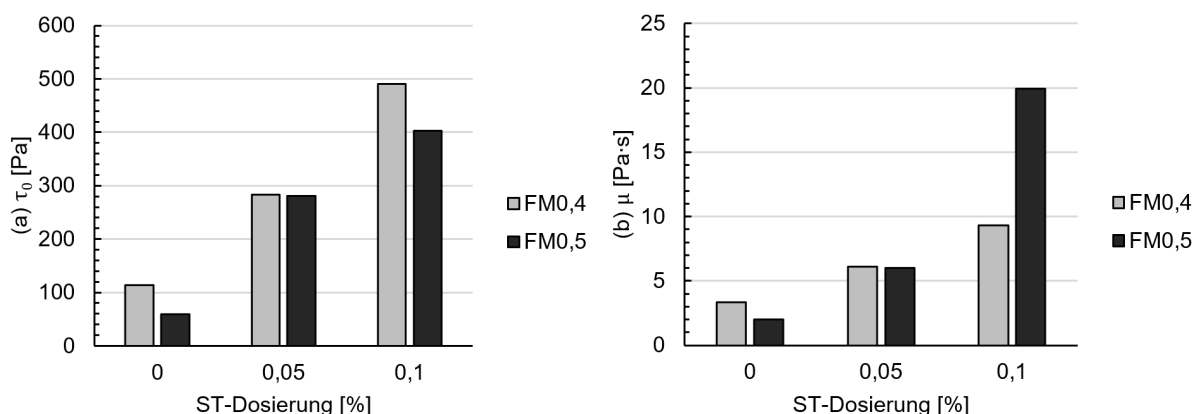


Abbildung 24: Rheologische Kennwerte des Feinkornbetons (F0) für die (a) Fließgrenze und (b) plastische Viskosität des Feinkornbetons unter Variierung der Stabilisierer (ST: 0; 0,05; 0,1 M.-% v. G.)- sowie Fließmitteldosierung (FM: 0,4; 0,5 M.-% v. Z.)

6.2 Geometrie der hergestellten Streifen

In Abbildung 25 ist die LP3DCP-Layerbreite $w_{L,LP3DCP}$ für die beiden Partikelbetten Rez16-32 und Rez4-32 in Abhängigkeit der Stabilisierer (ST)- und der Fließmitteldosierung (FM) gezeigt. Der Einfluss des Fließmittels ist im Vergleich zum Stabilisierer vernachlässigbar gering. Das Partikelbett Rez16-32 erzielt mit einer mittleren Layerbreite von 151,5 mm im Vergleich zu Partikelbett Rez4-32 mit einer mittleren Layerbreite von 153,2 mm eine etwas geringere Layerbreite. Dies könnte darauf zurückgeführt werden,

dass beim Partikelbett Rez16-32 der Feinkornbeton in der Tendenz stärker in vertikaler als in horizontaler Richtung das Partikelbett durchdringen kann. Der Zusammenhang könnte darin gefunden werden, dass das Partikelbett Rez16-32 aufgrund der größeren Packungsdichte sowie der größeren mittleren Partikelgröße einen geringeren vertikalen Fließwiderstand besitzt als Partikelbett Rez4-32. Der Einfluss der Packungsdichte sowie der mittleren Partikelgröße auf das Eindringverhalten ist in dieser Form auch beim SPI zu beobachten (Weger et al. 2021; Weger 2020). Zudem könnte das Eindringverhalten auch wesentlich von der Partikelform (rund vs. plattig) sowie der Ausrichtung beeinflusst sein, was im Rahmen dieser Untersuchungsreihe aber nicht genauer untersucht wurde (Mai et al. 2021).

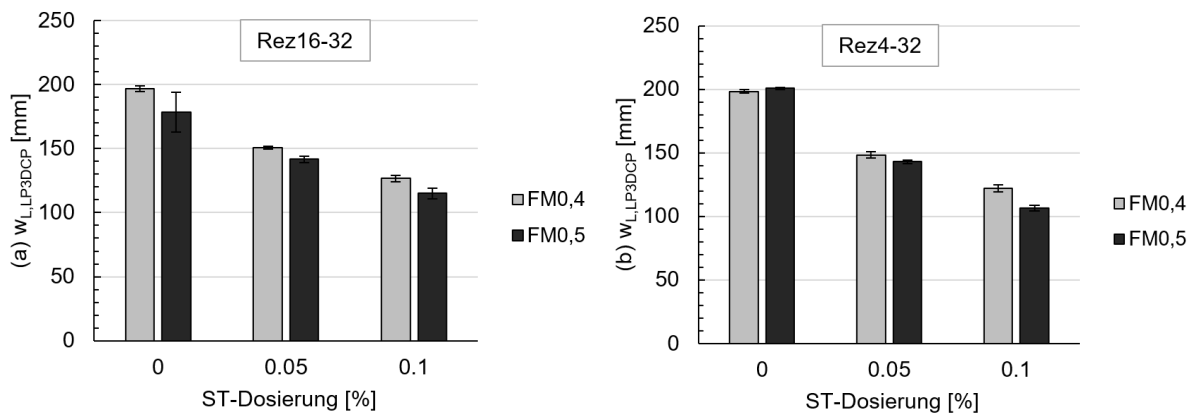


Abbildung 25: Layerbreite der LP3DCP-Streifen $w_{L,LP3DCP}$ für (a) das Partikelbett Rez16-32 und (b) das Partikelbett Rez4-32 unter Variierung der Stabilisierer (ST)- sowie Fließmitteldosierung (FM)

In Abbildung 26 ist die LP3DCP-Layerbreite $w_{L,LP3DCP}$ der beiden Partikelbetten Rez16-32 und Rez4-32 in Abhängigkeit der Fließgrenze τ_0 des Feinkornbetons F0 dargestellt. Demnach sinkt mit zunehmender Fließgrenze τ_0 die Layerbreite $w_{L,LP3DCP}$ ab, da eine höhere Fließgrenze τ_0 zu einem früheren Stillstand des Fließgeschehens führt (Weger 2020). (Mai et al. 2021)

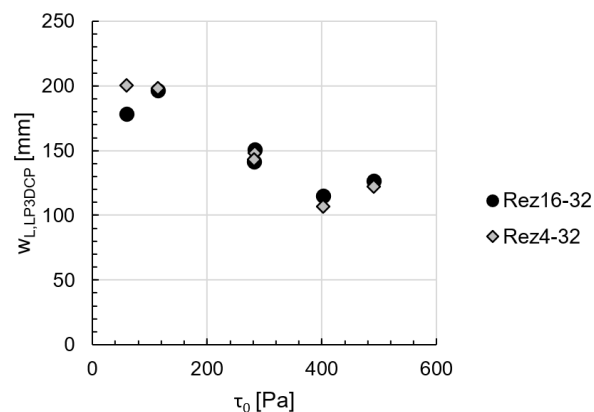


Abbildung 26: Layerbreite der LP3DCP-Streifen $w_{L,LP3DCP}$ in Abhängigkeit der Fließgrenze τ_0 für die beiden Partikelbetten Rez16-32 und Rez7-32

6.3 Gefügeuntersuchung

In Abbildung 27 sind die Bohrkern der Partikelbetten Rez16-32 und Rez4-32 in Abhängigkeit der Stabilisierer (ST)- und Fließmitteldosierung (FM) gezeigt. Es zeigt sich visuell, dass das Partikelbett Rez16-32 weniger Hohlräume und somit einen besseren Schichtverbund als Partikelbett Rez4-32 aufweist. Zudem ist eine Tendenz zu mehr Hohlräumen/Poren für das Partikelbett Rez4-32 zu erkennen, was zu einem schlechteren Schichtverbund führen dürfte. (Mai et al. 2021)

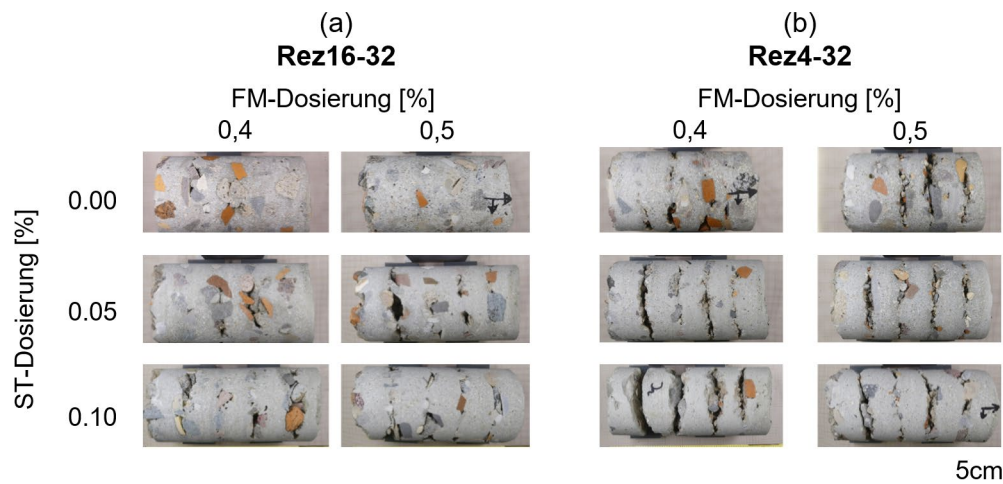


Abbildung 27: LP3DCP-Bohrkerne über 5 Schichten aus dem Partikelbett (a) Rez16-32 und (b) Rez4-32 B unter Variierung der Stabilisierer (St)- sowie Fließmitteldosierung (FM).

In Abbildung 28 sind für die beiden Partikelbetten (a) Rez16-32 und (b) Rez4-32 weiterführende μ CT-Untersuchungen im Bereich der Zwischenschicht zweier Layer für Proben ohne Stabilisierer (ST0,0–FM0,5) sowie mit hoher Stabilisiererdosierung (ST0,1_FM0,5) durchgeführt worden. Wie bereits die visuelle Untersuchung (vgl. Abbildung 27) zeigt, ist auch hier die Tendenz zu erkennen, dass eine geringere Stabilisiererdosierung zu einem verbesserten Schichtverbund sowie geringeren Hohlräumen/Poren führt. Zudem ist ersichtlich, dass Partikelbett Rez16-32 im Vergleich zu Rez4-32 aufgrund der geringeren Hohlräume/Poren zwischen den Schichten einen besseren Schichtverbund erzielt. (Mai et al. 2021)

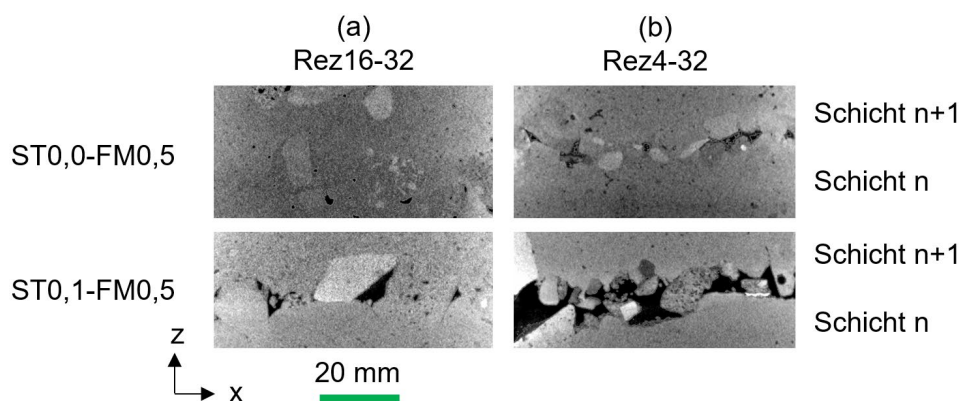


Abbildung 28: Beispiel einer μ CT-Untersuchung der Zwischenschichten für die beiden Partikelbetten (a) Rez16-32 und (b) Rez4-32 für eine Stabilisiererdosierung (ST) von 0,0 % (oben) und 0,1 % (unten) und einer Fließmitteldosierung (FM) von 0,5 %.

Zusätzlich wurde die Porosität über drei Layer mittels des μ CT bestimmt. In Abbildung 29 sind die zugehörigen Ergebnisse der Porosität ε_{LP3DCP} für die beiden Partikelbetten in Abhängigkeit der Stabilisierer- sowie Beschleunigerdosierung gezeigt. (Mai et al. 2021)

Es ist zu erkennen, dass das Partikelbett Rez16-32 mit etwa 1 – 4 Vol.-% eine geringere Porosität aufweist, als das Partikelbett Rez4-32 mit einer Porosität im Bereich von etwa 2 – 7 Vol.-%. Für das Partikelbett Rez16-32 wächst mit steigender Stabilisiererdosierung die Porosität. Dies stimmt mit den vorherigen Erkenntnissen überein, wonach eine Erhöhung der Stabilisiererdosierung mit einer Erhöhung der Fließgrenze (vgl. Abbildung 24) einhergeht, was wiederum die Eindringtiefe des Feinkornbetons in das Partikelbett reduziert und somit zu einer höheren Porosität führt. (Mai et al. 2021)

Für Partikelbett Rez4-32 kann dieser Trend indes nicht so klar erkannt werden. Allgemein kann für das Partikelbett Rez4-32 ein schlechterer Schichtverbund geschlossen werden (vgl. Abbildung 27 und Abbildung 28). Da das Partikelbett Rez4-32 eine höhere Packungsdichte und somit einen höheren

Fließwiderstand aufweist, wird im Vergleich zu Partikelbett Rez16-32 entsprechend eine geringere Fließgrenze für eine vollständige Durchdringung benötigt. Der schlechtere Verbund des Partikelbett Rez4-32 könnte somit auf die feineren Anteile in der Sieblinie zurückgeführt werden, welche den freien Fluss des Feinkornbetons in den vergleichsweise kleinen Porenraum verhindert. Daneben geht eine höhere Packungsdichte mit einer höheren Tortuosität sowie Oberfläche einher, was zu einer erhöhten Reibung zwischen dem Feinkornbeton und dem Partikelbett führt (Weger 2020; Weger und Gehlen 2021). Die Effekte führen zu geringeren Eindringtiefen des Feinkornbetons oder der Feinkornbeton bleibt vollständig auf der Partikelbettoberfläche liegen. Sogar der sehr fließfähige Feinkornbeton ohne Stabilisierer führt nicht zu einem verbesserten Schichtverbund zwischen den einzelnen Schichten (vgl. Partikelbett Rez4-32 im Vergleich zum Partikelbett Rez16-32 für ST0,0_FM0,4 und ST0,0_FM0,5). (Mai et al. 2021)

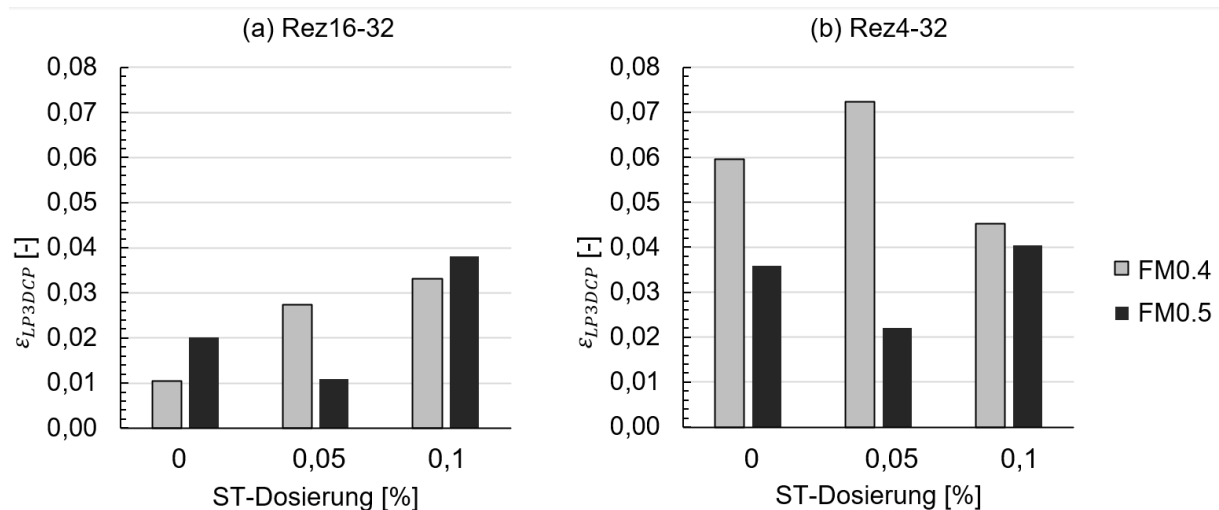


Abbildung 29: Porosität ε_{LP3DCP} basierend auf den μ CT-Untersuchungen der Bohrkern aus den LP3DCP-Proben für das Partikelbett (a) Rez16-32 und (b) Rez4-32.

6.4 Druckfestigkeit

In Abbildung 30 ist die Druckfestigkeit f_{cm} für die beiden Partikelbetten (a) Rez16-32 und (b) Rez4-32 in Abhängigkeit der Fließmitteldosierung von 0,4 % (links) und 0,5 % (rechts) und der Stabilisiererdosierung (0,0 %; 0,05 % und 0,1 %) dargestellt. Zudem ist zwischen den LP3DCP-Proben (dunkel- & hellgrau) und den konventionell hergestellten Proben ohne Gesteinskörnung (gestrichelte Linie) zu unterscheiden. Aufgrund des heterogenen Gefüges der LP3DCP-Proben erfolgt die Prüfung sowohl für eine Belastung rechtwinklig (dunkelgrau) als auch parallel zum Schichtverlauf (hellgrau).

Bei dem Partikelbett Rez16-32 führt bei einer Belastung rechtwinklig zum Schichtverlauf (vgl. oberes Diagramm: dunkelgrauer Balken) eine Zunahme der Stabilisiererdosierung zu einer Abnahme der Druckfestigkeit. Die höchsten Druckfestigkeitswerte werden für eine Stabilisiererdosierung von 0 % mit 60,0 MPa (ST0,0-FM0,4) bzw. 64,1 MPa (ST0,0-FM0,5) erzielt. Das gleiche Material erzielt aber für konventionell hergestellte Proben (d.h. ohne Gesteinskörnung) Druckfestigkeiten zwischen 51,2 MPa (ST0,0-FM0,4) sowie 57,9 MPa (ST0,0-FM0,5) und liegt somit leicht unter den Werten der LP3DCP-Proben. (Mai et al. 2021)

Für die mit dem Partikelbett Rez4-32 (unteres Diagramm) hergestellten LP3DCP-Proben und eine Belastung rechtwinklig zum Schichtverlauf (dunkelgrauer Balken) ist analog eine Abnahme der Druckfestigkeit mit zunehmender Stabilisiererdosierung und unabhängig der Fließmitteldosierung zu erkennen. Im Gegensatz zum Partikelbett Rez16-32 liegen hier die Druckfestigkeiten mit minimal 12,3 MPa (ST0,1_FM0,4) und maximal 40,3 MPa (ST0,0-FM0,5) aber deutlich unter den Druckfestigkeiten der konventionell hergestellten Proben.

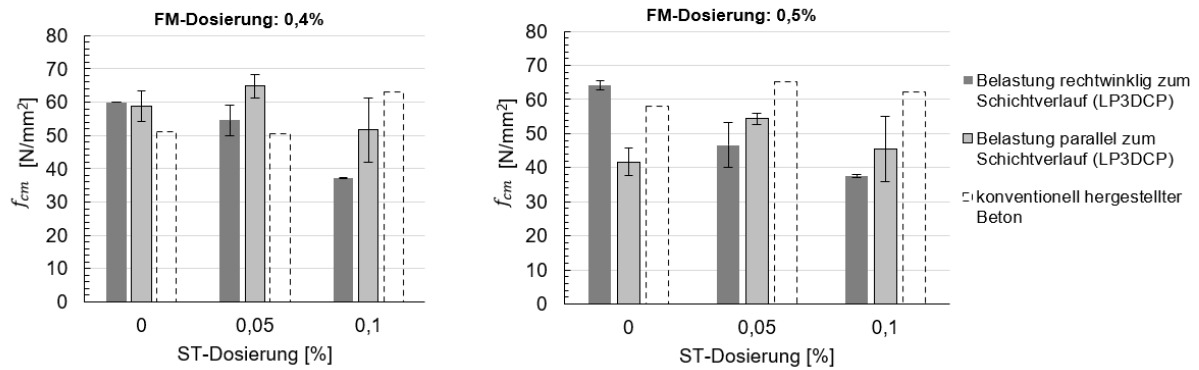
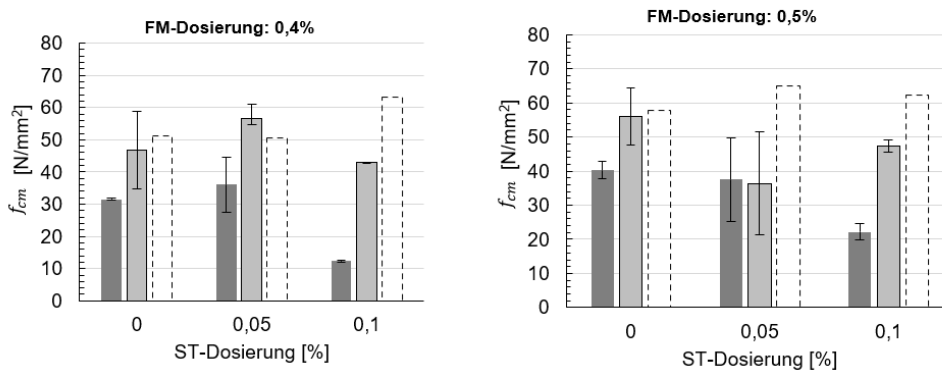
(a) Rez16-32**(b) Rez4-32**

Abbildung 30: Druckfestigkeit f_{cm} der LP3DCP-Proben für Partikelbett (a) Rez16-32 und (b) Rez4-32, Fließmitteldosierung von 0,4 % (links) und 0,5 % (rechts), Belastung rechtwinklig zum Schichtverlauf (dunkelgrau), parallel zum Schichtverlauf (hellgrau) und für konventionell hergestellter Beton ohne Gesteinskörnung (gestrichelte Linie)

Betrachtet man die Druckfestigkeiten parallel zum Schichtverlauf (hellgrauer Balken), kann im Vergleich zu den Druckfestigkeiten rechtwinklig zum Schichtverlauf in der Tendenz eine höhere Standardabweichung sowie höhere Druckfestigkeit erkannt werden. Dieser Effekt tritt insbesondere noch stärker für das Partikelbett Rez4-32 sowie bei hoher Stabilisiererdosierung auf. Eine Erklärung könnte in dem seriellen und parallelen Verbund zwischen den einzelnen porösen Schichten liegen (vgl. Abbildung 31(a) – roter Bereich), welche eine Schwachstelle darstellen. Bei einer Druckfestigkeitsprüfung rechtwinklig zum Schichtverlauf können diese porösen Bereiche zu einem Versagen der gesamten Probe führen. Aufgrund des Abbruchkriteriums bei Druckfestigkeitsprüfungen wurde eine mögliche erneute Zunahme der Kraft aufgrund einer vollständigen Überdrückung des porösen Bereichs nicht erfasst. Denkbar wäre aber, dass sich nach einer vollständigen Überdrückung des porösen Bereichs eine Phase mit erneutem Kraftanstieg anschließt. (Mai et al. 2021)

Belastungen parallel zum Schichtverlauf erzielen höhere Druckfestigkeiten, da hierbei die Kraft vermutlich in dem zusammenhängenden Gefüge aus Feinkornbeton und Gesteinskörnung abgetragen werden kann (vgl. Abbildung 31(a) – grauer Bereich). (Mai et al. 2021)

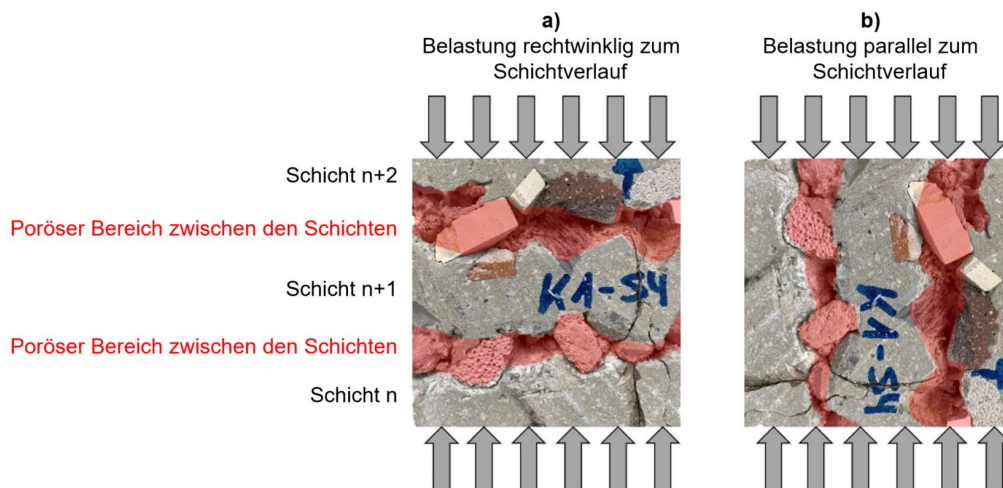


Abbildung 31: Schichtorientierung in den Druckfestigkeitsproben (Partikelbett Rez16-32, ST0,1_FM0,5) für (a) Belastung rechtwinklig zum Schichtverlauf und b) Belastung parallel zum Schichtverlauf - poröse Bereiche zwischen den Schichten sind rot markiert.

6.5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchungsreihe U1 (Rheologiestudie) zeigen, dass eine gute Eindringung des Feinkornbetons in das Partikelbett zu einem homogenen Gefüge in den LP3DCP-Proben führen, welches eine höhere Druckfestigkeit als die konventionell hergestellten Proben erzielen kann (z.B. ST0,0-FM0,4). Weisen die LP3DCP-Proben hingegen ein heterogenes Gefüge aufgrund von Hohlräumen in oder zwischen den Schichten auf, führt dies im Vergleich zu den konventionell hergestellten Proben zu einer starken Reduzierung der Druckfestigkeit sowie zu einer ausgeprägten Anisotropie.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse scheint das Partikelbett Rez16-32 mit einem größeren Kleinstkorn im Vergleich zu Rez4-32 für das LP3DCP-Verfahren besser geeignet zu sein. Feinkornbetone mit Stabilisiererdosierungen von weniger als 0,1 % führen zu deutlich geringeren Hohlräumen und somit zu guten mechanischen Eigenschaften.

7 Untersuchungsreihe U2: Einfluss aus veränderlichen Prozessparametern

Ziel der Untersuchungsreihe U2 ist es, eine Feinkornbetonrezeptur F1 mit einem reduzierten Zementgehalt durch Erhöhung des Kalksteinmehlanteils zu entwickeln (vgl. Tabelle 2). Dabei soll die reine Feinkornbetonrezeptur F1 mindestens eine Würfeldruckfestigkeit von 40 N/mm² erzielen und das ABM im Bereich der Feinkornbetonrezeptur F0 liegen (ABM F0: 300 und F1: 270 mm, vgl. Tabelle 2). Hierfür wird basierend auf der Feinkornbetonrezeptur F0 der Kalksteinmehlanteil von 97 kg auf 270 kg erhöht und entsprechend der Zementanteil von 600 kg auf 415 kg je m³ Feinkornbeton reduziert. Unter Berücksichtigung einer üblichen Porosität eines Partikelbetts (beispielsweise 0,42) wird mit der Feinkornrezeptur F1 für die Herstellung von einem m³ LP3DCP-Beton dann 174 kg Zement benötigt. Außerdem erfolgt mit der Untersuchungsreihe U2 der Wechsel zu der großmaßstäblichen Versuchseinrichtung DBFL, wodurch weitere Anforderungen hinsichtlich einer robusten Rheologie über die Zeit an den Feinkornbeton entstehen. Aufgrund prozessbedingter Wartezeiten muss der Feinkornbeton bis zu 45 min die gleiche Rheologie aufweisen. In einem ersten Versuch wird unter Verwendung der kalksteinmehlreduzierten Feinkornbetonrezeptur F1 der Einfluss der Variation der Prozessparameter (Luft- und Betonvolumenstrom) an der großmaßstäblichen Versuchseinrichtung DBFL untersucht.

7.1 Charakterisierung der Partikelbetten

In Tabelle 6 sind Partikelbettkennwerte für die beiden Basalt-Partikelbetten Bas16-32 und Bas32-64 gezeigt (vgl. Tabelle 1: C und D). Dabei kann die Kornform einen Einfluss auf das Eindringverhalten des Feinkornbetons in ein Partikelbett besitzen, wonach ein hoher Formbeiwert ψ_c sowie Sphärizität S mit einem einfacheren Eindringen des Fluids in das Partikelbett in Zusammenhang gebracht werden kann (Weger et al. 2021). Die beiden Basalt-Partikelbetten weisen dabei eine eher geringere Sphärizität S und Formbeiwert ψ_c auf, sodass diese eher als plattig und wenig rund eingestuft werden können. Die Bestimmung der Kornform erfolgt dabei ausschließlich in der Draufsicht (vgl. Abbildung 32(a): die Form des Partikels aufgrund der natürlichen Lage mit der Analogie: eine Münze legt sich eher flach hin). Die seitliche Betrachtung der Partikel zeigt aber insbesondere für das Partikelbett Bas16-32 auch in diese Richtung ein plattige Kornform auf (vgl. Abbildung 32(b)).

Anmerkung: Im Verlauf der Bearbeitung hat sich gezeigt, dass sich das Zusägen der Proben mit der Basalt-Gesteinskörnung als äußerst schwierig erweist. Aufgrund dessen werden für die nachfolgenden Untersuchungsreihen die Partikelbetten E bis G eingesetzt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 6

Kennwerte der Basalt-Partikelbetten Bas16-32 und Bas32-64: mittlere längste Partikellänge L , Packungsdichte φ_s , Porosität ϵ , Sphärizität S und Formbeiwert ψ_c

Partikelbettart	L [mm]	φ_s [-]	ϵ [-]	S [-]	ψ_c
Bas16-32	46,7	0,57	0,43	0,77	0,71
Bas32-64	66,3	0,58	0,42	0,75	0,76

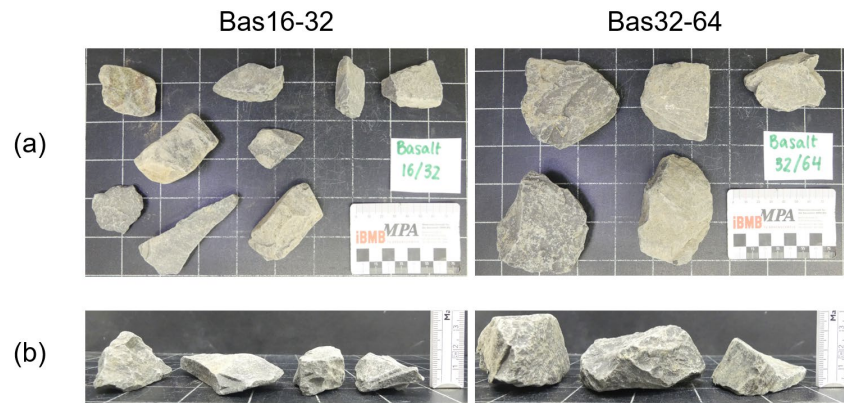


Abbildung 32: Darstellung der Partikelbetten als (a) Draufsicht und (b) Seitenansicht für die Partikelbetten Bas16-32 (links) und Bas32-64 (rechts)

7.2 Rheologische Untersuchungen

Ziel der Entwicklung der Feinkornbetonrezeptur F1 ist es, eine ähnliche Fließfähigkeit wie die Feinkornbetonrezeptur F0 zu erreichen. Zum Vergleich wird hierfür direkt nach dem Anmischen der Feinkornbetone das Ausbreitmaß geprüft. Entsprechend der Abbildung 33 kann gezeigt werden, dass trotz Veränderung der Rezeptur das Ausbreitmaß und somit die Fließfähigkeit beider Rezepturen im vergleichbaren Bereich liegen. Daneben muss der Feinkornbeton für eine robuste Anwendung in einer großmaßstäblichen Versuchseinrichtung und den hieraus entstehenden prozessbedingten Wartezeiten gleichbleibende rheologische Kennwerte über eine bestimmte Zeit aufweisen. Wichtig ist das insbesondere dann, wenn es während der Herstellung zu prozessbedingten Wartezeiten kommt. Für eine erfolgreiche Prozessanwendung sollte das Druckergebnis und somit die Rheologie des Feinkornbetons auch nach einer Wartezeit von beispielsweise 45 min vergleichbar bleiben. Zur Prüfung der rheologischen Robustheit über die Zeit wird das Ausbreitmaß somit nicht nur direkt dem Anmischen geprüft, sondern etwa alle 7 bis 10 Minuten im Zeitraum von mindestens 45 Minuten. Hierbei zeigt sich, dass die beiden Rezepturen über die Zeit eine Zunahme der Fließfähigkeit aufweisen.

Anmerkung: Aufgrund der geringen rheologischen Robustheit über die Zeit wird für die nachfolgenden Untersuchungsreihen die Feinkornbetonrezeptur F1 zu einem über die Zeit rheologisch robusteren Feinkornbeton F2 – F4 weiterentwickelt.

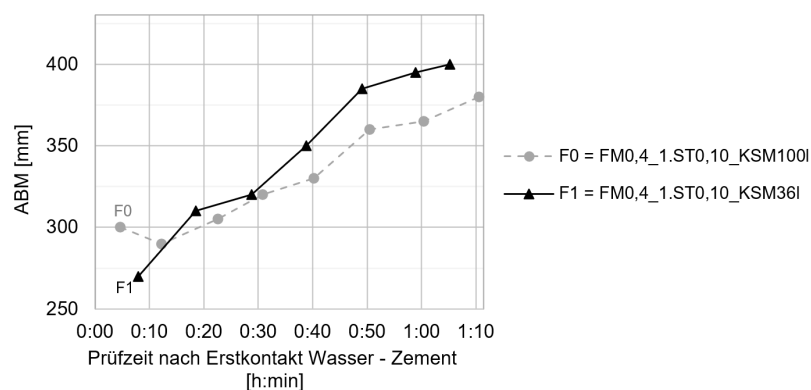


Abbildung 33: Prüfung der gleichbleibenden rheologischen Kennwerte der Feinkornbetone über die Zeit mittels des Ausbreitmaßes. Feinkornbeton F0 (grau Linie) mit einem Kalksteinmehlanteil von 100l und Feinkornbeton F1 (schwarze Linie) mit einem Kalksteinmehlanteil (KSM) von 36l je m^3 Feinkornbeton. Herstellung erfolgt mit dem Stabilisierertyp 1(1.ST) und unter konstanter Fließmittel (FM)- und Stabilisiererdosierung (ST) von 0,4 M.-% sowie 0,1 M.-%.

7.3 Geometrie der hergestellten Streifen

In Abbildung 34 sind die Seitenansichten der Würfelprouben für die beiden Partikelbetten Bas16-32 und Bas32-64 in Abhängigkeit des Beton- und Luftvolumenstroms gezeigt. Eine qualitative Beurteilung des Gefüges zeigt für beide Partikelbetten, dass ein höherer Betonvolumenstrom con1,3 erkennbar zu einem homogeneren Gefüge mit wenigen oder keinen Luftporen – insbesondere zwischen den Schichten – führt (vgl. con0,6 vs. con1,3). Ein Einfluss des Luftvolumenstroms air30 sowie air40 auf das Gefüge lässt sich über die qualitative Beurteilung nicht ausreichend quantifizieren.

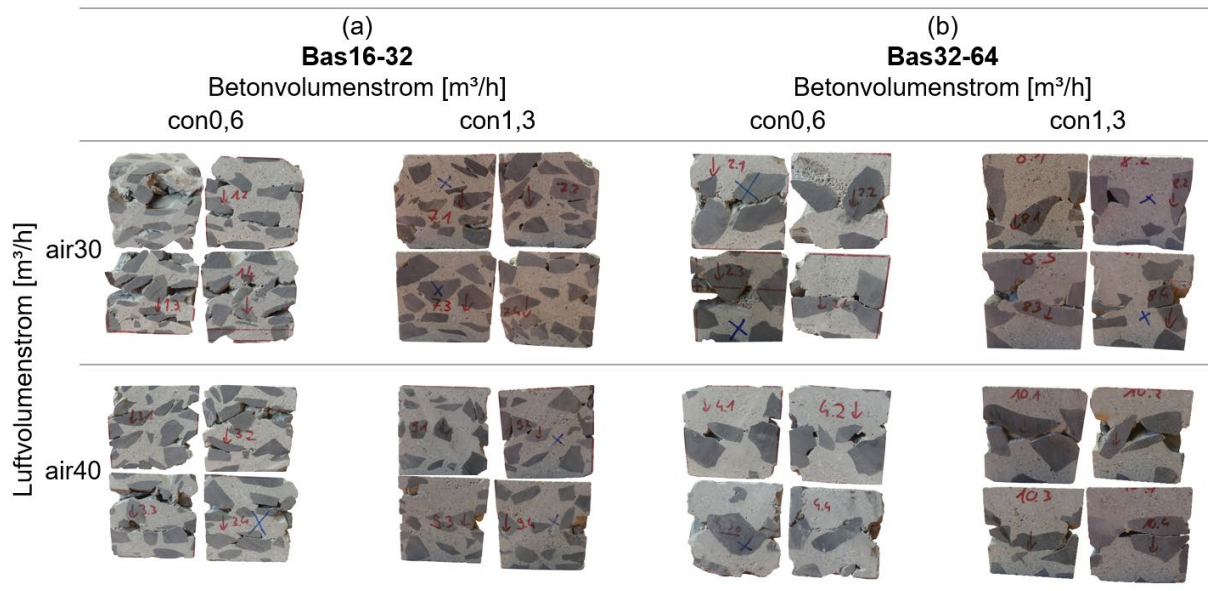


Abbildung 34: Seitenansicht der Würfelprouben für die beiden Partikelbetten (a) Bas16-32 und (b) Bas32-64 in Abhängigkeit des Betonvolumenstroms (con0,6; con1,3) sowie Luftvolumenstroms (air30; air40).

7.4 Würfeldruckfestigkeit

Konventionell hergestellte REF-Proben

In Abbildung 35 ist die REF-Würfeldruckfestigkeit (rechts) für konventionell hergestellte Würfelprouben mit nur Feinkornbeton (gestrichelte Umrandungslinie) sowie Würfelprouben mit Feinkornbeton und Gesteinskörnung (durchgezogene Umrandungslinie) dargestellt. Die Würfelprouben mit nur Feinkornbeton erzielt eine Würfeldruckfestigkeit von über 41,8 N/mm² und erfüllt somit die für diese Kampagne gewünschte Minimal-Würfeldruckfestigkeit von 40 N/mm². Wie erwartet führt die Rezepturanpassung mit einem größeren Kalksteinmehlanteil (F1) aber zu einer Abnahme der Festigkeiten im Vergleich zur Feinkornbetonrezeptur F0 (vgl. Abbildung 30 – bei gleicher Zusatzmitteldosierung: $f_{cm} > 60$ N/mm²). Werden die REF-Proben zusätzlich mit der entsprechenden Partikelbett-Gesteinskörnung hergestellt, so erzielen diese gleiche (vgl. Abbildung 35(a): Bas16-32) oder sogar höhere (vgl. Abbildung 35(b): Bas32-64) Würfeldruckfestigkeiten als die Würfeldruckfestigkeit mit reinem Feinkornbeton.

LP3DCP-Proben

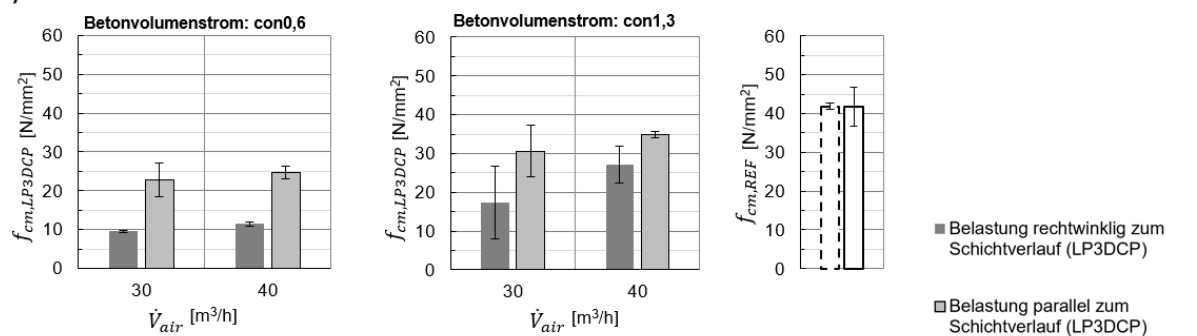
Außerdem sind in der Abbildung 35 die LP3DCP-Würfeldruckfestigkeiten (links, mitte) für die beiden Partikelbetten (a) Bas16-32 und (b) Bas32-64 in Abhängigkeit des Betonvolumenstroms (con0,6 (links) und con1,3 (mitte)) sowie des Luftvolumenstroms (air30; air40) dargestellt. Wie in der vorherigen Untersuchungsreihe erzielen unabhängig von den gewählten Partikelbetten und den Prozessparametern die Proben parallel zum Schichtverlauf höhere Würfeldruckfestigkeiten als die Proben rechtwinklig zum

Schichtverlauf. Die höheren Festigkeiten parallel zum Schichtverlauf könnten damit begründet werden, dass hierbei die Kraft in dem zusammenhängenden Gefüge aus Feinkornbeton und Gesteinskörnung abgetragen werden kann (vgl. Abbildung 31(b) – Parallelschaltung aus tragfähigen und weniger tragfähigen Bereichen, „Säulentragwirkung“). Bei Belastung rechtwinklig zum Schichtverlauf versagen zuerst die porösen, weniger gut gebunden Bereiche (vgl. Abbildung 31(a) – Reihenschaltung aus tragfähigen und weniger tragfähigen Bereichen).

Außerdem ist der Abbildung 35 zu entnehmen, dass unabhängig des Partikelbetts eine Erhöhung des Betonvolumenstroms zu einer Erhöhung der Würfeldruckfestigkeit führt. Zusätzlich führt zumindest für das Partikelbett Bas16-32 eine Zunahme des Luftvolumenstroms unabhängig der Belastungsrichtung (parallel, rechtwinklig zu Schichtausrichtung) zu leicht höheren Würfeldruckfestigkeit. Die Gründe hierfür könnten aufgrund der höheren Beschleunigung der Feinkornbetonpartikel in einer verbesserten Verdichtung des Feinkornbetons sowie besserer Ankopplung der Schichten liegen. Für das Partikelbett Bas32-64 kann hingegen kein klarer Trend erkannt werden. Der Grund hierfür könnte in den sehr großen Bas32-64-Partikeln liegen, welche den Feinkornbeton-Spritzkonus in großen Teilen ausfüllen. Damit würde der auftreffende Feinkornbeton und dessen kinetische Energie im Wesentlichen an den Partikeln abprallen und nur aufgrund der hohen Fließfähigkeit des Feinkornbetons F1 in das Partikelbett eindringen. Außerdem könnte die Prüfung aufgrund des Verhältnisses von Größtkorn (6,4 cm) zu Probenlänge (10 cm) zu Ergebnissen führen, die wenig repräsentativ und damit nicht mehr aussagekräftig sind.

Da im Rahmen dieser Untersuchungsreihe aber keine Untersuchungen hinsichtlich des Eindringverhaltens durchgeführt wurden, wird für eine weiterführende Interpretation und Erklärung auf die nachfolgende Untersuchungsreihe verwiesen.

(a) Bas16-32



(b) Bas32-64

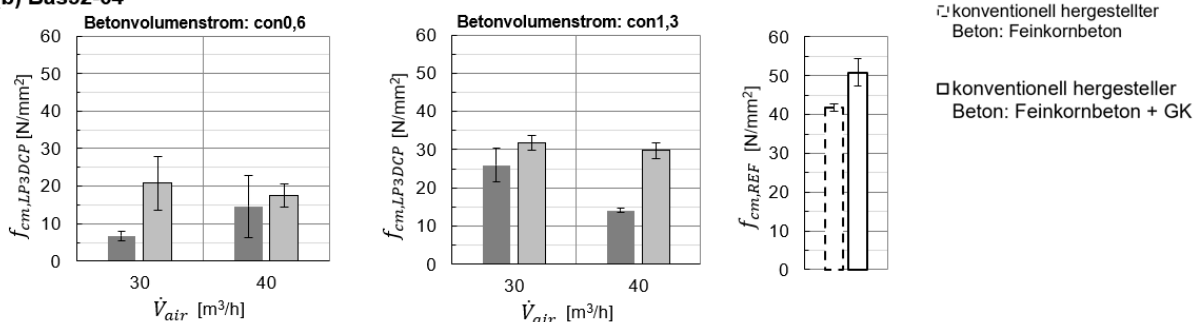


Abbildung 35: Würfeldruckfestigkeit der LP3DCP- und konventionell hergestellten REF-Proben für die beiden Partikelbetten (a) Bas16-32 und (b) Bas32-64 in Abhängigkeit des Betonvolumenstroms con0,6 (links) und 1,3 (rechts) sowie des Luftvolumenstroms (air30; air40), Belastung rechtwinklig zum LP3DCP-Schichtverlauf (dunkelgrau), parallel zum LP3DCP-Schichtverlauf (hellgrau), für konventionell hergestellten REF-Beton ohne Gesteinskörnung (gestrichelte schwarze Linie) und für konventionell hergestellte REF-Beton mit Gesteinskörnung (GK) (durchgezogene schwarze Linie)

7.5 Isotropie

In Abbildung 36 ist die Isotropie I der LP3DCP-Proben nach GL 8 für die beiden Partikelbetten (a) Bas16-32 und (b) Bas32-64 in Abhängigkeit des Betonvolumenstroms (con0,6 (links) und con1,3 (rechts)) sowie des Luftvolumenstroms (air30; air40) dargestellt. Je größer die Isotropie I ist, desto unabhängiger ist die Würfeldruckfestigkeit von der Prüfrichtung (parallel vs. rechtwinklig zu Schichtverlauf). Wie bereits für die Würfeldruckfestigkeit kann auch hier für das Partikelbett Bas 16-32 ein positiver Einfluss aus einem höheren Beton- und Luftvolumenstrom erkannt werden. Wie bereits bei der Druckfestigkeit festgestellt, ist auch bei der Isotropie für das Partikelbett Bas32-64 kein eindeutiger Trend hinsichtlich eines Einflusses des Luftvolumenstroms erkennbar. Wie zuvor muss aufgrund fehlender Untersuchungen zum Eindringverhalten auf eine weiterführende Interpretation auf die nachfolgende Untersuchungsreihe verwiesen werden.

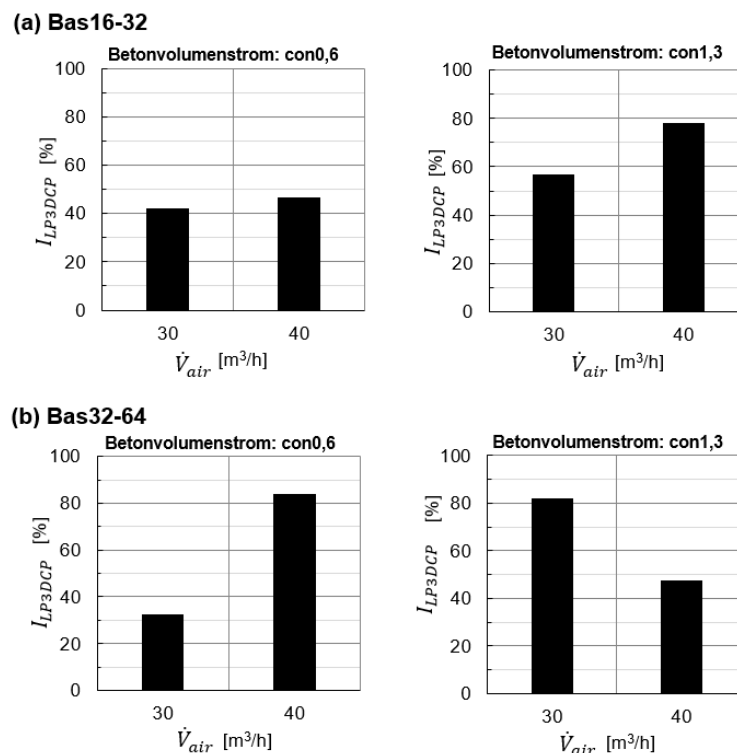


Abbildung 36: Isotropie der LP3DCP-Proben für die beiden Partikelbetten (a) Bas16-32 und (b) Bas32-64 in Abhängigkeit des Betonvolumenstroms con0,6 (links) und con1,3 (rechts) sowie des Luftvolumenstroms (air30; air40).

7.6 Zusammenfassung

Bereits die Untersuchungsreihe U1 zeigt, dass die Rheologie einen erheblichen Einfluss auf das Gefüge und die Festigkeit der LP3DCP-Betone besitzt und das Eindringverhalten in das Partikelbett die mechanischen Eigenschaften der LP3DCP-Körper wesentlich beeinflusst. Dabei konnte gezeigt werden, dass ein höherer Luftvolumenstrom und damit eine Erhöhung der Betonvolumengeschwindigkeit bei feineren Partikelbetten zwischen 16 und 32 mm aufgrund eines vermutlich besseren Eindringverhaltens zu einer Zunahme der Festigkeit führt. Zudem zeigten die Untersuchungen, dass für eine industrielle Fertigung an großmaßstäblichen Einrichtungen eine Feinkornrezeptur benötigt wird, welche ein rheologisch robustes Verhalten über die Zeit aufweisen kann. Das ist insbesondere für das LP3DCP-Verfahren wichtig, da Eindringverhalten und Festigkeit des LP3DCP-Betons stark von der Eindringfähigkeit des Feinkornbetons in das Partikelbett abhängen. Eine variierende Rheologie über die Zeit hätte eine variierende Qualität des LP3DCP-Betons zur Folge. Außerdem sollte die Materialauswahl des Partikelbetts unter Beachtung des Anwendungsgebiets erfolgen. Insbesondere bei nachgelagerten

Nachbearbeitungsschritten, wie z.B. Fräsarbeiten, sollte wegen der schnelleren Bearbeitungszeit unbedingt ein weiches Gesteinskorn als Basalt gewählt werden.

Außerdem konnte die Untersuchungsreihe U2 zeigen, dass die LP3DCP-Festbetoneigenschaften von den Prozessparametern beeinflusst sein können. Hiernach führt zumindest für das Partikelbett Bas16-32 eine Zunahme des Beton- wie auch Luftvolumenstroms zu besseren Festbetoneigenschaften. Für das Partikelbett Bas32-64 kann dies jedoch so nicht gezeigt werden. Das könnte jedoch an dem Verhältnis von Spritzkonus zu Partikelgröße liegen, sodass der Feinkornbeton beim Auftreffen auf das Partikelbett Bas32-64 stärker rückprallt und weniger in das Partikelbett eindringen kann.

8 Untersuchungsreihe U3: Einfluss aus veränderlicher Feinkornbetonrheologie & Prozessparametern

8.1 Charakterisierung der Partikelbetten

In Abbildung 37 sind die Sieblinien der zwei Kalkstein-Partikelbetten KS8-32 und KS16-32 sowie des Rezyklat-Partikelbettes Rez16-32 dargestellt (entsprechend Tabelle 1 – Partikelbett E bis G). Wie zu erwarten, weist das Partikelbett KS8-32 im Vergleich zu den beiden Partikelbetten KS16-32 und Rez16-32 eine feinkörnigere Sieblinie auf (vgl. Abbildung 37 – kurz gestrichelte Linie). Die beiden Partikelbetten KS16-32 und Rez16-32 weisen gleichermaßen eine grobkörnige Sieblinie auf, wobei Rez16-32 einen etwas größeren groben Anteil (>32 mm) besitzt.

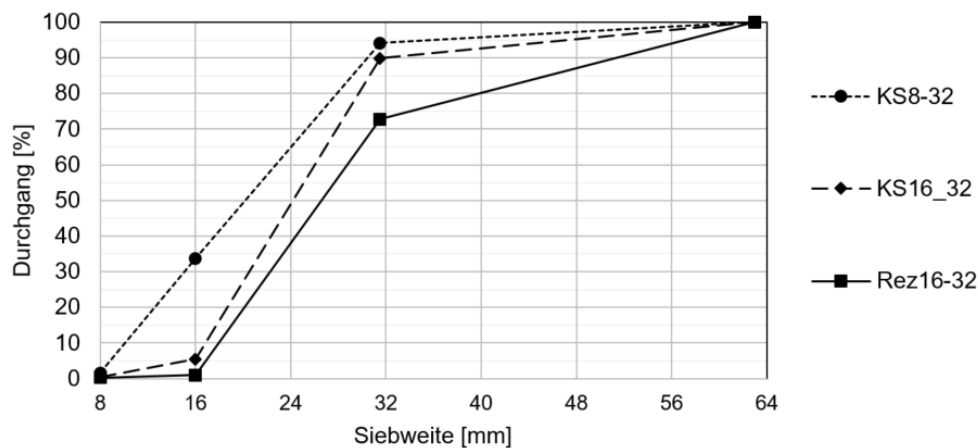


Abbildung 37: Sieblinien der zwei Kalkstein-Partikelbetten KS8-32 und KS16-32 sowie des Rezyklat-Partikelbettes Rez16-32

In Tabelle 7 sind die Partikelkennwerte für die drei Partikelbetten aufgelistet. Entsprechend den Sieblinien nehmen die mittleren Korndurchmesser d_{50} von den Partikelbetten KS8-32, über KS16-32 bis zur Rez16-32 zu. Die beiden größeren Partikelbetten KS16-32 und Rez16-32 im Vergleich zu KS8-32 besitzen eine marginal höhere Packungsdichte φ_s (und entsprechend eine geringere Porosität ϵ). Die spezifische Partikeloberfläche A_{spez} nimmt mit zunehmendem mittleren Korndurchmesser d_{50} zu, wobei eine größere spezifische Partikeloberfläche mit einem zunehmenden Fließwiderstand beim Eindringen von Fluiden in ein Partikelbett assoziiert wird (Weger et al. 2021). Demnach weist das Partikelbett KS8-32 den größten und Rez16-32 den geringsten Fließwiderstand auf. Außerdem steigt mit abnehmender spezifischer Partikeloberfläche A_{spez} sowie Packungsdichte φ_s der äquivalente Porenradius. Hiernach besitzt das Partikelbett Rez16-32 den größten äquivalenten Porenradius R_{pore} , in welchen der Feinkornbeton mit einem Größtkorn von 3,15 mm einfacher eindringen kann.

Die Kornform kann zudem einen Einfluss auf das Eindringverhalten des Feinkornbetons in ein Partikelbett besitzen, wonach ein hoher Formbeiwert ψ_c sowie Sphärizität S mit einem einfacheren Eindringen des Fluids in das Partikelbett in Zusammenhang gebracht werden kann (Weger et al. 2021). Demnach weist das Rezyklat-Partikelbett den größten Formbeiwert ψ_c und Sphärizität S auf, was mit einer geringeren Plattigkeit sowie größeren Rundheit assoziiert werden kann (vgl. Abbildung 38(a)). Dabei beschreibt der hier ermittelte Formbeiwert ψ_c und Sphärizität S die Kornform in der Draufsicht (nur im 2D) und entspricht der Form des Partikels aufgrund der natürlichen Lage (Analogie: eine Münze legt sich flach hin). Werden die Partikel zusätzlich noch von der Seite betrachtet (vgl. Abbildung 38(b)), kann auch dort visuell eine geringere Plattigkeit für das Rezyklat-Partikelbett erkannt werden. Dies erklärt auch die höchste längste Partikellänge L des Kalkstein-Partikelbettes KS16-32 (Analogie: eine Spaghetti wird länglich durch ein Sieb rutschen), obwohl der mittlere Korndurchmesser d_{50} geringer ist

als beim Rezyklat-Partikelbett. Die längste Partikellänge L könnte dabei eine Rolle bei der Verknüpfung von ungebundenen zu gebundenen Teilbereichen innerhalb des LP3DCP-Querschnitts spielen.

Tabelle 7

Kennwerte der Kalkstein-Partikelbetten KS8-32 und KS16-32 sowie des Rezyklat-Partikelbett Rez16-32: mittlerer Korndurchmesser d_{50} , mittlere längste Partikellänge L , Sphärizität S , Formbeiwert ψ_c , Packungsdichte φ_s , Porosität ϵ , spezifische Partikeloberfläche und äquivalenter Porenradius R_{pore}

Partikelbettart	d_{50} [mm]	L [mm]	φ_s [-]	ϵ [-]	A_{spez} [cm ² /g]	R_{pore} [mm]	S [-]	ψ_c
KS8-32	20,2	34,6	0,57	0,43	1,12	5,08	0,79	0,74
KS16-32	24,2	42,4	0,59	0,41	0,94	5,63	0,91	0,73
Rez16-32	26,6	41,7	0,59	0,41	0,88	6,11	0,94	0,77

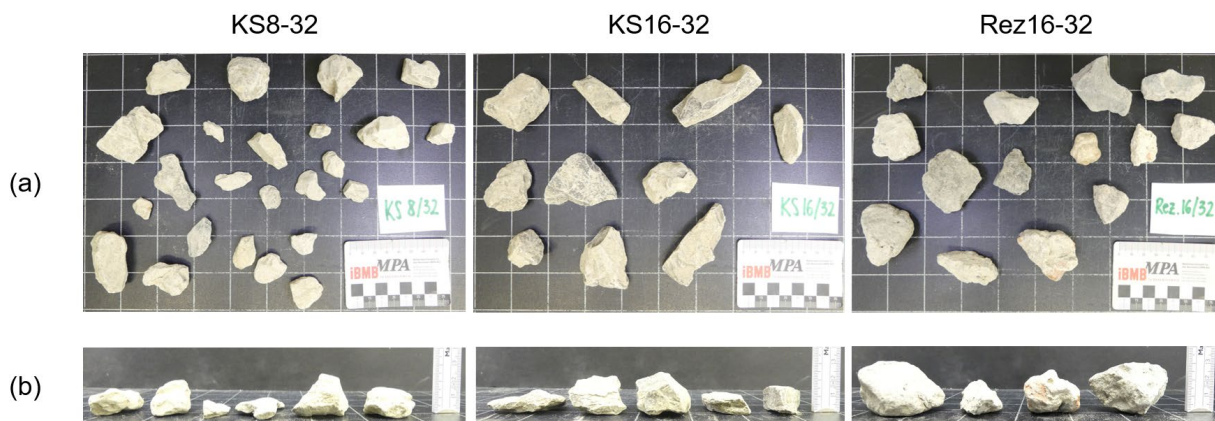


Abbildung 38: Darstellung der Partikelbetten als (a) Draufsicht und (b) Seitenansicht für die Partikelbetten KS8-32 (links), KS16-32 (mitte) und Rez16-32 (rechts)

Außerdem kann in Abhängigkeit der Kennwerte des Partikelbetts der Partikelbettoberfläche eine spezifische Oberflächenrauigkeit zugesprochen werden, wobei eine hohe spezifische Oberflächenrauigkeit zu einer Abnahme des oberflächlichen, lateralen Fließverhalten führen könnte. Entsprechend Abbildung 39 legen sich die plattigen Kalkstein-Partikel dabei eher länglich hin, wodurch sich kleinere und weniger tiefe Bereiche entwickeln, die zur Oberflächenrauigkeit beitragen. Die Rezyklat-Partikel weisen hingegen aufgrund der sehr großen sowie runden Partikelform deutliche größere wie auch tiefere Bereiche auf, welche zu einer Erhöhung der Oberflächenrauigkeit beitragen. Somit wird eine Zunahme der spezifischen Oberflächenrauigkeit von $KS8-32 < KS16-32 < Rez16-32$ angenommen.

Demnach könnte das Rezyklat-Partikelbett somit den geringsten Fließwiderstand innerhalb des Partikelbetts und das Kalkstein-Partikelbett KS8-32 aufgrund der geringen Oberflächenrauigkeit den geringsten Fließwiderstand auf der Partikeloberfläche aufweisen.

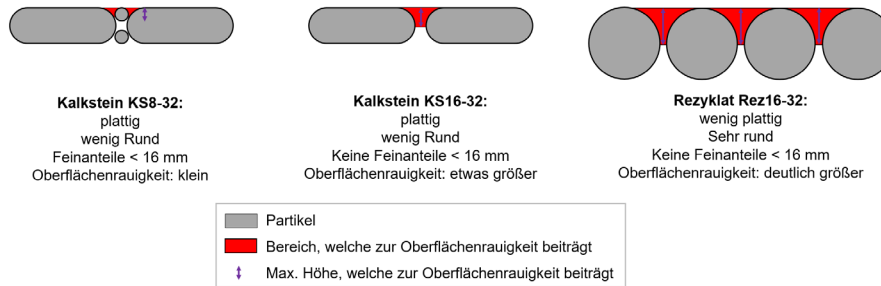


Abbildung 39: Schematische Darstellung der Oberflächenrauigkeit für die drei Partikelbetten KS8-32 (links), KS16-32 (mitte) und Rez16-32 (rechts)

In Abbildung 40 sind für die drei Partikelbetten KS8-32, KS16-32 und Rez16-32 die Entwicklung der Porosität vom untersten (1) bis zum obersten Layer (6) gezeigt. Alle Partikelbetten weisen insbesondere in den untersten beiden Layer eine deutlich höhere Porosität auf und nähern sich ab dem dritten Layer einem finalen Porositäts-Wert an. Der erste Layer wird dabei auf eine Schalungsfläche eingebaut und die Gesteinskörnung kann sich nicht frei legen (Wandeffekt), wobei sich dieser Wand-Effekt bis zum zweiten Layer ausweitet. Ab der dritten Schicht scheinen sich die Porositäts-Wert für alle drei Partikelbetten zu stabilisieren. Daher wurden zur Ermittlung der Packungsdichte sowie Porosität und für die weitere Berechnungen nur die Layer drei bis sechs verwendet (vgl. Tabelle 1).

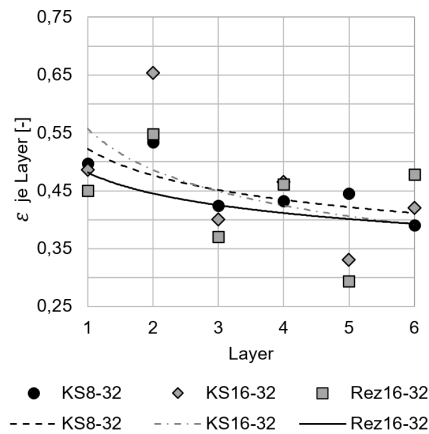


Abbildung 40: Porosität je Layer für die Partikelbetten KS8-32 (schwarzer Kreis und schwarz gestrichelte Linie), KS16-32 (grauer Diamant und graue Punkt-Strichellinie) und Rez16-32 (graues Rechteck und schwarze Linie). Layer 1 = erster, unterster aufgebraute Layer und Layer 6 = oberster, letzter aufgebraute Layer

8.2 Rheologische Untersuchungen

Entwicklung eines Feinkornbetons mit über die Zeit gleichbleibenden rheologischen Kennwerten (bestimmt über das Ausbreitmaß)

Aufgrund der Erkenntnisse der Untersuchungsreihe U2 soll der Feinkornbeton bei Anwendung in einer großmaßstäblichen Versuchseinrichtung eine robuste Rheologie über die Zeit aufweisen. Insbesondere bei prozessbedingten Wartezeiten soll der Feinkornbeton auch nach 45 Minuten eine konstante Rheologie aufweisen, sodass die Abweichung des Ausbreitmaßes innerhalb von 45 Minuten im Bereich von ± 20 mm vom mittleren Ausbreitmaß liegt. Basierend auf der Feinkornbetonrezeptur F1 aus den vorherigen Untersuchungsreihen (vgl. Abbildung 41 – graue Linien) werden entsprechend den genannten Anforderungen die Feinkornbetonrezeptur F2 bis F4 entwickelt.

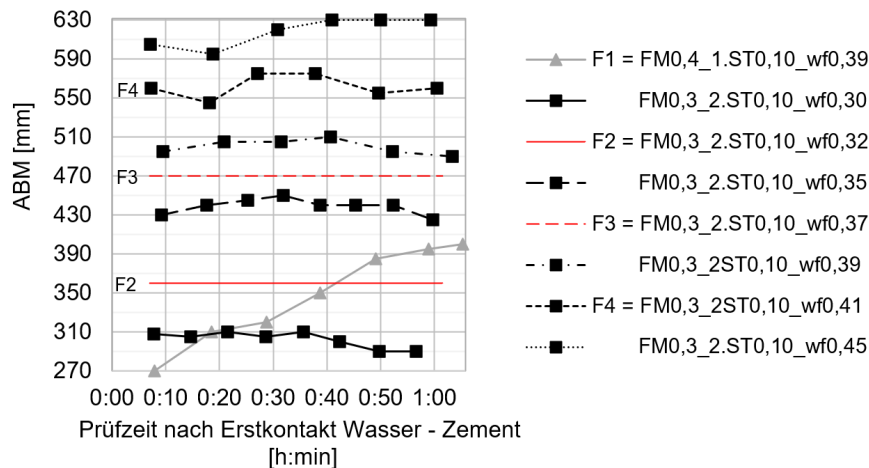


Abbildung 41: Prüfung der gleichbleibenden rheologischen Kennwerte der Feinkornbetone über die Zeit mittels des Ausbreitmaßes. Feinkornbeton F1 (graue Linie – aus Untersuchungsreihe U2) mit dem Stabilisierertyp 1(1.ST). Weiterentwicklung der Feinkornbetonrezeptur mit Stabilisierertyp 2 (2.ST) unter konstanter Fließmittel (FM)- und Stabilisiererdosierung (ST) von 0,3 M.-% sowie 0,1 M.-%. Variation der rheologischen Eigenschaften durch Anpassung des Wasser/Feinstoffwerts (wf) (schwarze Linien). Definition der Feinkornbetone F2 und F3 (rote Linie – nur systematisch dargestellt) sowie F4 (schwarze Linie).

Hierfür wird in einem ersten Schritt der Stabilisierertyp 2 (2.ST) eingesetzt und systematisch die Fließmittel- (FM zwischen 0,05 & 0,15 M.-%) und die Stabilisiererdosierung (zwischen 0,2 & 0,4 M.-%) variiert. Hierbei erweisen sich die rheologischen Kennwerte für eine Fließmittel- und Stabilisiererdosierung von 0,3 M.-% sowie 0,1 M.-% als über die Zeit als besonders robust. Zur Einstellung der Rheologie wird in einem zweiten Schritt unter konstanten Zusatzmitteln der Wasser zu Feinstoffwert (wf) systematisch variiert (vgl. Abbildung 41 – schwarze Linien). Entsprechend den Vorerfahrungen aus der Untersuchungsreihe U2 hinsichtlich geeigneten Fließfähigkeiten (in Abhängigkeit des ABM) der Feinkornbetone werden schlussendlich die drei Feinkornbetonrezepturen F2 – F4 für die weiterführenden Untersuchungen am DFBL definiert. Die Konsistenzen von F2 und F3 sind lediglich abgeschätzt, weswegen diese nur systematisch in Abbildung 41 (rote Linie) dargestellt werden.

Rheologische Charakterisierung der Feinkornbetone mit dem ICAR-Rheometer

In Abbildung 42(a) sind die Fließkurven und in der Abbildung 42(b) sowie (c) die Fließgrenze und Viskosität der Feinkornbetone F2 bis F4 gezeigt. Entsprechend der Fließkurven weisen alle Feinkornbetone einen lineareren Zusammenhang zwischen Schubspannung und Scherrate und somit ein viskoelastisches Verhalten auf. Mit zunehmendem Wasser/Feinstoffwert, daher zunehmende Wassermenge, sinken sowohl die Fließgrenze als auch Viskosität ab, was ebenfalls von (Wallevik und Wallevik 2011; Sonebi und Feys 2024) festgestellt wurde. Trotz gleichem ABM wie beim Feinkornbeton F1 lässt sich der Feinkornbeton F2 in der Praxisanwendung nicht pumpen und kann daher im weiteren Verlauf nicht weiter berücksichtigt werden. Der Grund für das unterschiedliche Verhalten könnte darin liegen, dass der Feinkornbeton F2 aufgrund einer deutlich höheren Viskosität bei den während des Pumpprozesses entstehenden Scherraten eine größere Scherspannung entwickelt und somit eine höhere Pumpleistung benötigen würde. Das Testen des Ausbreitmaßes ABM entspricht hingegen sehr niedrigen Scherraten, sodass dort vor allem der Anteil aus der Fließgrenze die Scherspannungsentwicklung beeinflusst.

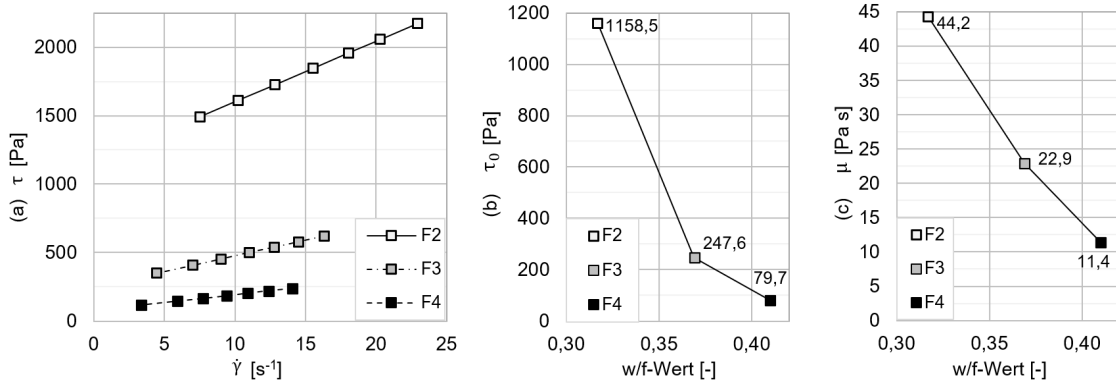


Abbildung 42: Rheologische Charakterisierung der Feinkornbetone F1 – F4 mittels dem ICAR Plus Rheometer – Entnahme direkt aus dem Mischer: (a) Fließkurven und (b) Fließgrenze τ_0 und (c) Viskosität μ in Abhängigkeit eines variierenden Wasser-Feinstoffwerts (wf) sowie konstanter Fließmittel- & Stabilisiererdosierung. Der F2 erweist sich als nicht pumpbar.

Im Verlauf der Untersuchung hat sich gezeigt, dass der Feinkornbeton F2 trotz eines mit den vorherigen Untersuchungsreihen übereinstimmenden Ausbreitmaßes nicht pumpbar war und sich somit nicht für die Anwendung im LP3DCP-Prozess eignete. Zudem hat sich der Feinkornbeton F4 im Vergleich zu F3 aufgrund seiner sehr fließfähigen Konsistenz als deutlich vielversprechender hinsichtlich des Eindringverhaltens und der Festbetoneigenschaften erwiesen. Aus diesem Grund wurde in den nachfolgenden Untersuchungsreihen der Fokus auf den Feinkornbeton F4 gelegt.

Einfluss des Spritzprozesses auf die Penetrometer-Fließgrenze

Mit der Penetrometeruntersuchung wird die initiale Fließgrenze sowie die Entwicklung der Fließgrenze am gespritzten Material über die Zeit ermittelt und kann zur Interpretation des Eindringprozesses der Feinkornbetone in das Partikelbett verwendet werden. In Abbildung 43 ist die Entwicklung der Penetrometer-Fließgrenzen $\tau_{0,pen}$ in Abhängigkeit der Zeit für die Feinkornbetonvariante F4 (fließfähiger) für unterschiedliche Luft (air)- sowie Betonvolumenströme (con) gezeigt. Zu erkennen ist, dass ein niedriger Luftvolumenstrom (air30) oder hoher Betonvolumenstrom con1,0, d.h. eine Abnahme der kinetischen Beschleunigung der Partikel, zu einer Abnahme der Fließgrenze führt (vgl. Abbildung 43(a) – bspw. durchgezogene schwarze Linien vs. gestrichelte schwarze Linie).

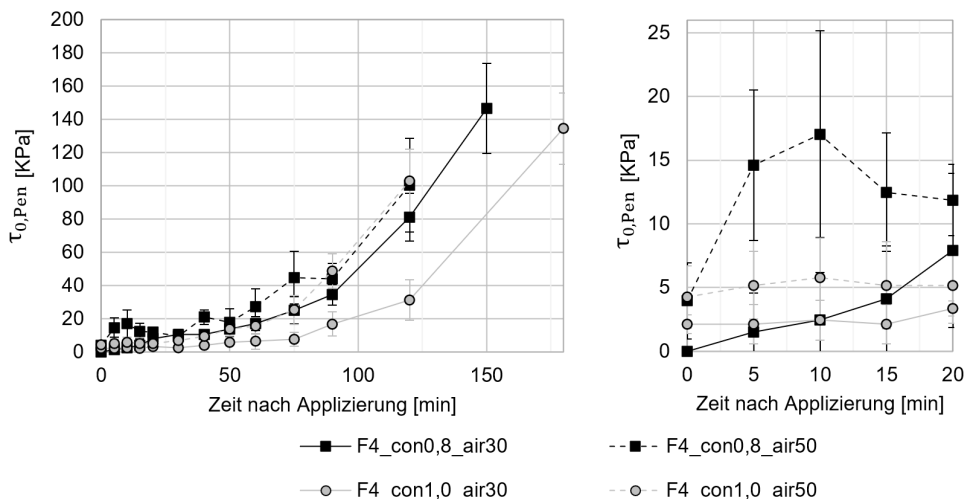


Abbildung 43: Charakterisierung der Penetrometer-Fließgrenze $\tau_{0,pen}$ des Feinkornbetons F4 in Abhängigkeit der Zeit nach Applizierung des Feinkornbetons auf dem Partikelbett für variierenden Luft (air)- und Betonvolumenstrom (con) für (links) den gesamten Auswertungszeitraum und (rechts) die ersten 20 Minuten.

Die Applizierung des Feinkornbetons und der Einbau der nachfolgenden Partikelschicht erfolgt in der Regel innerhalb der ersten 10 Minuten nach Applizierung des Feinkornbetons. Daher wird zudem in Abbildung 44(a) die initiale-10 min-Fließgrenze $\tau_{0,pen,it,10min}$ für den Feinkornbeton F4 betrachtet (d.h.

der Mittelwert der ersten drei Messwerte – vgl. Abbildung 43(b)). Auch hier führt unabhängig des Betonvolumenstroms ein geringer Luftvolumenstrom (air30) zu einer niedrigen initialen-10 min-Fließgrenze $\tau_{o, Pen, it, 10min}$. Je mehr Luft (air50) im Verhältnis zu Beton zu Verfügung steht (con0,8), d.h. je größer die kinetische Beschleunigung der Partikel, desto größer ist der Anstieg der initialen-10 min-Fließgrenze $\tau_{o, Pen, it, 10min}$. Somit liegt bei den hier gewählten Prozessparameter-Settings zwischen der geringsten und höchsten Fließgrenze $\tau_{o, Pen, it, 10min}$ ein Faktor von > 6. Gleicher Zusammenhang lässt sich für die Geschwindigkeit des Strukturaufbaus $a_{st, 10min}$ innerhalb der ersten 10 Minuten feststellen (vgl. Abbildung 44(b)) (Strukturaufbau bezogen auf die initiale-0 min-Fließgrenze).

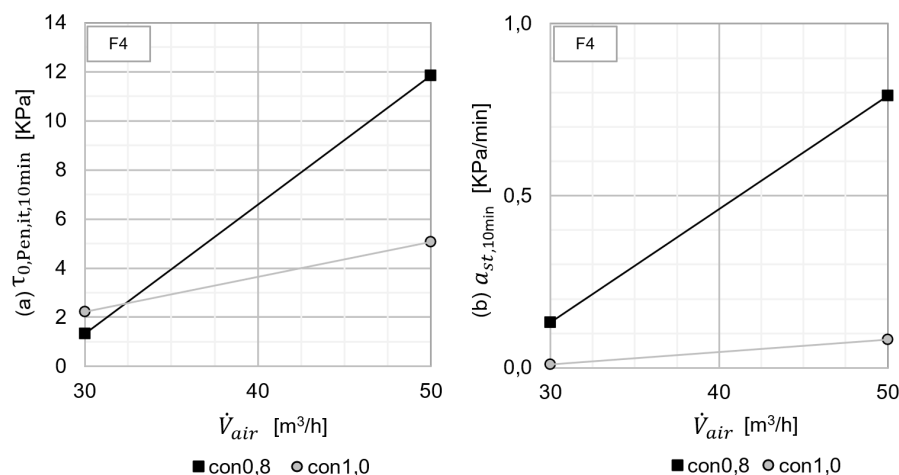


Abbildung 44: (a) Initiale 10 min-Penetrometer-Fließgrenze $\tau_{o, Pen, it, 10min}$ und (b) Geschwindigkeit des Strukturaufbaus $a_{st, 10min}$ innerhalb der ersten 10 min in Abhängigkeit des Luft- und Betonvolumenstroms (con) für den Feinkornbeton F4

Die initiale Rheologie des Feinkornbetons bei der Applizierung ist somit durch die gewählten Prozessparameter stark beeinflusst. Dabei wird der applizierte Feinkornbeton umso steifer, je mehr Luft zur Beschleunigung des Feinkornbetons zu Verfügung steht. Ein erhöhter Luftvolumenstrom führt zu einer zunehmenden Verdichtung sowie Konzentrierung der Gesteinskörnung innerhalb des mittleren Spritzkonusbereiches (Böhler et al. 2022; Freund et al. 2023; Böhler et al. 2023), infolgedessen kleinere durch Hydrationsprodukte zu überbrückende Abstände zwischen den einzelnen Partikel entstehen könnten (Kloft et al. 2020). Zudem könnte die während des Druckprozesses erhöhten Scherraten (pumpen, spritzen) und der an der Düse eingebrachte Luftdruck zu einer erhöhten Dispergierung (Aufreißen) der Feinkornbetonteile führen. Infolge der veränderte Mikrostruktur sowie Dispergierung des Feinkornbetons könnte eine beschleunigte Hydrationsentwicklung einsetzen (Salvador et al. 2016).

Einfluss des Spritzprozesses auf das Ausbreitmaß

Zur Verifizierung der Ergebnisse aus den Penetrometeruntersuchungen wird zusätzlich das Ausbreitmaß ABM_{SC3DP} nach dem Spritzprozess ermittelt. In Abbildung 45 ist das Ausbreitmaßes ABM_{SC3DP} für die beiden Feinkornbetone F3 und F4 sowie für den F4 zusätzlich für einen unterschiedlichen Luftvolumenstrom (air30; air50) dargestellt. Ein wesentlicher Unterschied bei der Ermittlung des ABM_{SC3DP} im Vergleich zu den Penetrometer-Fließgrenzen ist das deutlich größere Probenvolumen während der ABM-Beprobung. Entsprechend den Ergebnissen der rheologischen Untersuchungen mit dem ICAR Plus Rheometer (vgl. Abbildung 42) weist der F3 im Vergleich zum F4 eine zähere Konsistenz auf. Zudem führt bei dem F4 eine Erhöhung des Luftvolumenstroms zu einer Abnahme des ABM_{SC3DP} , d.h. der Feinkornbeton wird zäher. Dies entspricht den Ergebnissen aus der Ermittlung der Penetrometer-Fließgrenzen (vgl. Abbildung 43 & Abbildung 44).

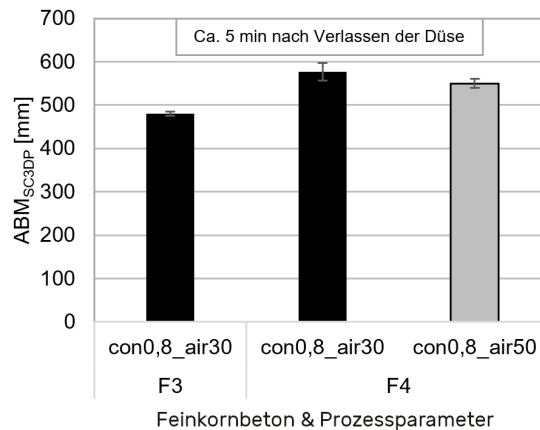


Abbildung 45: Ausbreitmaß ABM_{SC3DP} in Abhängigkeit der Feinkornbetone F3 und F4 sowie für F4 unter variierendem Luftvolumenstrom (air). Ermittelt nach ca. 5 Minuten nach Verlassen der SC3DP-Düse.

8.3 Einfluss auf die Verfahrgeschwindigkeit der Düse

Die Grundlage des hier untersuchten LP3DCP-Prozesses ist die Berechnung der Düsen-Verfahrgeschwindigkeit v_N nach GL 3. Im folgenden Abschnitt wird herausgearbeitet, welche Bestandteile der GL 3 in welchem Maße Einfluss auf die Düsen-Verfahrgeschwindigkeit besitzen. In Abbildung 46(a) ist die nach GL 3 berechneten Düsen-Verfahrgeschwindigkeit v_N in Abhängigkeit des Betonvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Luftvolumenstroms (air30 (durchgezogene dunkle Linien) und air50 (gestrichelte helle Linien) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich für den Feinkornbeton F3 im Vergleich zum F4 bei gleichem Betonvolumenstrom (con0,8) deutlich höhere Verfahrgeschwindigkeiten ergeben (vgl. Abbildung 46 – blau (7000-8000 m/min) vs. alle anderen Material-Prozessparameterkombinationen Farben (5000-6000 m/min)). Da der Feinkornbeton F3 aufgrund seiner zähen Konsistenz eine deutlich geringere Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche (vgl. Abbildung 51) erreicht, führt das über die GL 3 zu einer deutlich geringeren Düsen-Verfahrgeschwindigkeit. Eine Erhöhung des Betonvolumenstroms von 0,8 auf 1,0 m³/h (Erhöhung um 25 %) führt entsprechend der GL 3 zu einer Erhöhung der Verfahrgeschwindigkeiten um ca. 36 %, sodass immer so genügend Feinkornbeton aufgebracht wird, dass die Partikelschicht vollständig durchdrungen werden kann.

In Abbildung 46(b) ist der Einfluss der Porosität in Abhängigkeit der beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz), den drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32; KS16-32 & Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation des Luftvolumenstroms (air30 (offene Symbole); air50 (geschlossene Symbole)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene Linien); con1,0 (gestrichelte Linien)) gezeigt. Dabei führt eine Zunahme der Porosität zu einer Abnahme der Verfahrgeschwindigkeit, da eine höhere Porosität mit einem größeren mit Feinkornbeton zu füllenden Hohlraumvolumen einhergeht. Die Unterschiede der Düsen-Verfahrgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Partikelbetten lassen sich mit der unterschiedlich erzielten Porosität der Partikelbetten sowie applizierten Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche (vgl. Abbildung 51) erklären.

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass im Rahmen der hier untersuchten Material- und Prozessparameter der Betonvolumenstrom und die Rheologie des Feinkornbetons (was wiederum über die Spritzlayerbreite eingeht) maßgeblich die Düsen-Verfahrgeschwindigkeit v_N bestimmt, wohingegen die Porosität einen untergeordneten Einfluss besitzt.

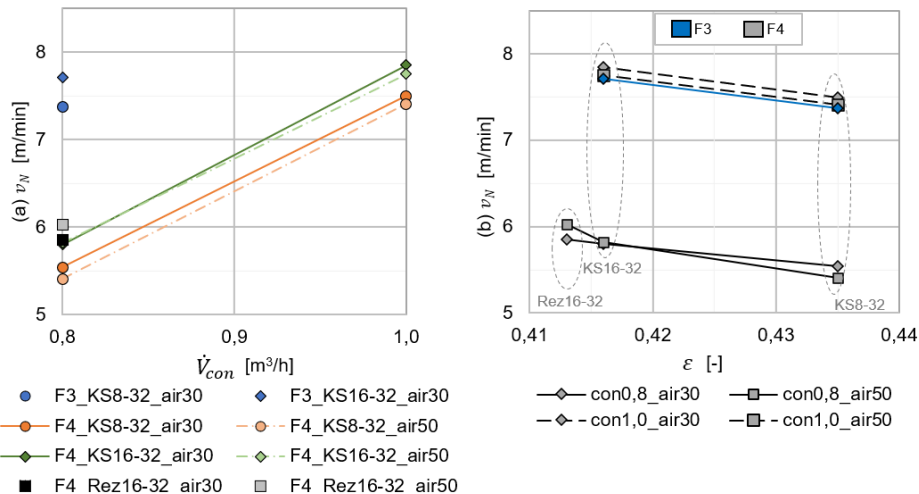


Abbildung 46: Düsens-Verfahrensgeschwindigkeit (berechnet nach GL 3): (a) In Abhängigkeit des Betonvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), der drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Luftvolumenstroms (air30 (durchgezogene Linien) und air50 (gestrichelte Linien)). (b) In Abhängigkeit der Porosität ϵ des Partikelbetts für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32; KS16-32 & Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene Linien); con1,0 (gestrichelte Linien))

8.4 Einflüsse auf die Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche

In die Berechnung der Düsens-Verfahrensgeschwindigkeit geht nach GL 3 die Spritzlayerbreite w_L auf der Partikeloberfläche ein. Für ein besseres Verständnis der Zusammenhänge insbesondere auch für das spätere Eindringverhalten wird im folgenden Abschnitt die Einflussparameter auf die Spritzlayerbreite w_L diskutiert.

Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:

In Abbildung 47 ist die applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange) sowie in Abhängigkeit der zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant)) für einen konstanten Beton- und Luftvolumenstrom dargestellt. Hiernach führt eine Zunahme der Fließgrenze und der Viskosität zu einer Abnahme der Spritzlayerbreite w_L . Nach (Dressler et al. 2020; Böhler et al. 2022; Lachmayer et al. 2023) nimmt beim SC3DP-Prozess mit zunehmender Beschleunigerdosierung die Spritzlayerbreite w_L aufgrund der zäheren Konsistenz und somit stärkeren Agglomeration der Partikel ab. Im Fall des Feinkornbetons F3 führt die ebenfalls zähere Konsistenz auch zu einer Verringerung der Spritzkonusbreite. Außerdem konnte während der Applizierung des fließfähigeren Feinkornbetons F4 auf dem Partikelbett zudem eine laterale Bewegung des Feinkornbetons über die Spritzkonusbreite hinaus erkannt werden (vgl. Abbildung 48(a)). Dabei werden zuerst die zentral unter dem Spritzkonus liegenden Porenräume des Partikelbetts gefüllt, bis diese vollständig gefüllt sind oder Gesteinskörnung ein weiteres Eindringen blockiert. Infolge der Blockierung sowie der Spritzstrahlkinetik stellt sich dann ein laterales Abfließen ein (vgl. Abbildung 48(a) - unten). Der Feinkornbeton F3 weist dabei nur ein geringes laterales Abfließen auf, was visuell während der Herstellung sowie an der kastenförmigen Ausprägung des aufgetragenen Feinkornbetons erkannt werden kann (vgl. Abbildung 48(a) - oben).

Unterstützt werden die hier erzielten Ergebnisse aus Erkenntnissen der Selective Paste Intrusion, d.h. das drucklose Applizieren von Zementleim auf einem Partikelbett, wonach die Spritzlayerbreite w_L mit steigender Fließgrenze τ_0 auch ansteigt (Weger et al. 2021). Demnach gilt dieser Zusammenhang weiterhin auch unter der beschleunigten Applizierung des Feinkornbetons, das im LP3DCP-Prozess vorliegt.

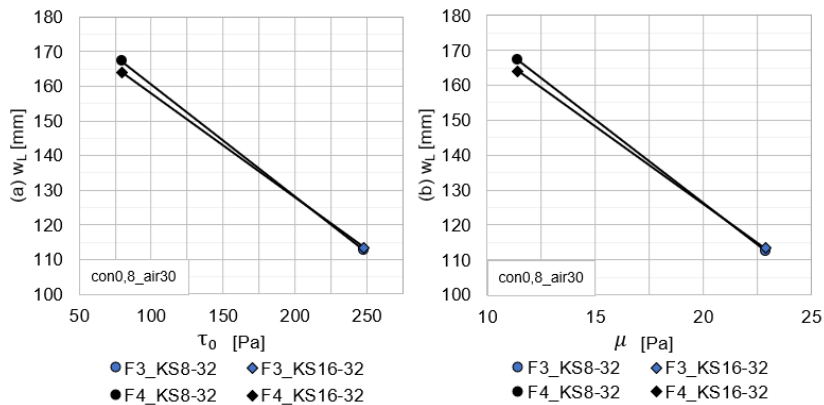


Abbildung 47: Applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant)) für einen Luft- (air30) und Betonvolumenstrom (con0,8).

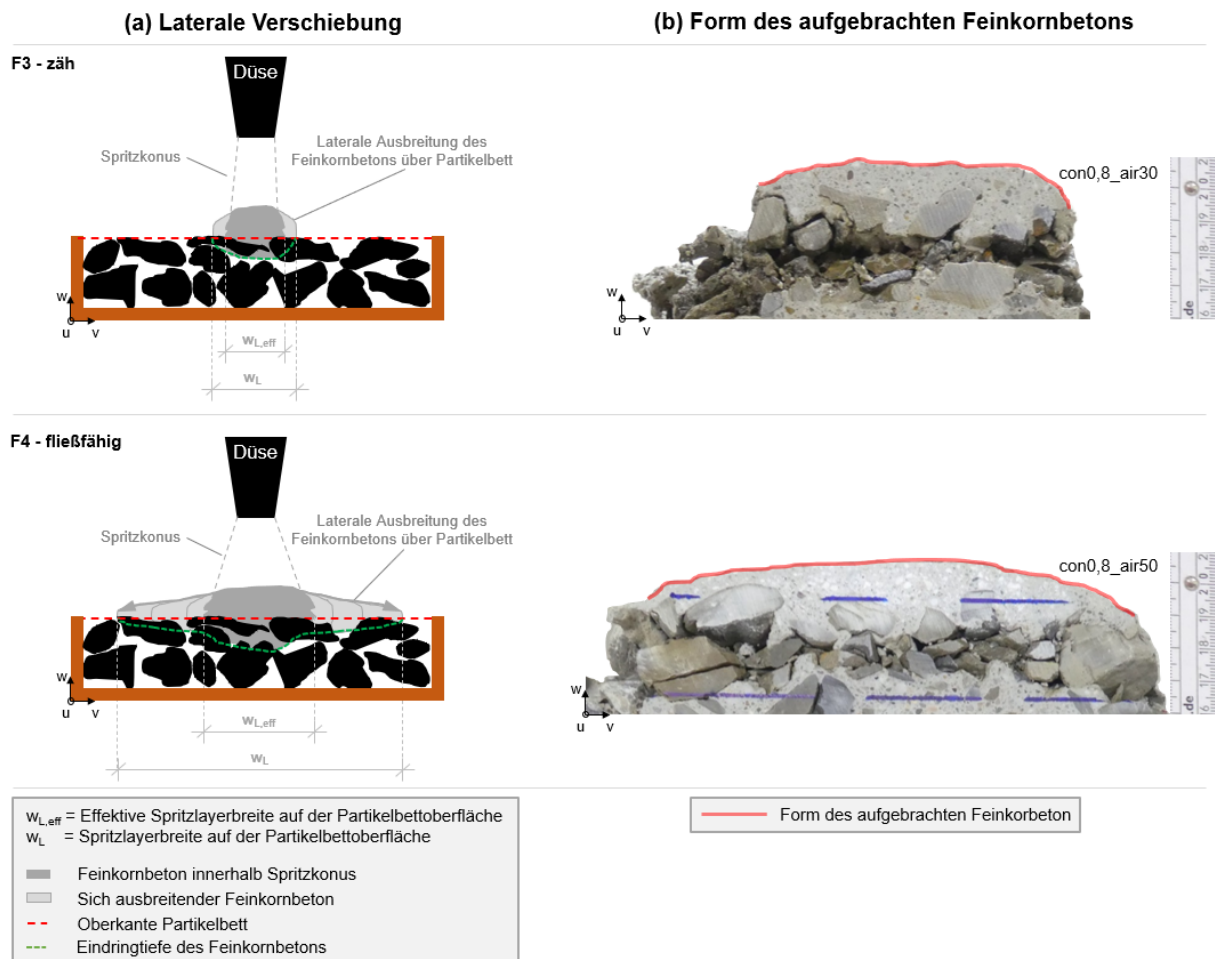


Abbildung 48: Applizierung des Feinkornbetons auf das Partikelbett: (a) Laterale Verschiebung eines fließfähigen Feinkornbetons auf der Partikelbettoberfläche über den Spritzkonus hinaus; gemessene Spritzlayerbreite w_L und effektive, tatsächlich vorliegende Spritzlayerbreite $w_{L,eff}$; (b) Form des aufgetragenen Feinkornbetons: (oben) zäher Feinkornbeton F3 mit kastenförmige Ausprägung und (unten) fließfähiger Feinkornbeton F4 mit runder Ausprägung aufgrund lateraler Verschiebung.

Einfluss aus den Eigenschaften des Partikelbetts:

In Abbildung 49 ist die applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und

(d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32; KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)) dargestellt. Die kinetische Beschleunigung des Feinkornbetonpartikels nimmt dabei mit zunehmender Luftmenge (bei konstanter Betonmenge) oder mit abnehmender Betonmenge (bei konstanter Luftmenge) zu.

Für den zäheren Feinkornbeton F3 (blau) ist dabei kein Einfluss aus dem mittleren Korndurchmesser d_{50} und der Porosität ϵ zumindest für die beiden hier geprüften Kalkstein-Partikelbetten zu erkennen (vgl. Abbildung 49(a)). Der fließfähigere Feinkornbeton F4 (grau, schwarz) hingegen weist eine Abnahme der Spritzlayerbreite w_L mit zunehmendem mittleren Korndurchmesser d_{50} auf. Dabei geht eine Zunahme des mittleren Korndurchmesser d_{50} mit einer Abnahme der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} (vgl. Abbildung 49(c)) und GL 6) und dadurch mit einer Abnahme des vertikalen Fließwiderstands sowie Zunahme des äquivalenten Porenradius R_{pore} (vgl. Abbildung 49(c)) und GL 7) einher. In den nachfolgenden Abschnitten kann jedoch gezeigt werden, dass das Eindringverhalten durch den auf der Partikeloberfläche aufstehenden Feinkornbeton bestimmt wird und das Eindringen des Feinkornbetons in das Partikelbett eine untergeordnete Rolle spielt. Daher dürfte hier der maßgebliche Faktor für die größere applizierte Spritzlayerbreite w_L bei Kalkstein-Partikelbetten die geringere spezifische Oberflächenrauigkeit (aufgrund der plattigen, wenig runden Kornform, dem mittleren Korndurchmesser d_{50} , des äquivalenten Porenradius R_{pore}) und das hierdurch begünstigte laterale Fließen sein. Daher spielt hier auch die Porosität ϵ nach Abbildung 49(b) eine untergeordnete Rolle.

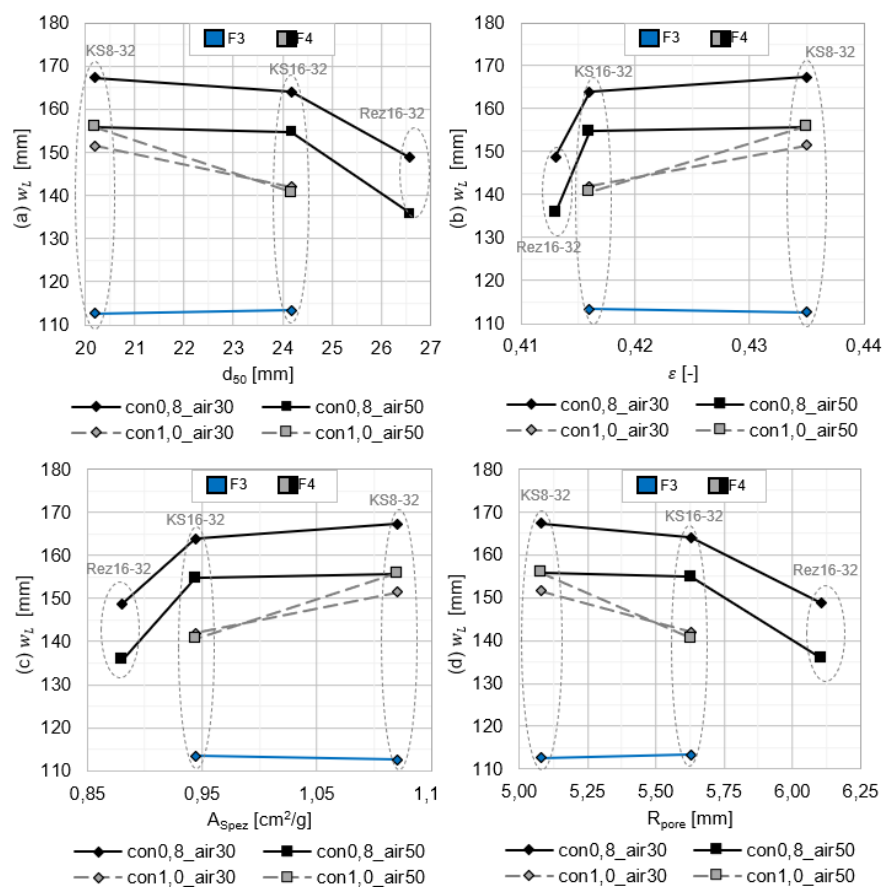


Abbildung 49: Applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32; KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32)

sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))

In Abbildung 50 ist die applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32; KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms con0,8 (schwarze durchgezogene Linien) und con1,0 (graue gestrichelte Linien)) dargestellt. Dabei führt sowohl eine Zunahme des Formbeiwerts ψ_c (d. h. Abnahme der Plattigkeit) sowie eine Zunahme der Sphärizität (d. h. Rundheit der Partikel) zu einer Abnahme der Spritzlayerbreite w_L , was mit der höheren spezifische Oberflächenrauigkeit des Rezyklat-Partikelbett Res16-32 zusammenhängen dürfte. Einer höhere spezifische Oberflächenrauigkeit geht offensichtlich mit einer geringeren lateralen Verschiebung des Feinkornbetons auf der Partikeloberfläche einher. Grundsätzlich scheint das laterale Fließen beim Auftreffen des Feinkornbetons auf der Partikelfläche stark von der Kornform und der hiermit einhergehenden spezifischen Oberflächenrauigkeit im Zusammenhang zu stehen.

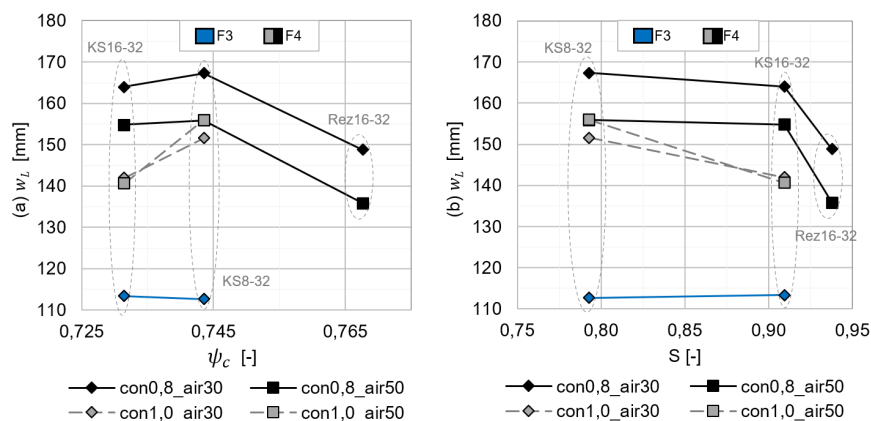


Abbildung 50: Applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32; KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))

Einfluss aus den Prozessparametern:

In Abbildung 51 ist die Spritzlayerbreite w_L in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene Linie) und con1,0 (gestrichelte Linie)) dargestellt. Hierbei steigt mit zunehmendem Luft- oder abnehmendem Betonvolumenstrom die Beschleunigung und somit kinetische Energie der einzelnen Betonpartikel an.

Wie zuvor beschrieben weist der Feinkornbeton F4 im Vergleich zu F3 aufgrund der fließfähigeren Konsistenz eine größere laterale Verschiebung und somit eine größere Spritzlayerbreite w_L auf. Allerdings führt eine hohe kinetische Beschleunigung (zunehmender Luftvolumenstrom, geringer Betonvolumenstrom con0,8 (vgl. Abbildung 51 durchgezogene Linien)) zu einer Reduzierung der Spritzlayerbreite w_L . Dies könnte, wie in der Abbildung 48(b) zu erkennen, zu einer Zunahme der inhomogenen Verteilung der Betonmasse sowie Gesteinskörnung über die Spritzlayerbreite w_L führen. Nach (Ginouse und Jolin 2015; Ginouse et al. 2014; Li et al. 2009) nimmt die Partikelgeschwindigkeit sowie die applizierte Betonmenge von Spritzkonusmitte zum -rand ab. Die Folge wäre ein höherer aufstehender Feinkornbeton a_f in Layermitte, wie auch später gezeigt wird (vgl. Abbildung 61). Daneben führt ein höherer Luftvolumenstrom zu einer Zunahme der Partikelgeschwindigkeit (Ginouse und Jolin

2014; Ginouse et al. 2014), welche wiederum zu einer Reduzierung der Spritzkonusbreite und somit auch Spritzlayerbreite w_L führen dürfte. Zusätzlich konnte zuvor gezeigt werden, dass eine Zunahme der kinetischen Beschleunigung mit einer zäheren Konsistenz des Feinkornbetons einhergeht (vgl. Abbildung 44 & Abbildung 45), was zu einer Reduzierung des lateralen Fließens sowie kompakteren Ausprägung des applizierten Feinkornbetons führen könnte (vgl. Abbildung 57). Fällt die kinetische Beschleunigung aber unter einen Grenzbereich (hoher Betonvolumenstrom con1,0 (vgl. Abbildung 51 gestrichelte Linien)), scheint die Wahl der Prozessparameter keinen Einfluss mehr auf die Spritzlayerbreite w_L zu besitzen. Grundsätzlich steht der LP3DCP-Prozess aber im Kontrast zum SC3DP-Prozess, wonach eine Zunahme des Luftvolumenstroms von 30 auf 50 m³/h zu einer Zunahme der Layerbreite führt (Lachmayer et al. 2023; Böhler et al. 2022; Freund et al. 2023). Beim reinen SC3DP-Prozess wird allerdings auf relativ homogenen Oberflächen (Schalungsfläche oder vorherig gespritzter Feinkornbetonlayer) gespritzt, welche daher grundsätzlich eine sehr geringe spezifische Oberflächenrauigkeit aufweisen und ein laterales Verschieben des Feinkornbetons begünstigt. Im Vergleich dazu weist ein Partikelbett aber eine höhere spezifische Oberflächenrauigkeit sowie zusätzlich Hohlräume auf, die ein gegensätzliches Verhalten zum normalen SC3DP-Verfahren erklärt.

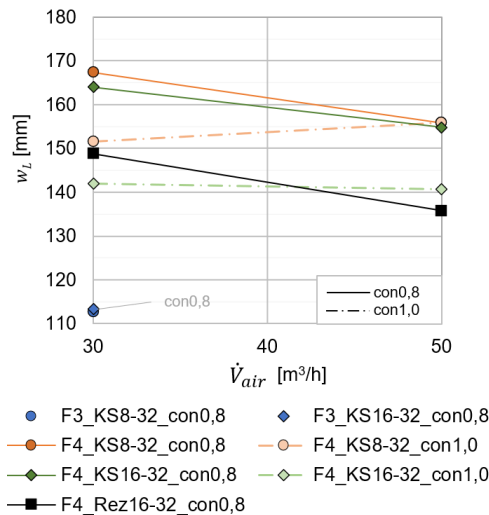


Abbildung 51: Applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene Linie) und con1,0 (gestrichelte Linie)). Anmerkung: F4_KS8-32_con1,0 und F4_KS16-32_con1,0 liegen genau hintereinander.

Einfluss eines angefeuchteten Partikelbett:

In Abbildung 52 ist die applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Partikelbettzustands, d.h. nicht angefeuchtet und angefeuchtet, für das Partikelbett KS16-32 dargestellt. Ein feuchter Zustand bedeutet, dass die Partikeloberfläche vor dem Einbau mit Wasser besprüht wurde. Das Anfeuchten des Partikelbetts führt insbesondere im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Einflussparametern zu keiner wesentlichen Veränderung der Spritzlayerbreite w_L .

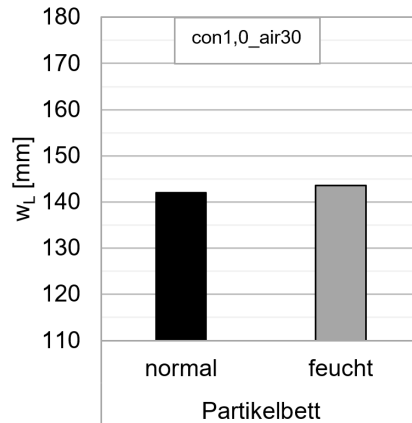


Abbildung 52: Applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30.

8.5 Eindringverhalten

Im folgenden Abschnitt wird das Eindringverhalten des Feinkornbetons mittels unterschiedliche Kennwerte wie beispielsweise die Eindringtiefe des Feinkornbetons in das Partikelbett oder der nach der Applizierung auf der Partikeloberfläche aufstehende Feinkornbeton beschrieben.

Idealisiert dargestellt kann entsprechend der Abbildung 53 dabei zwischen der Gesamtbetonhöhe $h_{F,1} = a_F + e_1$ und $h_{F,2} = a_F + e_2$ bestehend aus dem auf der Partikeloberfläche aufstehenden Feinkornbeton a_F sowie den Eindringtiefen e_1 und e_2 in das Partikelbett unterschieden werden. Die Eindringtiefe e_1 repräsentiert dabei die mittlere Eindringtiefe inklusive der anhängende und über die Feinkornbetonfront tiefer nach unten ragende Gesteinskörnung (vgl. Abbildung 53 – blaue Linie), es wird daher über die gesamte blaue Linie ein Mittelwert gebildet. Die Eindringtiefe e_2 beschreibt die tatsächliche mittlere Eindringtiefe des Feinkornbetons (vgl. Abbildung 53 – grüne Linie) und es gehen nur die grün markierten Bereich zur Ermittlung einer mittleren Eindringtiefe ein, bei denen der Feinkornbeton frei zu einem Fließstopp gekommen ist (und nicht durch ein Partikel gestoppt wurde). Daher gilt immer: $e_1 > e_2$. Bei dem Aufbringen zweier Schichten kann es in Abhängigkeit der gewählten rheologischen Eigenschaften sowie Prozessparametern zu einem ungebundenen Bereich zwischen den Feinkornbetonschichten kommen (vgl. Abbildung 53 – weiß). Dennoch kann die Gesteinskörnung, die zwei mit Feinkornbeton gebundenen Schichten über eine ungebundene Schichthöhe h_U hinweg mechanisch verbinden (vgl. Abbildung 53 – Gesteinskörner 1 bis 5), sodass der Querschnitt monolithisch erscheint (und nicht auseinander fällt). Dieser Überbrückungseffekt soll mit der Eindringtiefe e_1 berücksichtigt werden. Wird auf den aufstehenden Feinkornbeton a_F eine nächste Partikelschicht aufgebracht, können die Partikel den aufstehenden Feinkornbeton in Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften sowohl vertikal wie auch horizontal verdrängen (siehe Hypothese -Abbildung 2). Während dem Aufbringen der nächsten Partikelschicht verteilt sich aber der bis dahin aufstehende Feinkornbeton a_F in die vorliegenden Porenräume des aufgetragenen Partikelbetts. Unter der Annahme einer reinen vertikalen Verdrängung in den Porenräumen erhöht sich der aufstehenden Feinkornbeton auf den aufstehenden Feinkornbeton $a_{F,p}$ innerhalb der Porenräume (daher gilt: $a_{F,p} > a_F$). Unter idealisierter Bedingung, d.h. der Feinkornbeton wird vollständig nur vertikal nach oben verdrängt, kann dann zudem die Gesamtbetonhöhe $h_{F,1,por} = a_{F,p} + e_1$ und $h_{F,2,por} = a_{F,p} + e_2$ berechnet werden. Wird idealisiert eine rein laterale Verdrängung des Feinkornbetons bei Applizierung einer weiteren Partikelschicht angenommen, ergeben sich jedoch die bereits beschriebene Gesamtbetonhöhe $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$. Unter realer Bedingung wird der Feinkornbeton bei Applizierung einer neuen Schicht sich anteilig sowohl vertikal wie auch lateral verdrängen, wodurch die in real vorliegende Gesamtbetonhöhe somit zwischen den Gesamtbetonhöhen $h_{F,1}$ oder $h_{F,2}$ (Minimum) und den Gesamtbetonhöhen $h_{F,1,por}$ oder $h_{F,2,por}$ (Maximum) liegt. Konservativ betrachtet,

d.h. der Feinkornbeton wird nur lateral verschoben, kann die ungebundene Schicht h_U wie folgt berechnet werden: $h_{U,1} = \text{Schichthöhe} - h_{F,1}$ oder $h_{U,2} = \text{Schichthöhe} - h_{F,2}$ (vgl. Abbildung 53 – weiß). Die konservative Annahme hierbei ist, dass der Feinkornbeton sich nur lateral und nicht vertikal bei Applizierung einer neuen Partikelschicht verteilt und dadurch die ungebundene Schicht h_U maximal wird. Ist nun die ungebundene Schicht $h_{U,1}$ und $h_{U,2}$ größer als bspw. die minimale d_{min} oder die mittlere Partikelgröße d_{50} , so kann das ein Hinweis für einen schlechten Verbund zwischen den beiden Schichten sein, da die zwei Schichten nicht mehr monolithisch über die Partikel verbunden werden kann. Die strengste Betrachtung vergleicht hierbei, ob die ungebundene Schicht $h_{U,2}$ größer als die minimale mittlere Partikelgröße d_{min} ist (falls $h_{U,2} > d_{min}$, Indiz für schlechten Verbund).

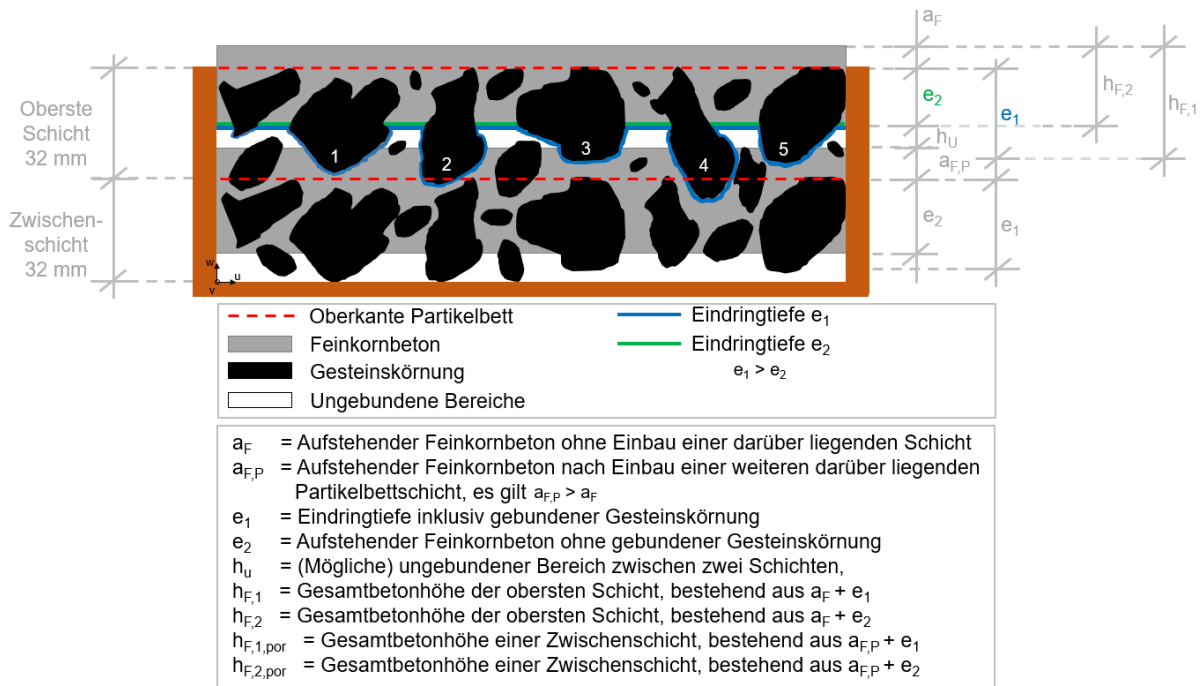


Abbildung 53: Schematische Darstellung des Eindringverhaltens bei mehreren Schichten mit einer in dieser Untersuchungsreihe üblichen Schichthöhe von 32 mm: Der auf der Partikeloberfläche aufstehende Feinkornbeton a_F , die Eindringtiefen e_1 und e_2 des Feinkornbetons in das Partikelbett, die Gesamtbetonhöhe $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$, der in den Partikelbetthohlräumen aufstehende Feinkornbeton $a_{F,P}$ sowie die ungebundene Schicht h_U .

In Abbildung 54 ist der (a) aufstehende Feinkornbeton a_F sowie die (b) Eindringtiefen e_2 in Abhängigkeit der Spritzlayerbreite w_L gezeigt. Die Diagramme zeigen dabei einen Zusammenhang zwischen dem aufstehenden Feinkornbeton a_F und der Spritzlayerbreite w_L , wonach eine Zunahme der Spritzlayerbreite w_L mit einer Zunahme des aufstehenden Feinkornbetons a_F einhergeht. Daneben scheint ein etwas schwächerer Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe e_2 und der Spritzlayerbreite w_L vorzuliegen. Eine Zunahme der Spritzlayerbreite w_L geht hierbei mit einer leichten Abnahme (air30) und einer Zunahme (air50) der Eindringtiefe e_2 einher. In Abbildung 54(c) ist zuletzt der aufstehende Feinkornbeton a_F in Abhängigkeit der Eindringtiefe e_2 dargestellt und hier führt eine Zunahme der Eindringtiefe e_2 zu einer Abnahme des aufstehenden Feinkornbetons a_F . Die Diagramme zeigen aber, dass alle drei Parameter eine Korrelation aufweisen und sich somit gegenseitig beeinflussen. Die Gründe für dieses Verhalten werden daher im folgenden Abschnitt diskutiert.

Anmerkung: Bei dem Kalkstein-Partikelbetts KS8-32 wurden aufgrund der kleinen Partikelgrößenanteile in der ersten Schicht nicht alle Gesteinskörnungsanteile bis zum Schalungsbrett gebunden, sodass hierbei der aufstehende Feinkornbeton a_F systematisch unterschätzt und somit die die Eindringtiefe e systematisch überschätzt wird. Aufgrund dessen wird bei der Diskussion des aufstehenden Feinkornbetons a_F und der Eindringtiefe e nur auf die beiden Partikelbetten KS16-32 und Rez16-32 eingegangen. Die Gesamtbetonhöhen $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$ sowie ungebundenen Schichten $h_{U,1}$ und $h_{U,2}$ sind

hiervon aber nicht betroffen, da diese unabhängig des aufstehenden Feinkornbetons a_F ermittelt werden (vgl. Abbildung 22).

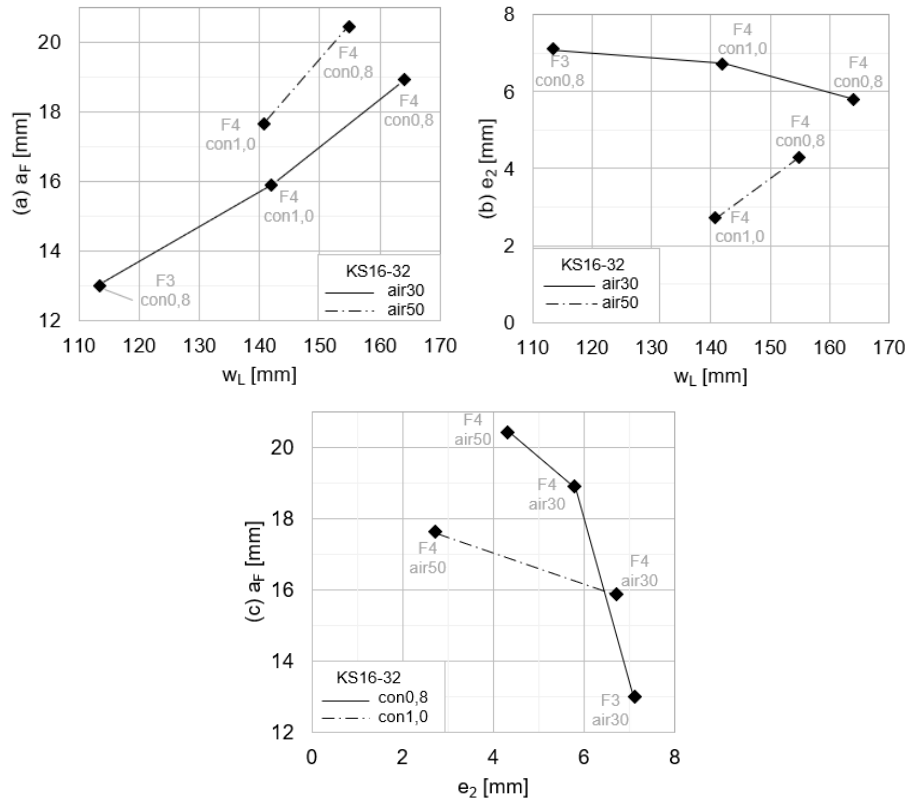


Abbildung 54: (a) Aufstehende Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche und (b) Eindringtiefe e_2 des Feinkornbetons in das Partikelbett in Abhängigkeit der Spritzlayerbreite w_L , sowie (c) aufstehende Feinkornbeton a_F in Abhängigkeit der Eindringtiefe e_2 für das Partikelbett KS16-32, die Feinkornbetone F3 und F4, sowie unter Variation des Luft- (air30; air50) und Betonvolumenstroms (con0,8; con1,0).

Gesamte Betonhöhe $h_{F,1}$ sowie $h_{F,2}$, ungebundene Zone $h_{U,1}$ sowie $h_{U,2}$ und Kompaktheit K

In Abbildung 55 ist die (a) Gesamtbetonhöhe $h_{F,1}$ unter Berücksichtigung der Gesteinskörnung (daher Eindringtiefe e_1) sowie (b) Gesamtbetonhöhe $h_{F,2}$ ohne Berücksichtigung der Gesteinskörnung (daher Eindringtiefe e_2) in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms dargestellt. Im Vergleich zur Gesamtbetonhöhe $h_{F,2}$ erzielt die Gesamtbetonhöhe $h_{F,1}$, insbesondere für einen geringen Luftvolumenstrom air30 aufgrund der mittgemessenen Gesteinskörnung, eine höhere Gesamtbetonhöhe. Für einen hohen Luftvolumenstrom air50 erzielen beide Gesamtbetonhöhen $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$ indes ähnliche Höhen. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass unter einem hohen Luftvolumenstrom auch die Eindringtiefe zurückgeht (vgl. Abbildung 66) und hierdurch nur noch die ersten Partikel (insbesondere bei plattigen Partikeln) in einer Schicht gebunden werden (vgl. Abbildung 56). Hingegen werden mit einem niedrigen Luftvolumenstrom air30 größere Eindringtiefen erzielt (vgl. Abbildung 66), welche in der Folge tiefer liegende Partikel einer Schicht binden können und somit zu einer größeren Gesamtbetonhöhe $h_{F,1}$ führen. Die Gesamtbetonhöhe $h_{F,2}$ (ohne Berücksichtigung der Gesteinskörnung) zeigt dabei keine oder nur eine schwache Tendenz in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms (vgl. Abbildung 55(b)). Dies könnte dafür sprechen, dass die Wahl der Prozessparameter vor allem darüber entscheidet, wie homogen sich der Feinkornbeton über die Spritzkonusbreite verteilt (siehe hierzu auch den Kennwert Kompaktheit K und Abbildung 56).

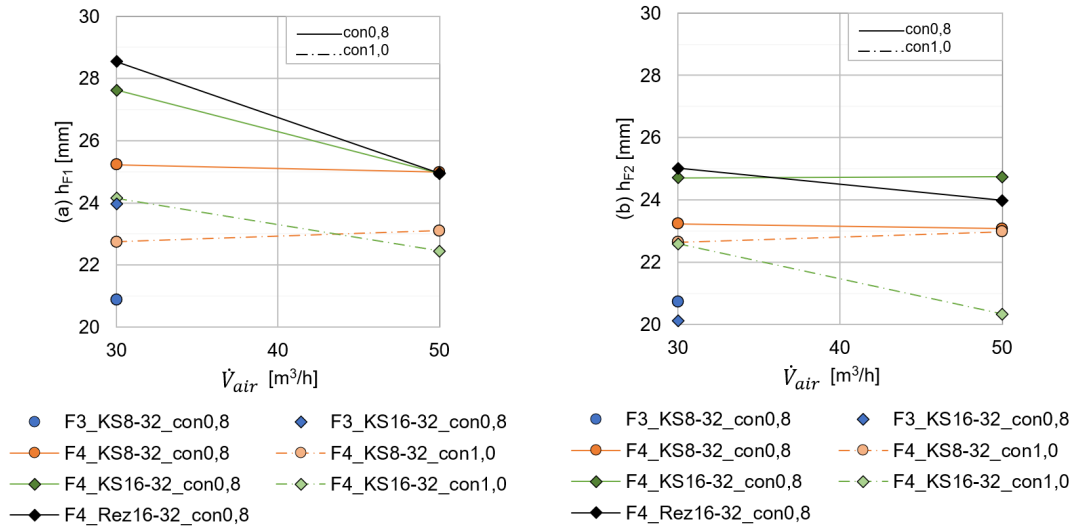


Abbildung 55: (a) Gesamtbetonhöhe $h_{F,1}$ unter Berücksichtigung der Gesteinskörnung (daher Eindringtiefe e_1) sowie (b) Gesamtbetonhöhe $h_{F,2}$ ohne Berücksichtigung der Gesteinskörnung (daher Eindringtiefe e_2) in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene Linie) und con1,0 (gestrichelte Linie)).

Werden von der Schichtthöhe (hier 32 mm) die Gesamtbetonhöhen $h_{F,1}$ (mit Gesteinskörnung) und $h_{F,2}$ (ohne Gesteinskörnung) abgezogen, wird nach Tabelle 8 die ungebundene Schicht $h_{U,1}$ und $h_{U,2}$ erhalten. Wie zuvor beschrieben, kann die ungebundene Schichthöhe h_U mit der minimalen Partikelgröße d_{min} verglichen werden (falls $h_{U,1} > d_{min}$ oder $h_{U,2} > d_{min}$: Indiz für schlechten Verbund – in der Tabelle 8 rot markiert). Die Betrachtung der ungebundenen Schicht $h_{U,2}$ beschreibt dabei die strengere Betrachtung, unter der Annahme, dass der Feinkornbeton sich bei Aufbringung einer neuen Partikelbettschicht nur seitlich ausbreitet und die Gesteinskörnung nicht mitgerechnet wird und somit auch kein Überbrückungseffekt berücksichtigt wird. Die Betrachtung der ungebundenen Schicht $h_{U,1}$ untersucht die Situation etwas günstiger durch Berücksichtigung der eingebundenen Gesteinskörnung (als Mittelwert). In beiden Fällen ist zu erkennen, dass mit zunehmender minimaler Partikelgröße d_{min} die ungebundenen Schichten $h_{U,1}$ und $h_{U,2}$ abnehmen (vgl. Tabelle 8). Das bedeutet, dass bei den beiden Partikelbetten KS16-32 und Rez16-32 von Beginn an schon ein größerer Teil des Betonquerschnitts mit Beton ausgefüllt wird und gleichzeitig aufgrund der größeren Partikel selber die ungebundene Zone einfacher überbrückt werden kann. Das Partikelbett KS8-32 hingegen zeigt mehrheitlich ungebundene Schichthöhen $h_{U,1}$ und $h_{U,2}$ auf, welche von der minimalen Partikelgröße d_{min} (hier 8 mm) nicht mehr überbrückt würden. Da jedoch die mittlere Partikelgröße d_{50} für alle drei Partikelbetten über 20 mm liegen und immer auch ein Teil des Feinkornbetons in die obere Partikelbettschicht eindringt, werden auch beim KS8-32 die ungebundenen Zonen von der Gesteinskörnung in den meisten Fällen trotzdem überbrückt. Dies dürfte auch der Grund sein, warum die Festbetonquerschnitte trotz Vorliegen großer ungebundener Bereiche ein zusammenhängendes, monolithisches Betongefüge erzielen und nicht lagenweise zerbrechen (vgl. Abbildung 69)

Tabelle 8

Ungebundene Schichten h_{U1} und h_{U2} in Abhängigkeit der drei Partikelbetten (KS8-32; KS16-32 und Rez16-32) für die beiden Feinkornbetone (F3; F4) sowie unter Variation der Prozessparameter (Betonvolumenstrom: con0,8; con1,0 sowie Luftvolumenstrom: air30; air50). Rot markiert: Wenn die ungebundene Schicht größer als die minimale Korngröße d_{min} des Partikelbetts ist. Die Betrachtung h_{U2} beschreibt dabei die strengste Betrachtung, d.h. der Feinkornbeton würde sich bei Aufbringung einer neuen Partikelbettschicht nur seitlich ausbreiten und die Gesteinskörnung führt nicht zu einem Überbrückungseffekt.

Feinkorn- beton	Prozess- parameter	ungebundene Schicht $h_{U,1}$ [mm]			ungebundene Schicht $h_{U,2}$ [mm]		
		KS8-32	KS16-32	Rez16-32	KS8-32	KS16-32	Rez16-32
F3	con0,8_air30	11,1	8,0		11,3	11,9	
	con0,8_air50	6,8	4,4	3,5	8,8	7,3	7,0
F4	con0,8_air30	7,0	7,0	7,1	8,9	7,3	8,0
	Con1,0_air30	9,3	7,9		9,4	9,4	
	Con1,0_air50	8,9	9,5		9,0	11,7	
d_{min}		8,0	16,0	16,0	8,0	16,0	16,0

Die aufzubringende Betonmenge berechnet sich entsprechend GL 3. Dabei wird idealisiert davon ausgegangen, dass über die Spritzkonusbreite eine aufstehende homogene Betonhöhe h_B appliziert wird (vgl. Abbildung 5). Wie zuvor bereits beschrieben kann in Abhängigkeit der Rheologie des Feinkornbetons, aber insbesondere für fließfähigere Systeme, ein laterales Fließen entstehen (vgl. Abbildung 48 und Abbildung 57) und hierdurch eine aufstehende inhomogene Betonhöhe über die Spritzkonusbreite entstehen (höchste Betonhöhe in Spritzkonusmitte und abnehmend zum Spritzkonusrand). Je stärker das laterale Fließen und dadurch die aufstehende inhomogene Betonhöhe ausgeprägt sind, desto weniger kompakt liegt der applizierte Feinkornbeton vor. Wird um den tatsächlich applizierten Feinkornbeton ein Rechteck gelegt (Abbildung 56(a) - grüner Kasten), so kann erkannt werden, dass der zähe Feinkornbeton F3 (grau) das grüne Rechteck sehr gut ausfüllt. Der fließfähige Feinkornbeton F4 füllt hingegen das grüne Rechteck deutlich weniger aus (zu erkennen an dem größeren Anteil an weißer Fläche innerhalb des grünen Rechtecks). Der Feinkornbeton F3 liegt im Vergleich zum Feinkornbeton F4 nach dem Applizieren somit deutlich kompakter auf sowie im Partikelbett vor. Bei einem Einbau einer nächsten Partikelschicht könnte die vorliegende Feinkornbetonform aber einen Einfluss auf das Fließverhalten und somit auf die Festbetoneigenschaften haben. Um dies darzustellen, wurde von den Autoren die Kompaktheit K nach GL 14 eingeführt, welche die im Querschnitt gemessene Feinkornbetonfläche/ -volumen A_g (idealisiert berechnet über Spritzlayerbreite w_L , aufstehende Feinkornbeton a_F , Eindringtiefe e_2 multipliziert mit der Porosität ε , da e_2 innerhalb des Partikelbetts gemessen wird) im Vergleich zur real aufgetragenen Feinkornbetonfläche/ -volumen A_{real} darstellt (berechnet über die beiden bekannte Prozessparameter Düsen-Verfahrgeschwindigkeit v_N und Betonvolumenstrom \dot{V}_{con}):

$$K = \frac{A_g}{A_{real}} = \frac{w_L \cdot (a_F + e_2 \cdot \varepsilon)}{v_N / \dot{V}_{con}} \quad [\%] \quad \text{GL 14}$$

Stimmt die gemessene Feinkornbetonfläche A_g mit der real aufgetragenen Feinkornbetonfläche A_{real} überein, daher Kompaktheit $K = 1,0$, so liegt der applizierte Feinkornbeton mit einer relativ homogenen Betonhöhe über die Spritzkonusbreite vor (vgl. Abbildung 56(a) – zäher Feinkornbeton F3). Bei zunehmender Kompaktheit $K > 1,0$ verteilt sich der Feinkornbetonhöhe zunehmend inhomogen über die Spritzkonusbreite (vgl. Abbildung 56(a) – fließfähiger Feinkornbeton F4). Somit ist die Kompaktheit K ein Grad der inhomogenen Verteilung der Feinkornbetonhöhe über die Spritzkonusbreite. Eine

Kompaktheit $K < 1,0$ kann nur dann entstehen, wenn die definierten Prozessparameter nicht mit den tatsächlich vorliegenden Prozessparametern übereinstimmt (wenn sich bspw. der Betonvolumenstrom während des Prozesses ungewollt verringert).

Entsprechend der Abbildung 57 wird bestätigt, dass der zähere Feinkornbeton F3 eine Kompaktheit K von nahe 1,0 erzielt. Der fließfähigere Feinkornbeton F4 hingegen erzielt eine deutlich höhere Kompaktheit $K (> 1,2)$. Dabei ist hier ein deutlicher Einfluss aus den Partikelbetten sowie der gewählten Prozessparameter zu erkennen. Die Gründe hierfür werden nachfolgend bei der Diskussion des aufstehenden Feinkornbetons a_F sowie der Eindringtiefe e detailliert diskutiert.

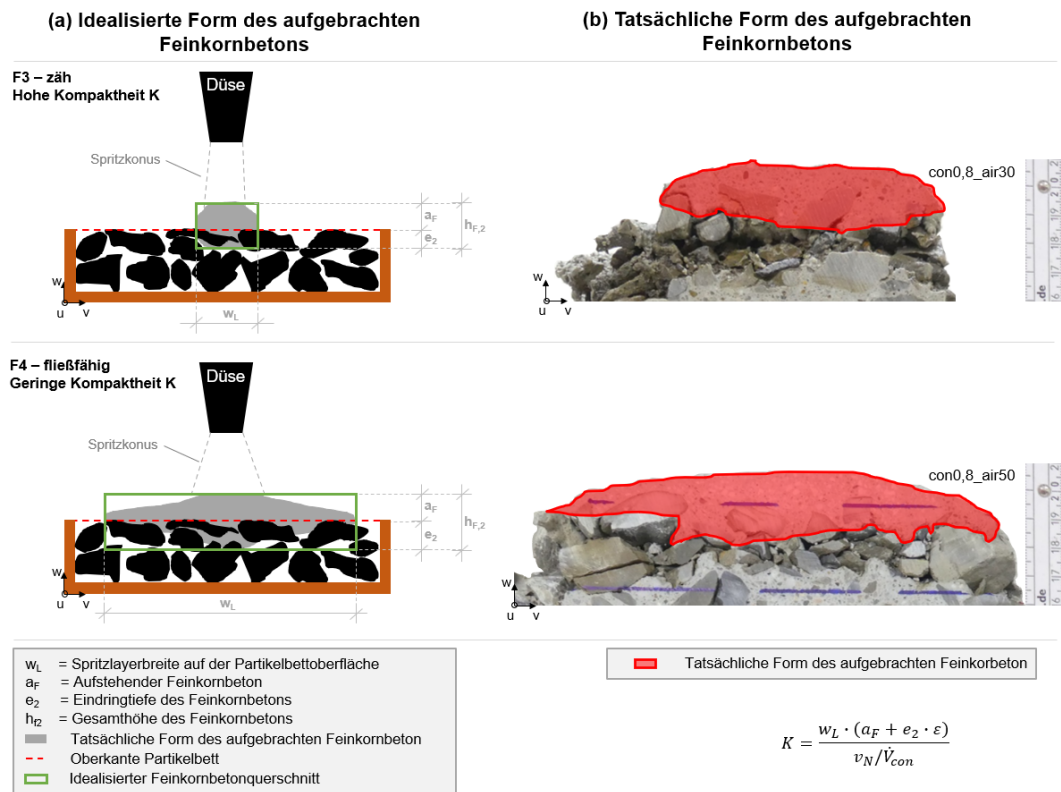


Abbildung 56: Kompaktheit K des applizierten Feinkornbetons: (a) schematische Darstellung für einen zäh, kompakt applizierten (oben) und eins fließfähigen, weniger kompakt applizierten Feinkornbeton und (b) am Beispiel von echten Proben. Kompaktheit K : beschreibt die im Querschnitt gemessene Feinkornbetonfläche (ermittelt über Spritzlayerbreite w_L , aufstehende Feinkornbeton a_F , Eindringtiefe e_2 und Porosität ϵ) im Vergleich zur tatsächlich aufgetragenen Feinkornbetonfläche (berechnet durch Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit v_N und Betonvolumenstrom \dot{V}_{con})

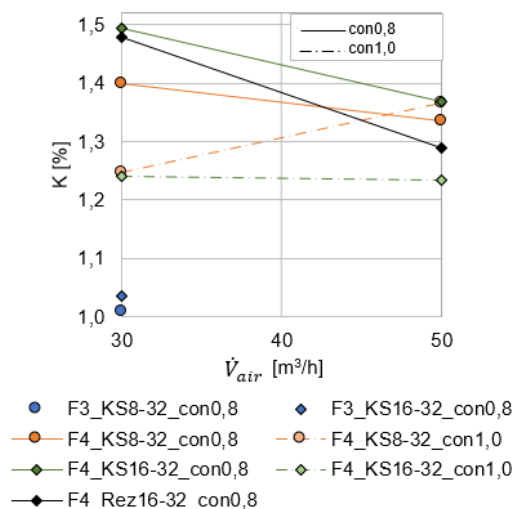


Abbildung 57: Kompaktheit K des applizierten Feinkornbetons in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene Linie) und con1,0 (gestrichelte Linie)). kompakt, $K = 1$ und wenig kompakt, $K \geq 1$.

Aufstehender Beton a_F

Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:

In Abbildung 58 ist der aufstehende Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit der (a) Fließgrenze τ_0 und der (b) Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie das Kalkstein-Partikelbett KS16-32 gezeigt. Der aufstehende Feinkornbeton a_F nimmt dabei mit zunehmender Fließgrenze τ_0 und Viskosität μ ab. Dabei ist wichtig zu verstehen, dass entsprechend der GL 3 die tatsächlich vorliegende Spritzlayerbreite w_L mit in die Berechnung eingeht, sodass die aufgebrachte Betonmenge über die Spritzkonusbreite für den Feinkornbetons F3 und F4 theoretisch identisch sein sollte. Wie zuvor beschrieben, führt die höhere Fließfähigkeit des Feinkornbetons F4 aber zu einer größeren lateralen Verschiebung (zu erkennen an einer größeren Spritzlayerbreite w_L (vgl. Abbildung 48(a)). Dadurch weist der Spritzkonus eine geringere Breite als die finale Spritzlayerbreite w_L auf, wodurch noch ein verstärktes Aufstauen in der Spritzkonusmitte und ein Abflachen zum Rand erzeugt wird (siehe auch Kompaktheit K - Abbildung 56 und Abbildung 57)

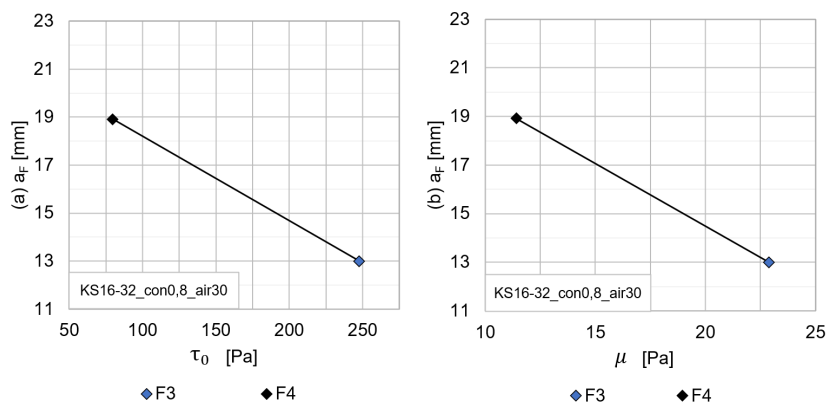


Abbildung 58: Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie das Kalkstein-Partikelbetts KS16-32 für einen Betonvolumenstrom von con0,8 und Luftvolumenstrom von air30.

Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:

In Abbildung 59 ist der aufstehende Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des (a) mittleren Korndurchmessers d_{50} , der (b) Porosität ϵ , der (c) spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und dem (d) äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)) dargestellt. Außerdem ist in Abbildung 60 der aufstehende Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des (a) Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und der (b) Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)) gezeigt.

In beiden Abbildungen ist zwar ein leichter Trend zu erkennen, dass das Rezyklat-Partikelbett einen leicht höheren aufstehenden Feinkornbeton a_F aufweist, was mit der zuvor beschriebenen höheren

spezifischen Oberflächenrauheit zusammenhängen könnte. Aus den beiden Abbildungen ist aber auch zu erkennen, dass der Einfluss aus den gewählten Prozessparametern einen deutlich stärkeren Einfluss auf den aufstehenden Feinkornbeton a_F hat als die Kennwerte der hier gewählten Partikelbetten (Einfluss aus Prozessparameter: max. Differenz $\approx 5,0$ mm; Einfluss Partikelbetten: max. Differenz $\approx 2,5$ mm).

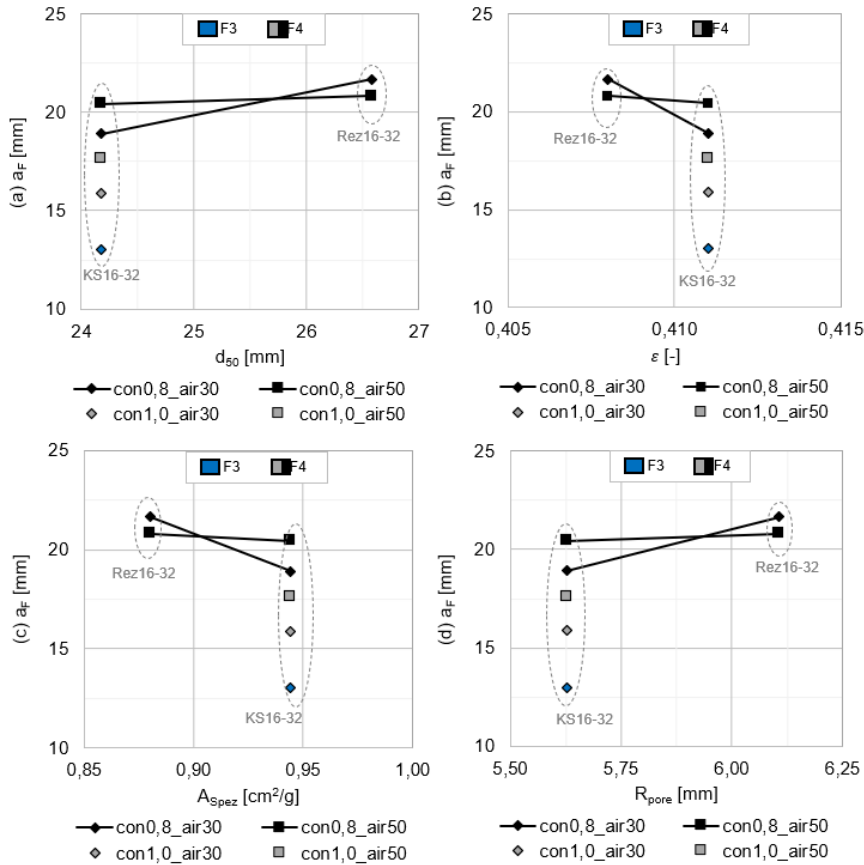


Abbildung 59: Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettobefläche in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))

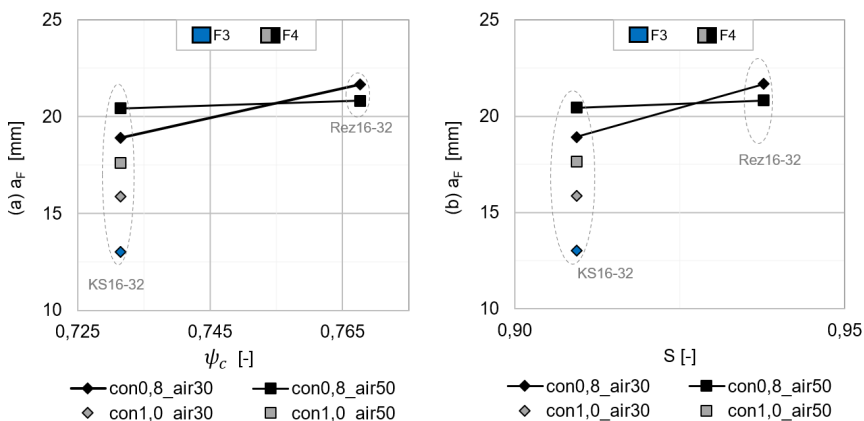


Abbildung 60: Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettobefläche in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation

des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))

Einfluss aus den Prozessparametern:

In Abbildung 61 ist der aufstehende Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene Linie) und con1,0 (gestrichelte Linie)) gezeigt. Ein zunehmender Luft- oder abnehmender Betonvolumenstrom wird dabei mit einer steigenden „kinetischen Energie“ der einzelnen Betonpartikel in Verbindung gebracht.

Entsprechend Abbildung 61 nimmt für das Kalkstein-Partikelbett mit zunehmendem Luftvolumenstrom (d.h. zunehmende kinetische Energie der Partikel) des aufstehenden Feinkornbeton a_F zu. Dies könnte an der zuvor beschriebenen spezifischen Oberflächenrauheit und der hierdurch inhomogenen Verteilung der Betonmasse sowie Gesteinskörnung innerhalb des Spitzkonus (siehe auch Kompaktheit K, vgl. Abbildung 57, abnehmend von Spritzkonusmitte zu -rand) liegen (Ginouse und Jolin 2015; Ginouse et al. 2014; Li et al. 2009; Ginouse und Jolin 2014). Das Rezyklat-Partikelbett nimmt mit zunehmendem Luftvolumenstrom (d.h. zunehmender kinetische Energie der Partikel) der aufstehende Feinkornbeton a_F nur leicht ab, was sich auch mit den Erkenntnissen der Eindringtiefe deckt (vgl. Abbildung 66), da hier der Luftvolumenstrom nur einen geringen Einfluss zeigt.

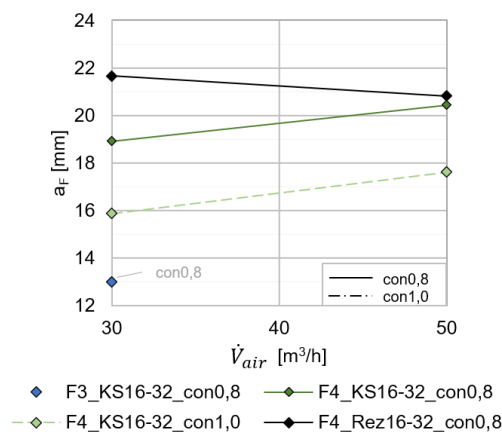


Abbildung 61: Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene Linie) und con1,0 (gestrichelte Linie)).

Einfluss eines angefeuchteten Partikelbetts:

In Abbildung 62 ist der aufstehende Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) dargestellt. Dabei weist das feuchte Partikelbett einen deutlich größeren aufstehenden Feinkornbeton a_F auf. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass die auf der Partikeloberfläche anhaftende Staubschicht durch das Wasser an die Partikel stärker gebunden wird und sich hierdurch der effektive Porenradius R_{pore} reduziert. Dadurch würde sich der vertikale Eindringwiderstand des Feinkornbetons in das Partikelbett erhöhen, was den erhöhten aufstehenden Feinkornbeton a_F erklären könnte. Bestätigt wird dies auch durch die Messung der Eindringtiefe, welche im feuchten Partikelbett abnimmt (vgl. Abbildung 67).

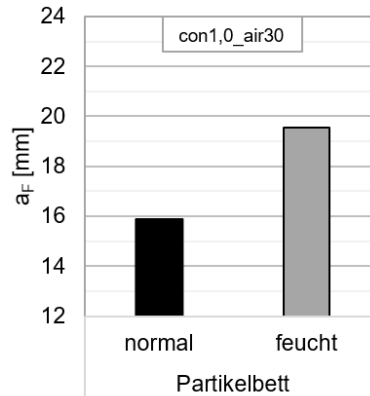


Abbildung 62: Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30.

Eindringtiefe e

Die Trends der Eindringtiefe e_1 und e_2 in Abhängigkeit der Rheologie, der Partikelbettkenwerte und der Prozessparameter stimmen überein, weshalb hier nur die Eindringtiefe e_2 diskutiert wird. Die Eindringtiefe e_1 kann dem Anhang entnommen werden. Die Eindringtiefe e_2 (d.h. ohne Berücksichtigung der Gesteinskörnung) bildet die tatsächliche Eindringtiefe des Feinkornbetons ab und wird daher für die nachfolgende Diskussion herangezogen.

Allerdings liegt das Verhältnis aus aufstehendem Feinkornbeton a_F zu Eindringtiefe e_2 zwischen 1,7 und 7,3 und im Mittel bei 4,1, d.h. die Höhe des aufstehenden Feinkornbeton a_F ist im Mittel 4,1-mal größer als die Höhe der Eindringtiefe e_2 . Zusätzlich erhöht sich der aufstehende Feinkornbeton a_F während des Einbaus der nächsten Partikelbettschicht durch die vertikale Verdrängung auf die Höhe des aufstehenden Feinkornbetons $a_{F,P}$ im Porenraum (vgl. Abbildung 53). Dadurch verschiebt sich das Verhältnis von aufstehendem Feinkornbeton zur Eindringtiefe noch einmal deutlich über das 4,1fache. Somit dürfte die Eindringtiefe e innerhalb der hier gewählten Material- und Prozessparameter für das Eindringverhalten sowie schlussendlich die Festbetoneigenschaften eine untergeordnete Rolle spielen und vielmehr der aufstehendem Feinkornbeton a_F die relevante Größe ist. Der Mechanismus ist demnach das Eindrücken der neu applizierten Partikel in den aufstehenden Feinkornbeton, infolgedessen dann der Feinkornbeton in Abhängigkeit der Rheologie stärker in vertikaler oder lateraler Richtung verdrängt wird. Die Gründe hierfür werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:

In Abbildung 63 ist die Eindringtiefe e_2 in die Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit der (a) Fließgrenze τ_0 und der (b) Viskosität μ für die beiden zäheren Feinkornbetone F3 (blau) und fließfähigeren Feinkornbetone F4 (schwarz) sowie das Kalkstein-Partikelbett KS16-32 gezeigt. Die Eindringtiefe e_2 nimmt dabei mit abnehmender Fließgrenze τ_0 und Viskosität μ ab. Wie zuvor für den aufstehenden Feinkornbeton a_F beschrieben, könnte die geringere Eindringtiefe e_2 für den fließfähigeren Feinkornbeton F4 mit dem starken lateralen Fließen zusammenhängen (vgl. Abbildung 48). Durch das laterale Fließen ergibt sich eine Spritzlayerbreite w_L , welche deutlich größer als die Spritzkonusbreite ist. Entsprechend GL 3 geht aber die volle Spritzlayerbreite w_L ein, sodass das gesamte Feinkornbetonvolumen innerhalb des kleineren Spritzkonus appliziert wird und anschließend noch ein Großteil lateral abfließen muss. Beim zäheren Feinkornbeton F3 tritt hingegen nur ein geringes laterales Fließen auf, sodass die Spritzlayerbreite w_L und die Spritzkonusbreite nahezu übereinstimmen. Das erhöhte Betonvolumen innerhalb des Spritzkonus beim Feinkornbeton F4 könnte durch diese Konzentrierung des Feinkornbetons sowie der Gesteinskörnung in der Spritzkonusmitte zu einem

schnelleren Zusetzen der Porenräume des Partikelbetts führen. Zusätzlich führt beim Feinkornbeton F4 aufgrund des erhöhten Betonvolumens innerhalb des Spritzkonus kurzfristig zu einem höheren Aufstau des Feinkornbetons auf der Partikeloberfläche, die dann aber durch die gleiche kinetische Energie des Spritzstrahls wie beim Feinkornbeton F3 verdichtet wird. Beim zäheren Feinkornbeton F3 steht aufgrund der geringeren aufstehenden Betonhöhe mehr kinetische Energie je Betonvolumen zur Verfügung, was ein erhöhtes Eindringen in das Partikelbett erklären könnte.

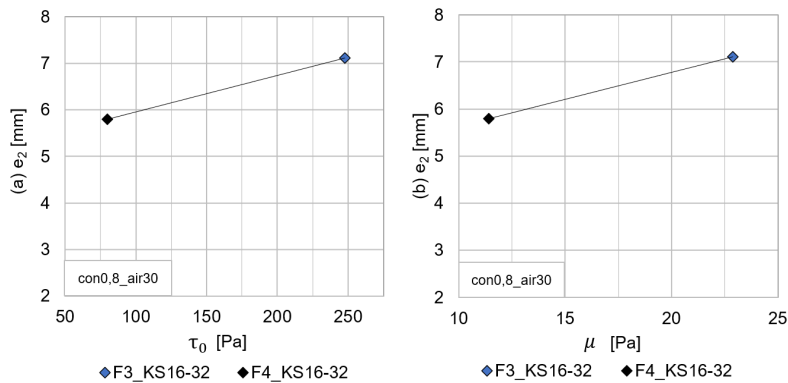


Abbildung 63: Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie das Kalkstein-Partikelbetten KS16-32 für einen Betonvolumenstrom von con0,8 und Luftvolumenstrom von air30.

Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:

In Abbildung 64 ist die Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit des (a) mittleren Korndurchmessers d_{50} , der (b) Porosität ϵ , der (c) spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und dem (d) äquivalenter Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)) dargestellt. Die kinetische Beschleunigung des Feinkornbetonpartikels nimmt dabei mit zunehmendem Luft- oder abnehmendem Betonvolumenstrom zu. Dabei ist in der Abbildung 64(a) gezeigt, dass eine Zunahme des mittleren Korndurchmessers d_{50} zu einer Abnahme der Eindringtiefe e_2 führt. Wie zuvor für den aufstehenden Beton a_F und die Eindringtiefe e beschrieben, führt eine Zunahme des mittleren Korndurchmessers d_{50} zu einer Zunahme der horizontalen geschlossenen Flächenanteile innerhalb des Spritzkonus (siehe auch Abbildung 90). Der Spritzstrahl trifft somit auf einen größeren Anteil an geschlossener Partikeloberfläche, wodurch ein großer Anteil der kinetischen Energie entweder den Feinkornbeton auf dem Partikel verdichtet, als Rückprall verloren geht oder zur lateralen Verdrängung des Feinkornbetons auf der Partikelbettoberfläche führt (vgl. Abbildung 48). Offensichtlich überlagert dieses Verhalten die anderen beiden Einflussparameter wie spezifische Partikeloberfläche A_{Spez} und äquivalenter Porenradius R_{pore} , da hier keine logischen Zusammenhänge zur Eindringtiefe e_2 gefunden werden konnten (vgl. Abbildung 64(c) & (d)). Hier hätte erwartet werden können, dass eine zunehmende spezifische Partikeloberfläche A_{Spez} oder ein abnehmender äquivalenter Porenradius R_{pore} zur einer Zunahme der Eindringtiefe führt. Aufgrund der geringen Unterschiede in der Porosität ϵ der beiden Partikelbetten wird dieser Einfluss auch hier nicht weiter diskutiert (vgl. Abbildung 64(b)).

In Abbildung 65 ist die Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit des (a) Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und der (b) Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) dargestellt. Auch hier lässt sich kein logischer Zusammenhang zur Eindringtiefe e_2 finden, da eigentlich eine runde und weniger plattige Kornform wie bei dem Rezyklat-Partikelbett ein verbessertes Eindringverhalten unterstützen sollte. Auch

hier überlagert vermutlich der zuvor beschriebene Zusammenhang des größeren mittleren Korndurchmessers d_{50} das Eindringverhalten.

Aus den beiden Abbildungen ist aber auch zu erkennen, dass der Einfluss aus den gewählten Prozessparametern einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Eindringtiefe e_2 hat als die Kennwerte der hier gewählten Partikelbetten (Einfluss aus Prozessparameter: max. Differenz $\approx 4,0$ mm; Einfluss Partikelbetten: max. Differenz $\approx 2,5$ mm).

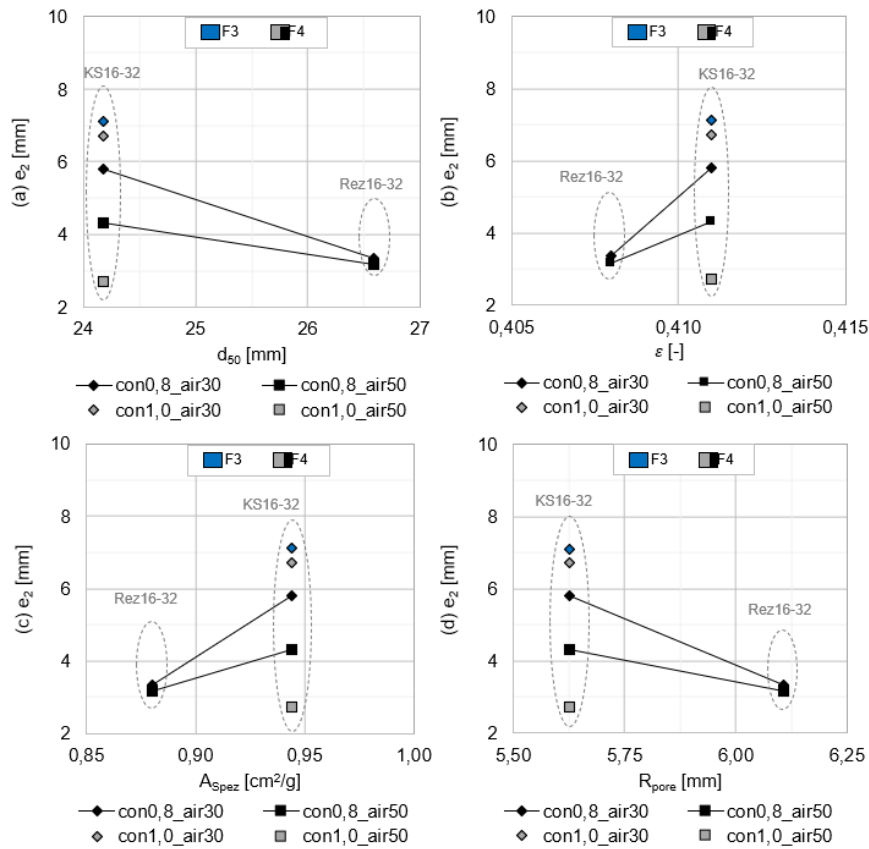


Abbildung 64: Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))

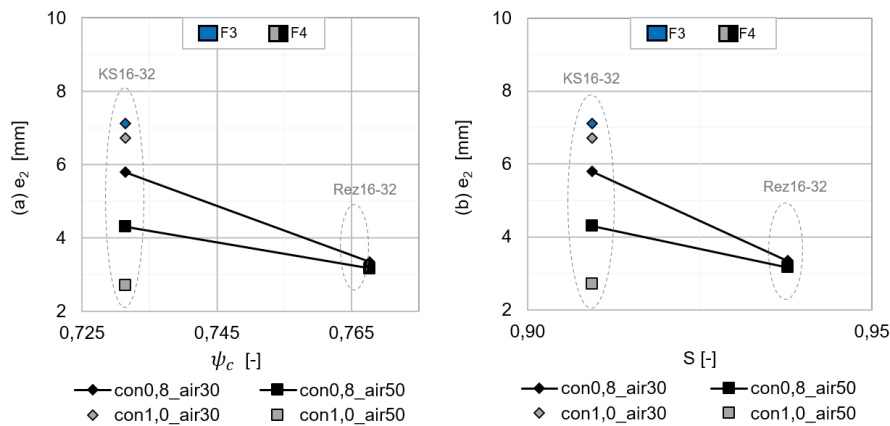


Abbildung 65: Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30

(Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))

Einfluss aus den Prozessparametern:

In Abbildung 66 ist die Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)) gezeigt. Eine Zunahme des Luftvolumenstroms führt dabei für beide Partikelbetten und Betonvolumenströme zu einer Abnahme der Eindringtiefe e_2 . Wie zuvor beschrieben kann dies auf die inhomogene Verteilung der Betonmasse sowie Gesteinskörnung über den Spitzkonus (abnehmend von Spritzkonusmitte zu -rand) zurückgeführt werden (Ginouse und Jolin 2015; Ginouse et al. 2014; Li et al. 2009; Ginouse und Jolin 2014). Hiernach könnte eine Zunahme des Luftvolumenstroms (d.h. Zunahme der kinetischen Beschleunigung) zu einer stärkeren Konzentrierung der im Feinkornbeton enthaltenen Gesteinskörnung innerhalb des Spitzkonus führen, wodurch die Porenkanäle im Partikelbett schneller zusetzen sowie auch der Abprall der Betonpartikel verstärkt wird. Daneben könnte die Zunahme der rheologischen Kennwerte in Abhängigkeit der kinetischen Beschleunigung (vgl. Abbildung 44 & Abbildung 45) zu einer Reduzierung der vertikalen Fließfähigkeit führen. Infolgedessen würde sich eine geringere Eindringtiefe e_2 und ein erhöhter aufstehender Feinkornbeton a_F einstellen (vgl. Abbildung 66 und Abbildung 61).

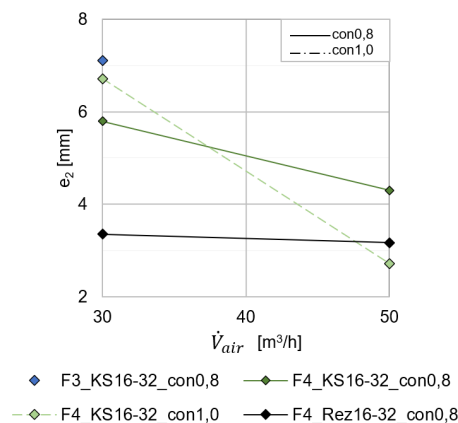


Abbildung 66: Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)).

Einfluss aus angefeuchtetem Partikelbett:

In Abbildung 67 ist die Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 dargestellt. Ein Anfeuchten des Partikelbetts führt hierbei zu einer Abnahme der Eindringtiefe e_2 . Wie zuvor beschrieben, könnte die auf Partikeloberfläche anhaftende Staubschicht in Interaktion mit Wasser an die Partikel gebunden werden, wodurch sich der effektive Porenradius R_{pore} reduziert. Entsprechend könnte dadurch der Eindringwiderstand insbesondere für den unter Druck applizierte Feinkornbeton steigen und zu einem höheren aufstehenden Feinkornbeton a_F (vgl. Abbildung 62) und somit aber auch zu einer geringeren Eindringtiefe e_2 führen.

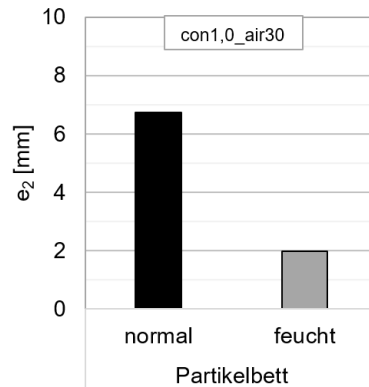


Abbildung 67: Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30.

8.6 Verbunduntersuchung

Im folgenden Abschnitt wird der Schichtenverbund mittels des querschnittsbezogenen Verbunds QV beschrieben. Der querschnittsbezogene Verbund QV beschreibt dabei, in welchem Verhältnis der Anteil der gebundenen Teilflächen zur Gesamtfläche des durchgesägten Querschnitts steht (vgl. Abbildung 19 und Abbildung 69). Ein querschnittsbezogener Verbund QV von 100 % bedeutet, dass die Porenräume des Partikelbetts vollständig mit Feinkornbeton gefüllt sind (daher keine großen Poren vorliegen). Dabei wird ein Zusammenhang zwischen dem querschnittsbezogenen Verbund QV, dem Schichtenverbund und schlussendlich auch der Festigkeit erwartet. In Abbildung 68 ist die Ansicht realer LP3DCP-Querschnitte mit dem (a) schlechtesten erzielten und (b) besten erzielten Verbund innerhalb der in dieser Untersuchungsreihe untersuchten Material- und Prozessparametervariationen dargestellt. In der Abbildung 68(a) sind visuell die ungebundenen Bereiche zu erkennen, was auf eine unzureichende Abstimmung der Material- und Prozessparameter zurückzuführen ist. In Abbildung 68(b) hingegen erfolgt die Auswahl der Material- und Prozessparameter bereits sehr erfolgreich, was anhand eines sehr homogenen LP3DCP-Betonquerschnitts zu erkennen ist.

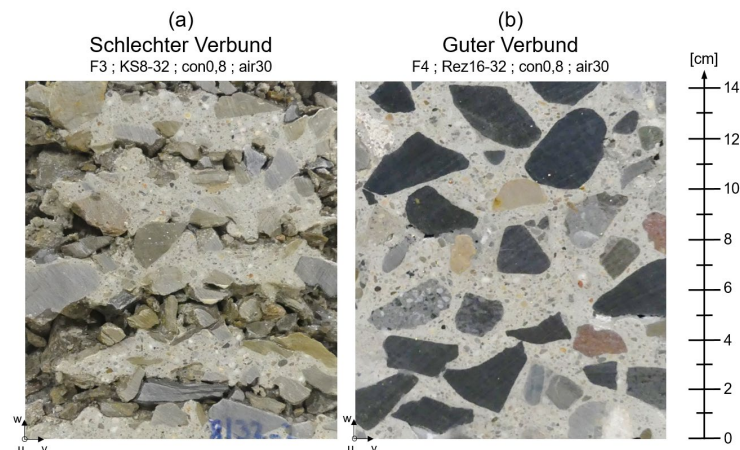


Abbildung 68: Ansicht eines realen LP3DCP-Querschnitts für den (a) schlechtesten erzielten Verbund (F3; KS8-32; con0,8; air30) und für den (b) besten erzielten Verbund (F4; Rez16-32; con0,8; air30).

In Abbildung 69 sind die Lagen der gebundenen Bereiche (weiß) und der ungebundenen Bereiche (schwarz) sowie der Layerkanten (rot) innerhalb eines Querschnittes in Abhängigkeit aller hier untersuchten Material- und Prozessparameter als Binärbilder dargestellt (Ermittlung gemäß Abbildung 19). Visuell erkennbar ist, dass die Wahl der Material- und Prozessparameter einen starken Einfluss darauf hat, wie gut sich der Verbund aus Feinkornbeton und Partikelbett einstellt (eine detaillierte Diskussion folgt in den anschließenden Abschnitten). Daneben ist aber auch deutlich zu erkennen, dass

sich die gebundenen Bereiche (weiß) immer ober- und unterhalb der Layerkanten und die ungebundenen Bereiche in der Mitte eines Layers anordnen. Dies stimmt auch mit den Erkenntnissen der vorherigen Abschnitte überein, wonach der aufgespritzte Feinkornbeton zum Teil in das Partikelbett eindringt und sich zum Teil auf der Partikelbettoberfläche aufstaut (vgl. Eindringtiefe e_2 und aufstehender Feinkornbeton a_F in Abbildung 48, Abbildung 53 & Abbildung 56).

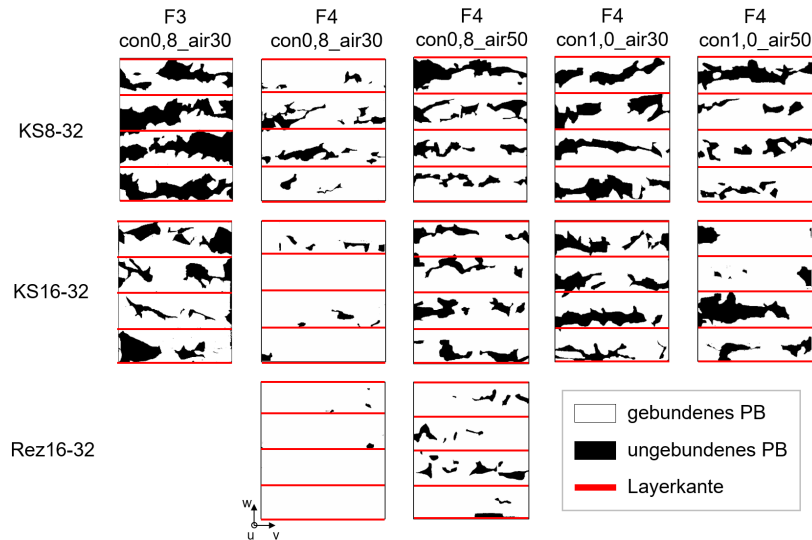
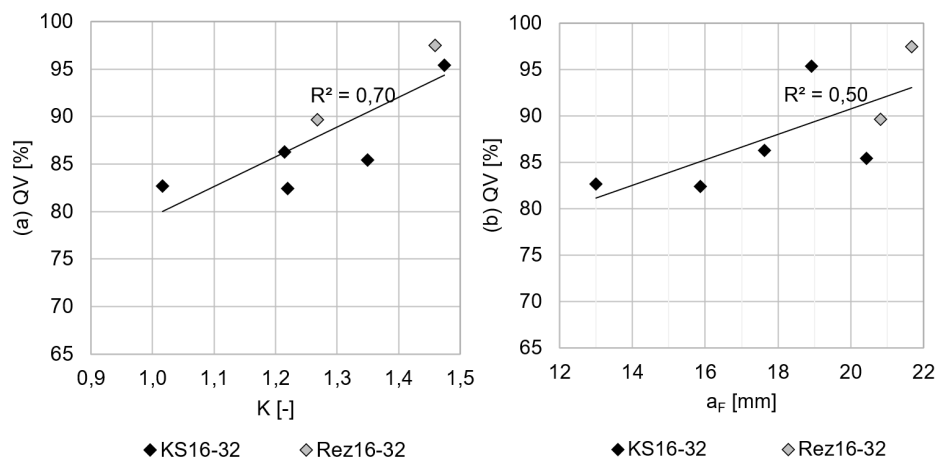


Abbildung 69: Übersicht über die gebundenen und ungebundenen Partikelbettbereiche über die mittleren 4 Layer (Layerhöhe = 32 mm; Layer 2 bis Layer 5) in Abhängigkeit der drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) der beiden Feinkornbetone F3 und F4 sowie in Abhängigkeit der Prozessparameter (Luftvolumenstrom (air30; air50) und Betonvolumenstroms (con0,8; con1,0))

In Abbildung 70 ist der querschnittsbezogene Verbund QV in Abhängigkeit der (a) Kompaktheit K, des (b) aufstehenden Feinkornbetons a_F auf der Partikelbettoberfläche und der (c) Eindringtiefe e_2 des Feinkornbetons in das Partikelbett gezeigt. Dabei steht der querschnittsbezogene Verbund QV mit der Kompaktheit K und dem aufstehenden Feinkornbeton a_F im Zusammenhang. Steigt die Kompaktheit K (nimmt auch die inhomogene Verteilung der Betonhöhe zu) sowie der aufstehende Feinkornbeton a_F , steigt auch der querschnittsbezogene Verbund QV. Bei den Proben mit einer hohen Kompaktheit K konzentriert sich aufgrund des lateralen Fließens ein größerer Volumenanteil des Feinkornbetons in Spritzkonusmitte und führt dadurch zu einer Zunahme des aufstehenden Feinkornbetons a_F . Wie bereits diskutiert und in Abbildung 67(c) durch eine geringe Korrelation erkennbar, spielt die Eindringtiefe e_2 für die querschnittsbezogene Verbund QV eine untergeordnete Rolle, da die Anteile aus vertikal nach oben gerichteten Eindringprozesse vermutlich deutlich relevanter sind.



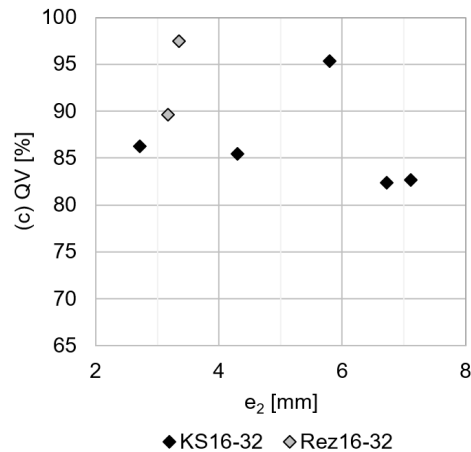


Abbildung 70: Querschnittsbezogener Verbund QV in Abhängigkeit der (a) Kompaktheit K , des (b) aufstehenden Feinkornbetons a_F auf der Partikelbettoberfläche und der (c) Eindringtiefe e_2 des Feinkornbetons in das Partikelbett für die beiden Partikelbetten KS16-32 und Rez16-32 (KS8-32 nicht darstellbar, da alle drei Parameter (a) bis (c) nicht berechenbar). In Abbildung nicht angegeben aber in den Werten enthalten: Variation zwischen den Feinkornbetonen F3 und F4 sowie Variation des Luft- (air30; air50) und Betonvolumenstroms (con0,8; con1,0).

Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:

Die Abbildung 71 zeigt den querschnittsbezogenen Verbund QV in Abhängigkeit der (a) Fließgrenze τ_0 und der (b) Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 und F4 (blau und schwarz) sowie den beiden Kalkstein-Partikelbetten KS8-32 und KS16-32. Dabei ist zu erkennen, dass eine Zunahme der Fließgrenze τ_0 und der Viskosität μ und somit eine Abnahme der Fließfähigkeit der Feinkornbetone mit einer deutlichen Abnahme des querschnittsbezogenen Verbunds QV einhergeht. Wie bereits im Abschnitt zur Beurteilung des Eindringverhaltens beschrieben, lässt sich der bessere querschnittsbezogene Verbund QV für den Feinkornbeton F4 mit dem erhöhten Auftrag des Feinkornbetonvolumens innerhalb des Spritzkonus (vgl. Abbildung 48), der Konzentrierung des Feinkornbetons und der Gesteinskörnung in der Spritzkonusmitte sowie der geringen Verdichtungsenergie je Fläche erklären. Insbesondere der erhöhte Auftrag innerhalb des Spritzkonus beim Feinkornbeton F4 führt zu einer deutlichen Erhöhung des aufstehenden Feinkornbetons a_F (vgl. Abbildung 55). Dadurch steht in der Mitte des Spritzkonus beim Feinkornbeton F4 deutlich mehr Feinkornbetonvolumen zur Verfügung, das sich beim Auftrag einer neuen Partikelschicht in die Porenräume verteilen kann.

Daneben ist in der Abbildung 72 zu erkennen, dass der Einbau einer weiteren Partikelschicht bei dem fließfähigen Feinkornbeton F4 (links) nur zu geringem lateralen Verschieben des Feinkornbetons führt (vgl. Spritzlayerbreite w_L mit Spritzlayerbreite innerhalb eines Layers $w_{L,i}$). Entsprechend muss sich der vorliegende aufstehende Feinkornbeton a_F im Wesentlichen vertikal nach oben und unten verdrängen. Bei dem zäheren Feinkornbeton F3 (rechts) indes kann eine große laterale Verschiebung erkannt werden, infolgedessen der Feinkornbeton F3 weniger ausgeprägt vertikal in das Partikelbett eindringen kann. Da das feinere Kalkstein-Partikelbett KS8-32 im Vergleich zu KS16-32 einen höheren vertikalen Eindringwiderstand aufweist (siehe auch Abbildung 73), wird dieser Effekt zusätzlich verstärkt.

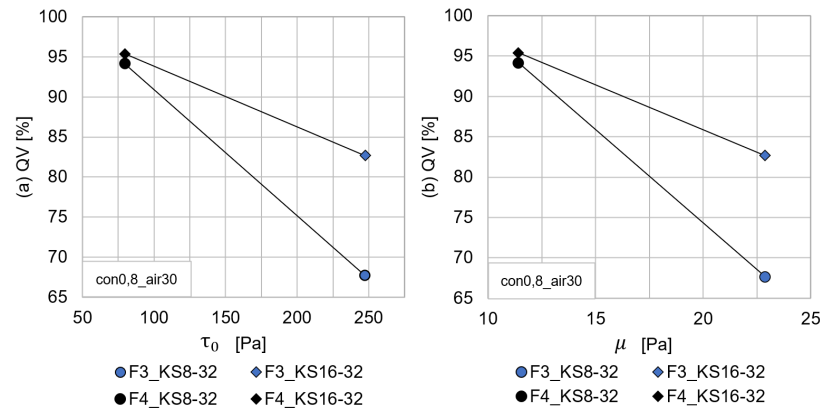


Abbildung 71: Querschnittsbezogener Verbund QV in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie die beiden Kalkstein-Partikelbetten (KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant)) für einen Betonvolumenstrom con0,8 und Luftvolumenstrom air30.

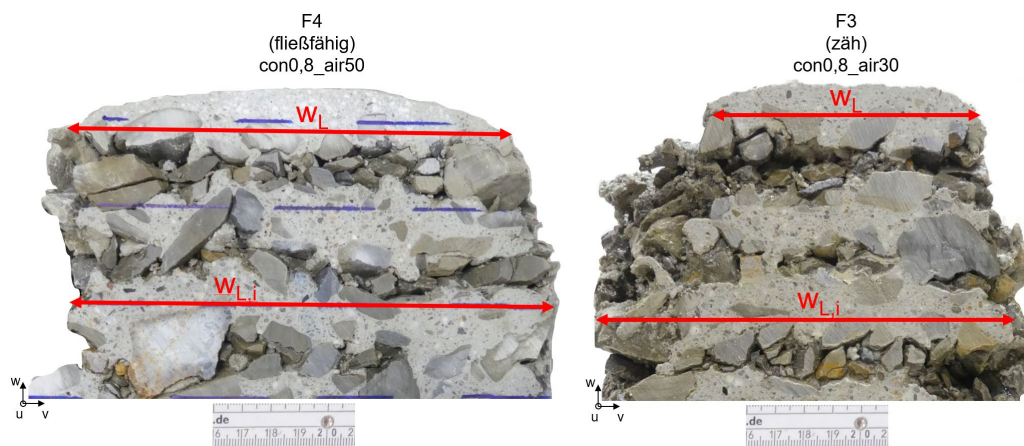


Abbildung 72: Verteilung des Feinkornbetons auf Partikeloberfläche (Spritzlayerbreite w_l) und innerhalb des Partikelbetts (Spritzlayerbreite $w_{L,i}$) für den (links) fließfähigen Feinkornbeton F4 und den (rechts) zäheren Feinkornbeton F3.

Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:

Der querschnittsbezogene Verbund QV ist in Abbildung 73 in Abhängigkeit des (a) mittleren Korndurchmessers d_{50} , der (b) Porosität ϵ , der (c) spezifischen Partikeloberfläche A_{Spezi} , dem (d) äquivalenten Porenradius R_{pore} und in Abbildung 74 in Abhängigkeit des (a) Formbeiwerts ψ_c (Plattigkeit) sowie der (b) Sphärizität S (Rundheit) dargestellt. Dabei nimmt der querschnittsbezogene Verbund QV mit einem abnehmenden Fließwiderstand der Partikelbetten von KS8-32, über KS16-32 zu Rez16-32 zu (abnehmender Fließwiderstand repräsentiert durch Zunahme: mittlere Korndurchmessers d_{50} , Porosität ϵ , äquivalenter Porenradius R_{pore} , Formbeiwert ψ_c sowie Sphärizität; abnehmender Fließwiderstand repräsentiert durch Abnahme: spezifischer Partikeloberfläche A_{Spezi}). Die Applizierung des Feinkornbetons unter Druck ist hierbei nicht der bestimmte Faktor für das Fließverhalten und den querschnittsbezogenen Verbund QV, sondern vielmehr der Einbau der nächsten Partikelschicht. Dabei hat die Rheologie des Feinkornbetons Zeit, in die Hohlräume des Partikelbettes zu fließen, so dass dann Partikelbetten mit höherer Permeabilität wie hier z.B. das Rezyklat-Partikelbett Rez16-32 vorteilhaft sind.

Intuitiv interpretiert fällt der Trend des querschnittsbezogenen Verbunds QV in Abhängigkeit der Porosität ϵ heraus. Allerdings führt eine Zunahme der Porosität ϵ zu einer Zunahme des effektiven Porenradius R_{pore} und dadurch zu einer Abnahme des Fließwiderstands (vgl. GL 7). Wie zuvor scheint aber auch hier der Unterschied der Porosität ϵ zwischen den Partikeln zu gering zu sein, um diese sinnvoll zu diskutieren.

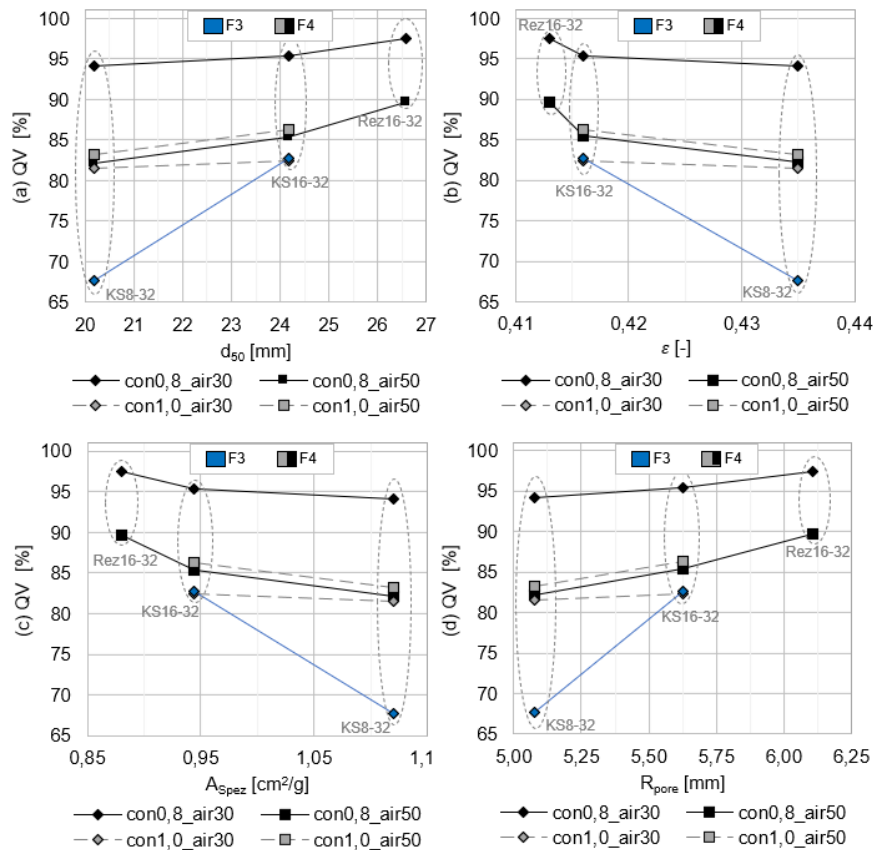


Abbildung 73: Querschnittsbezogener Verbund QV in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))

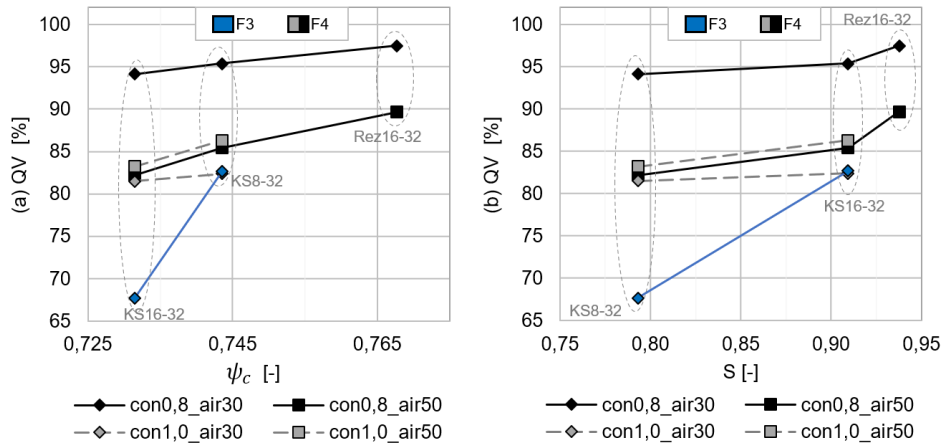


Abbildung 74: Querschnittsbezogener Verbund QV in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))

Einfluss aus den Prozessparametern:

In Abbildung 75 ist der querschnittsbezogene Verbund QV in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie Betonvolumenstrom (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie))

dargestellt. Für einen geringen Betonvolumenstrom $con0,8$ führt eine Zunahme des Luftvolumenstroms (d.h. Zunahme der kinetischen Energie) zu einer Abnahme des querschnittsbezogenen Verbunds QV. Wie im vorherigen Abschnitt bereits für den aufstehenden Feinkornbeton a_F und der Eindringtiefe e gezeigt, könnte dies auf die inhomogene Verteilung der Betonmasse sowie Gesteinskörnung über den Spitzkonus (abnehmend von Spritzkonusmitte zu -rand) sowie die Erhöhung der rheologischen Kennwerte (unter Erhöhung der kinetischen Beschleunigung, vgl. Abbildung 44(a) & Abbildung 45) zurück geführt werden (Ginouse und Jolin 2015; Ginouse et al. 2014; Li et al. 2009; Ginouse und Jolin 2014). Hiernach könnte eine Zunahme des Luftvolumenstroms (daher Zunahme der kinetischen Beschleunigung) zu einer stärkeren Konzentrierung der im Feinkornbeton enthaltenen Gesteinskörnung innerhalb des Spitzkonus sowie Erhöhung der Zähigkeit des Feinkornbetons führen, wodurch die Porenkanäle im Partikelbett schneller verstopfen. Infolgedessen stellt sich eine geringere Eindringtiefe e_2 und ein erhöhter aufstehender Feinkornbeton a_F ein. Unter einem hohen Betonvolumenstrom (d.h. niedriger kinetischer Beschleunigung) verbleibt der querschnittsbezogene Verbund QV auf einem ähnlich niedrigen Niveau.

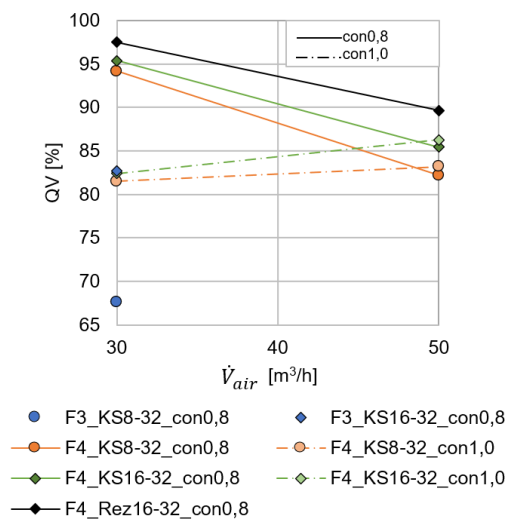


Abbildung 75: Querschnittsbezogener Verbund QV in das Partikelbett in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Betonvolumenstroms ($con0,8$ (durchgezogene dunkle Linie) und $con1,0$ (gestrichelte helle Linie)).

Einfluss aus angefeuchtetem Partikelbett:

In Abbildung 76 ist der querschnittsbezogene Verbund QV in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 dargestellt. Ein Anfeuchten des Partikelbetts führt hierbei zu einer Abnahme des querschnittsbezogenen Verbunds QV. Wie zuvor beschrieben könnte das vorherige Anfeuchten des Partikelbetts die auf der Partikeloberfläche natürlich anhaftende Steinmehlschicht binden und zu einem erhöhten Eindringwiderstand führen. Hierdurch kann sich der Feinkornbeton schlechter innerhalb des Partikelbetts ausbreiten. Beim Einbau einer neuen Partikelschicht würde sich der Feinkornbeton dann vornehmlich lateral verschieben und hierdurch die Abnahme des querschnittsbezogenen Verbunds QV erklären.

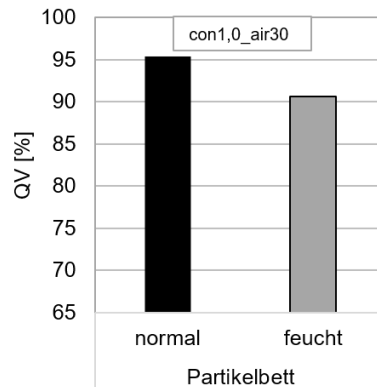
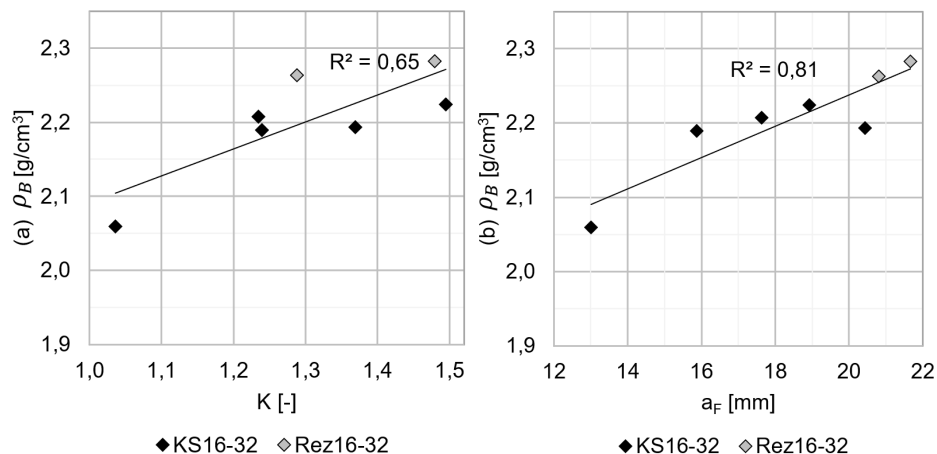


Abbildung 76: Querschnittsbezogener Verbund QV in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30.

8.7 Festbetoneigenschaft: Betondichte

In Abbildung 77 ist die Betondichte ρ_B in Abhängigkeit der (a) Kompaktheit K , des (b) aufstehenden Feinkornbetons a_F auf der Partikelbettoberfläche, der (c) Eindringtiefe e_2 des Feinkornbetons in das Partikelbett sowie des (d) querschnittsbezogenen Verbunds QV dargestellt. Nimmt die Kompaktheit K , der aufstehende Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche sowie der querschnittsbezogene Verbund QV zu, so nimmt auch die Betondichte ρ_B zu. Wie zuvor beschrieben, hängt eine hohe Kompaktheit K mit einer homogeneren aber auch erhöhten applizierten Menge an Feinkornbeton innerhalb des Spritzkonus zusammen. Die größere Betonmenge wiederum führt zu einer Erhöhung des aufstehenden Feinkornbetons a_F und zu einem verbesserten querschnittsbezogenen Verbund QV. Eine Zunahme der Eindringtiefe e_2 führt indes zu einer Abnahme der Betondichte ρ_B und lässt sich damit erklären, dass die Eindringtiefe e_2 eng mit dem aufstehenden Feinkornbeton a_F korreliert (vgl. Abbildung 54(c) – Zunahme der Eindringtiefe e_2 führt zu Abnahme des aufstehenden Feinkornbetons a_F).



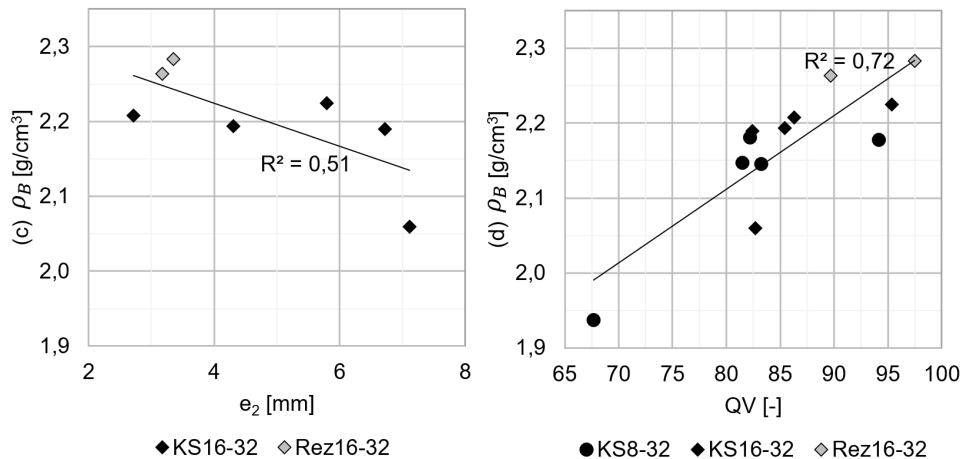


Abbildung 77: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit der (a) Kompaktheit K, des (b) aufstehenden Feinkornbetons a_F auf der Partikelbett Oberfläche, der (c) Eindringtiefe e_2 des Feinkornbetons in das Partikelbett sowie des (d) querschnittsbezogenen Verbunds QV für die drei Partikelbetten (KS8-32, KS16-32 & Rez16-32). (KS8-32 nicht darstellbar, da die Parameter in (a) bis (c) nicht berechenbar sind. In Abbildung nicht angegeben aber in den Werten enthalten: Variation zwischen den Feinkornbetonen F3 und F4 sowie Variation des Luft- (air30; air50) und Betonvolumenstroms (con0,8; con1,0). Regressionslinien jeweils über alle drei Partikelbetten.

Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:

In Abbildung 78 ist die Betondichte ρ_B in Abhängigkeit der (a) Fließgrenze τ_0 und der (b) Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 und F4 sowie Partikelbetten KS8-32 und KS16-32 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass eine Zunahme der rheologischen Kennwerte zu einer Abnahme der Betondichte ρ_B führt. Dieser Trend lässt sich mit den Erkenntnissen aus den vorherigen Abschnitten erklären, wonach ein zäherer Feinkornbeton zu einer Abnahme des aufstehenden Feinkornbetons a_F führt. Bei Einbau einer weiteren Partikelschicht wird der Feinkornbeton F3 stärker lateral verdrängt und dringt weniger stark vertikal in das Partikelbett ein (vgl. Abbildung 72). Dies führt zu einer Abnahme der gebundenen Querschnittsflächen QV innerhalb des Betons (vgl. Abbildung 71) und somit auch zu einer Abnahme der Betondichte ρ_B .

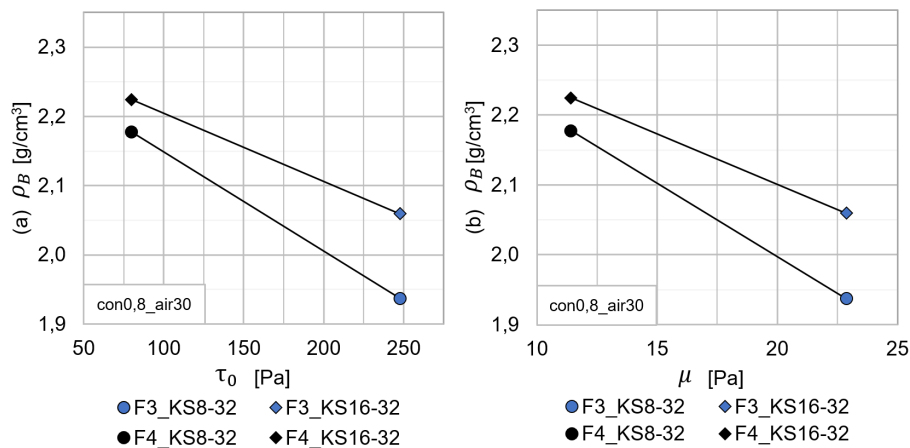


Abbildung 78: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie die beiden Kalkstein-Partikelbetten (KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant)) für einen Betonvolumenstrom von con0,8 und Luftvolumenstrom von air30.

Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:

Die Betondichte ρ_B ist in Abbildung 79 in Abhängigkeit des (a) mittleren Korndurchmessers d_{50} , der (b) Porosität ϵ , der (c) spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} , dem (d) äquivalenten Porenradius R_{pore} und in Abbildung 80 in Abhängigkeit des (a) Formbeiwerts ψ_c (Plattigkeit) sowie der (b) Sphärizität S (Rundheit)

dargestellt. Wie bereits für den querschnittsbezogene Verbund QV nimmt auch die Betondichte ρ_B mit einem abnehmenden Fließwiderstand des Partikelbetts zu (abnehmender Fließwiderstand repräsentiert durch Zunahme: mittlere Korndurchmessers d_{50} , Porosität ε , äquivalenter Porenradius R_{pore} , Formbeiwert ψ_c sowie Sphärizität; abnehmender Fließwiderstand repräsentiert durch Abnahme: spezifischer Partikeloberfläche A_{spez}). Demnach erzielt das Rezyklat-Partikelbett Rez16-32 trotz geringer Partikelrohichte (KS: 2701 kg/m³ vs. Rez: 2560 kg/m³) aufgrund des geringsten Fließwiderstands der drei untersuchten Partikelbettvarianten und des hiermit einhergehenden verbesserten Eindringverhaltens und Verbund die höchsten Betondichten.

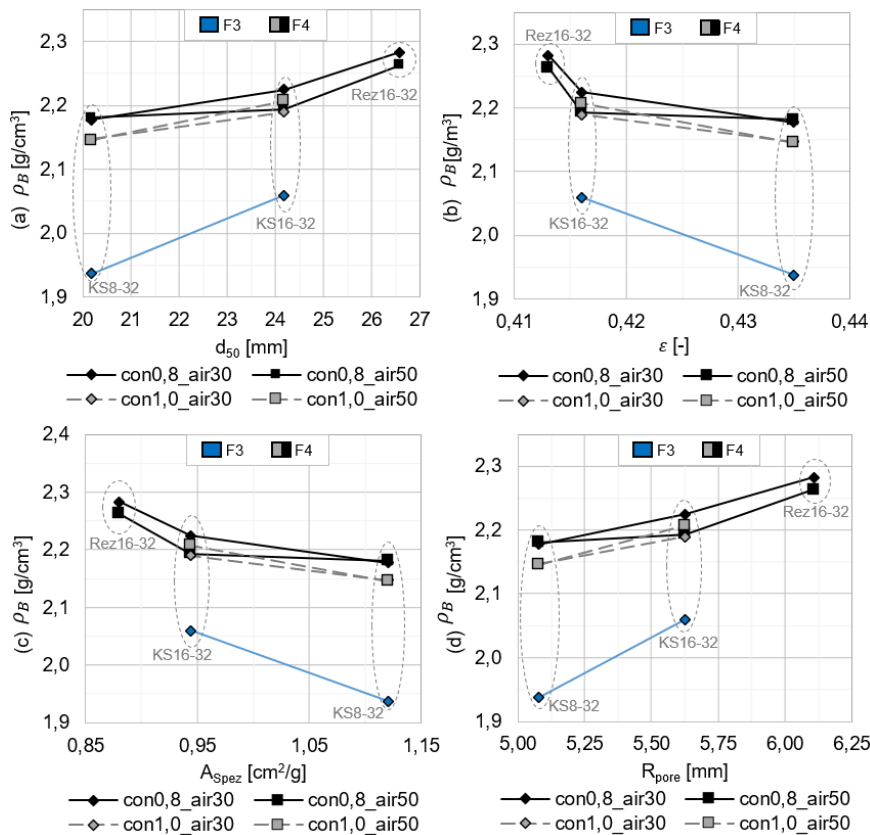


Abbildung 79: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ε , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{spez} und (d) des äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).

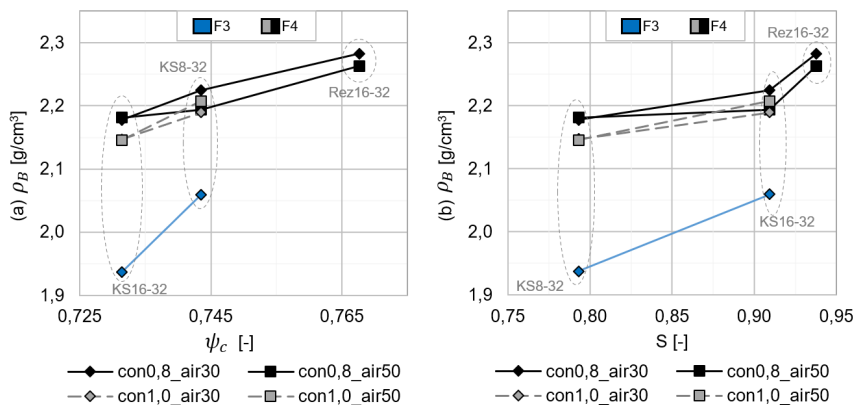


Abbildung 80: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32)

sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).

Einfluss aus den Prozessparametern:

In Abbildung 81 ist die Betondichte ρ_B in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie Betonvolumenstrom (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)) dargestellt. Hierbei führt eine Zunahme des Luftvolumenstroms zu keiner signifikanten Änderung der Betondichte ρ_B . Ein kleiner Betonvolumenstroms con0,8 führt indes zu einer leichten Zunahme der Betondichte ρ_B , was mit einer erhöhten kinetischen Beschleunigung der Partikel zusammenhängen könnte. Dennoch scheint die Betondichte ρ_B aber von den hier gewählten Prozessparametern im Vergleich zum Einfluss aus der Rheologie und dem Partikeltyp selber nur wenig beeinflusst zu sein.

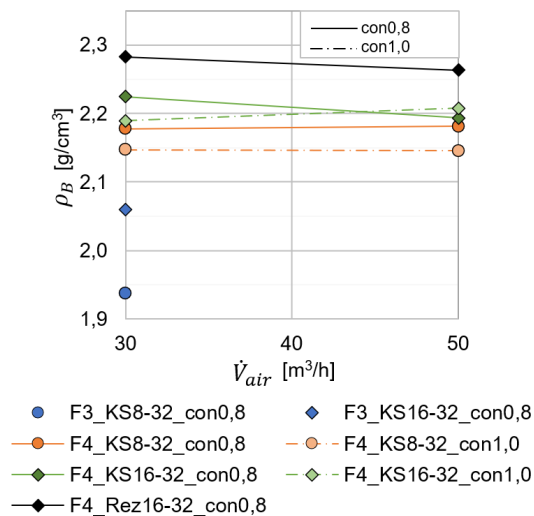


Abbildung 81: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)).

Einfluss aus angefeuchtetem Partikelbett:

In Abbildung 82 ist die Betondichte ρ_B in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 dargestellt. Ein Anfeuchten des Partikelbetts führt hierbei zu einer vernachlässigbaren kleinen Zunahme der Betondichte ρ_B .

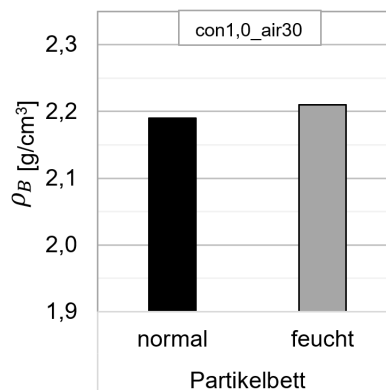


Abbildung 82: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30.

8.8 Festbetoneigenschaft: Druckfestigkeit

In Tabelle 9 ist eine Übersicht der LP3DCP- sowie konventionell hergestellten Referenz (REF)-Würfeldruckfestigkeiten in Abhängigkeit der Material- und Prozessparameter dargestellt. In Abbildung 83(a) ist die REF-Würfeldruckfestigkeit für Proben, bestehend nur aus Feinkornbeton für die beiden Feinkornbetone F3 und F4 dargestellt. Der Feinkornbeton F4 erzielt hierbei aufgrund des höheren Wasser-Feinstoffanteils (d.h. einer größeren enthaltenen Wassermenge) eine geringere REF-Würfeldruckfestigkeit. Der gleiche Trend ist auch in Abbildung 83(b) zu erkennen, wobei hier die REF-Proben aus Feinkornbeton und Gesteinskörnung bestehen. Trotz gleichem Feinkornbeton F3 oder F4 kann ein Unterschied zwischen den eingesetzten Partikelbetten erkannt werden (bspw. weist Rezyklat-Partikelbett leicht höhere Festigkeiten als die Kalkstein-Partikelbetten auf). Das bedeutet, dass für den Vergleich der LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit zwischen den beiden Feinkornbetonen F3 und F4 sowie in Abhängigkeit der Partikelbeteigenschaften die Ergebnisse nicht direkt verglichen werden können. Der gesehene Einfluss auf die Würfeldruckfestigkeit könnte dann bspw. alleinig aus den Unterschieden der Festbetonmatrix selber stammen (vgl. Tabelle 9 – reiner Feinkornbeton: F3 - 52,0 N/mm² vs. F4 – 37,7 N/mm²). Gleiches gilt für die Untersuchung der Einflüsse aus den Partikelbeteigenschaften. Hier könnten höhere Würfeldruckfestigkeiten statt aus verbessertem Eindringverhalten des Partikelbetts auch aus den Festigkeiten der Partikeln selber stammen. Zur Vermeidung einer Fehlinterpretation werden daher der Einflüsse aus Rheologie sowie Partikelbett anhand der Ausschöpfung A diskutiert. Die Ausschöpfung A beschreibt das prozentuale Verhältnis der LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit zur REF-Würfeldruckfestigkeit. Als Bezugshorizont werden dabei die konventionell hergestellten Würfeldruckfestigkeiten, bestehend aus Feinkornbeton und Gesteinskörnung, herangezogen. Der Grund hierfür ist, dass die Würfeldruckproben ein Versagen sowohl in der Feinkornmatrix wie auch in der Gesteinskörnung aufzeigen. Eine Ausschöpfung A = 100 % beschreibt dabei, dass die LP3DCP- und REF-Proben die gleiche Würfeldruckfestigkeit erzielt haben. Liegt der Wert unter 100 %, so haben die LP3DCP- im Vergleich zu den REF-Proben noch nicht die maximal mögliche Festigkeit ausgeschöpft.

Außerdem ist in Tabelle 9 die Standardabweichung der Würfeldruckfestigkeit dargestellt. Tendenziell erzielen die LP3DCP-Proben hergestellt mit dem Kalkstein-Partikelbett geringere Standardabweichungen als die REF-Proben. Bei den LP3DCP-Proben weist das Rezyklat- im Vergleich zum Kalkstein-Partikelbett etwas höhere Standardabweichungen auf, wobei diese im Bereich der Standardabweichung der konventionell hergestellten Proben liegen.

Tabelle 9

Übersicht der LP3DCP- sowie konventionell hergestellter Referenz-Würfeldruckfestigkeit sowie der Standardabweichung in Abhängigkeit der Materialparameter (Feinkornbeton (F3; F4); Partikelbett (KS8-32; KS16-32; Rez16-32)) und Prozessparameter (Betonvolumenstrom (con0,8; con1,0); Luftvolumenstrom (air30; air50)). LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit parallel und rechtwinklig zur Layerausrichtung. Konventionell hergestellte Würfeldruckfestigkeit: „nur F“ = Würfeldruckfestigkeit nur an Feinkornbeton

getestet sowie Würfeldruckfestigkeit an Proben bestehend aus Feinkornbeton und Gesteinskörnung (KS8-32; KS16-32; Rez16-32).

Feinkorn- beton	Prozess- parameter	LP3DCP						Konventionell			
		Druckfestigkeit parallel			Druckfestigkeit rechtwinklig			nur F	KS8- 32	KS16 -32	Rez16- 32
		KS8- 32	KS16 -32	Rez16- 32	KS8- 32	KS16 -32	Rez16- 32				
	[m ³ /h]	[N/mm ²]			[N/mm ²]			[N/mm ²]			
F3	con0,8_air30	14,1	15,6		5,8	8,7		52,0	23,3	34,9	
F4	con0,8_air30	14,1	14,6	26,4	10,5	11,0	16,4	37,7	13,2	13,4	16,8
F4	con0,8_air50	16,9	15,4	22,0	10,9	9,4	17,8	37,7	13,2	13,4	16,8
F4	Con1,0_air30	14,6	13,6		8,8	9,4		37,7	13,2	13,4	
F4	Con1,0_air50	15,3	13,7		10,2	9,6		37,7	13,2	13,4	
Standardabweichung											
	Min	1,4	0,8	4,3	0,8	0,5	3,0	2,3	1,2	3,0	3,9
	Mittel	1,9	1,3	4,6	1,8	1,9	3,8	3,4	4,8	3,4	3,9
	Max	2,9	1,6	4,8	3,3	2,9	4,7	4,4	8,3	3,8	3,9

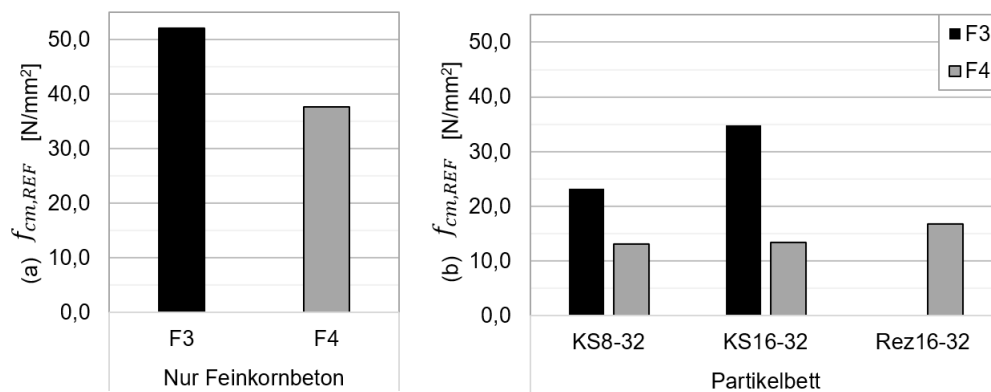


Abbildung 83: Konventionell hergestellte Referenz-Würfeldruckfestigkeit für (a) Proben, bestehend nur aus Feinkornbetonen für die beiden Feinkornbetonvarianten (F3; F4) sowie (b) Proben, bestehend aus Feinkornbeton und Partikelbett für die beiden Feinkornbetonvarianten (F3; F4) sowie den drei Partikelbetten (KS8-32; KS16-32; Rez16-32)

In Abbildung 84 ist der Zusammenhang zwischen der LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit parallel (a) sowie der LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit rechtwinklig ((b) und (c)) zur Layerausrichtung zu den in vorherigen Abschnitten untersuchten Parametern mit eindeutiger Korrelation gezeigt. Für alle anderen hier nicht gezeigten Parametern lag keine eindeutige, nur eine schwache oder widersprüchliche Korrelation vor und wird daher nicht weiter diskutiert.

Nach Abbildung 84(a) zeigt eine zunehmende LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit parallel zur Layerausrichtung eine enge Korrelation mit einem zunehmenden aufstehenden Feinkornbeton a_F auf. Der Lastabtrag parallel zur Layerausrichtung erfolgt dabei über die „säulenähnlich“ gebundenen Bereiche des Partikelbetts (vgl. Abbildung 85(b): schwarz markierte Bereiche und Trajektorienverlauf). Je größer der zunehmende aufstehende Feinkornbeton a_F ist, desto breiter werden die zum Lastabtrag

vorliegenden parallelgeschalteten „Säulen“ und erhöhen dadurch die Druckfestigkeit parallel zur Layerausrichtung.

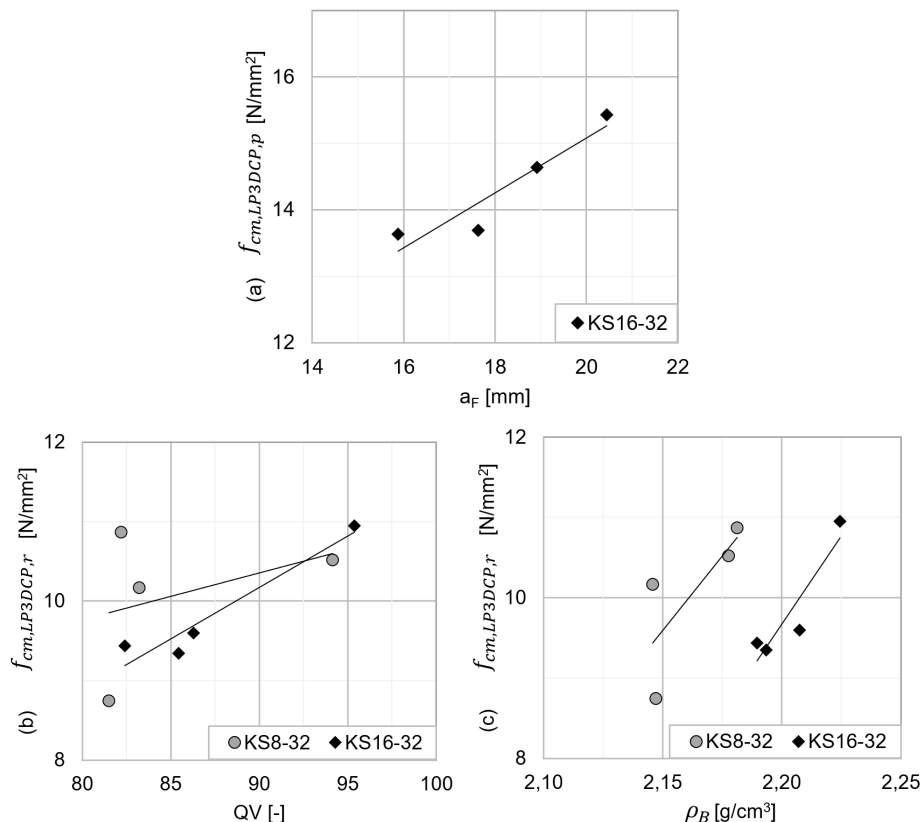


Abbildung 84: (a) LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit parallel zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des aufstehenden Feinkornbetons a_F für das Partikelbett KS16-32 sowie LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des (b) querschnittsbezogenen Verbunds QV sowie (c) Betondichte ρ_B für die beiden Partikelbetten KS8-32 und KS16-32.

In Abbildung 84(b) und (c) ist die LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des querschnittsbezogenen Verbunds QV sowie Betondichte ρ_B gezeigt. Zu beiden Parametern zeigt die LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit rechtwinklig zur Layerausrichtung ein positiv proportionales Verhalten auf. Die Ableitung der Kräfte (Trajektorienverlauf) ist schematisch in Abbildung 85(c) dargestellt, wonach der Kräftefluss über die gebundenen Bereiche sowie die überbrückende Gesteinskörnung erfolgt. Bei Überschreitung der Festigkeiten der durchgehenden gebundenen Bereiche werden auch die ungebundenen oder schwachgebundenen Partikelbettbereiche über direkten Kontakt der Partikel selber aktiviert. Der Lastabtrag erfolgt daher als in Reihe geschalteten Schichten. Je größer somit der querschnittsbezogene Verbund ist, desto größer ist die LP3DCP-Betondichte (vgl. Abbildung 77(d)) und der Reihenschaltung liegen größere durchgehend gebundene Bereiche zur Lastabtrag vor. Hierdurch steigt die LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit rechtwinklig zur Layerausrichtung an. Die hier untersuchten Querschnitte weisen aber nie ein $QV = 100\%$ auf (vgl. Abbildung 75: $60\% < QV < 100\%$), was sich insbesondere auf die LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit rechtwinklig zur Layerausrichtung negativ auswirkt, welche dadurch immer unter der Festigkeit der LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit parallel zur Layerausrichtung liegt (vgl. Tabelle 9).

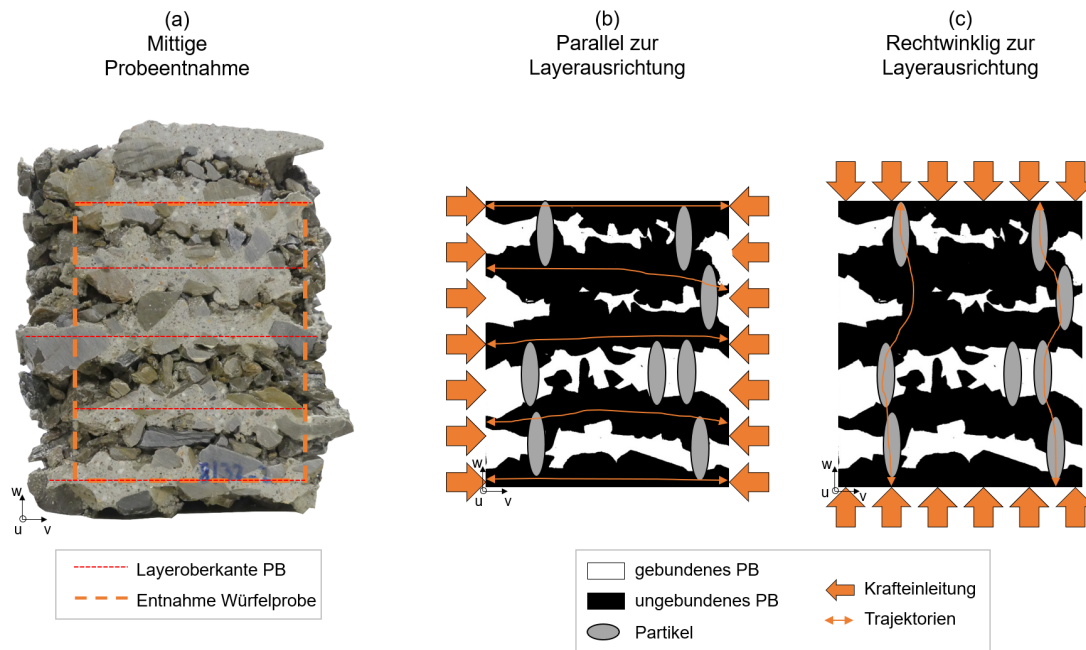


Abbildung 85: Modell zur Ableitung von Kräften in einem LP3DCP-Gefüge: (a) Entnahme der Würfelpressfestigkeitsproben aus dem LP3DCP-Querschnitt, (b) Würfelpressprüfung parallel zur Layerausrichtung und (c) Würfelpressprüfung rechtwinklig zur Layerausrichtung.

Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:

In Abbildung 86 ist die Ausschöpfung A parallel und rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit der (a) Fließgrenze τ_0 und der (b) Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 und F4 sowie Partikelbetten KS8-32 und KS16-32 dargestellt. Wie bei den zuvor ermittelten Kennwerten (bspw. ungebundene Schicht h_u , aufstehender Feinkornbeton a_f , querschnittsbezogener Verbund QV , Betondichte ρ_B) zeigt sich ein positiver Einfluss auf die Ausschöpfung A sowohl parallel wie auch rechtwinklig zur Layerausrichtung bei Abnahme der rheologischen Kennwerte. Dies lässt sich durch das zuvor beschriebene Fließverhalten des Feinkornbetons F4 erklären, wonach dieser zu einem höheren Betonvolumen in der Mitte des Spritzkonus, einem höheren aufstehenden Feinkornbeton a_f , einem verstärkten vertikalen Fließen während des Aufbringens der neuen Partikelschicht und damit zu einem verbesserten querschnittsbezogenen Verbund QV führt. Die Proben zur Prüfung der Würfelpressfestigkeiten werden außerdem mittig aus dem LP3DCP-Querschnitt entnommen (vgl. Abbildung 85(a)) und liegen somit insbesondere für den Feinkornbeton F4 zu großen Teilen innerhalb des Spritzkonus mit erhöhtem Feinkornbetonauftrag (vgl. Abbildung 48(a)), was in der Konsequenz zu einem erhöhten Anteil an gebundenen Flächen und somit zu höheren Festigkeiten führt.

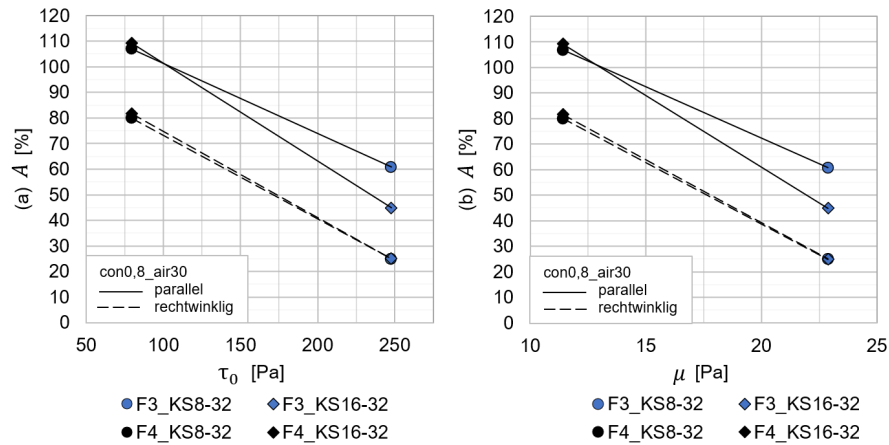


Abbildung 86: Ausschöpfung A parallel (durchgezogene Linie) und rechtwinklig (gestrichelte Linie) zur Layerausrichtung in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie die beiden Kalkstein-Partikelbetten (KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant)) für einen Betonvolumenstrom von con0,8 und Luftvolumenstrom von air30.

Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:

Die Ausschöpfung A_p parallel zur Layerausrichtung ist in Abbildung 87 in Abhängigkeit des (a) mittleren Korndurchmessers d_{50} , der (b) Porosität ϵ , der (c) spezifischen Partikeloberfläche A_{spez} , dem (d) äquivalenten Porenradius R_{pore} und in Abbildung 88 in Abhängigkeit des (a) Formbeiwerts ψ_c (Plattigkeit) sowie der (b) Sphärizität S (Rundheit) gezeigt. In Übereinstimmung mit den Erkenntnissen der vorherigen Abschnitte kann hier vorsichtig interpretiert werden, dass das Rezyklat-Partikelbett im Vergleich zu den beiden Kalkstein-Partikelbetten aufgrund des geringeren Fließwiderstand eine höhere Ausschöpfung A_p und somit im Verhältnis auch höhere Festigkeiten erzielt (abnehmender Fließwiderstand repräsentiert durch Zunahme: mittlere Korndurchmessers d_{50} , Porosität ϵ , äquivalenter Porenradius R_{pore} , Formbeiwert ψ_c sowie Sphärizität; abnehmender Fließwiderstand repräsentiert durch Abnahme: spezifischer Partikeloberfläche A_{spez}). Die Ausschöpfung A_r rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit der Partikelkennwerte zeigt die gleichen Trends wie die Ausschöpfung A_p parallel zur Layerausrichtung und kann dem Anhang (Abbildung 121 und Abbildung 122) entnommen werden.

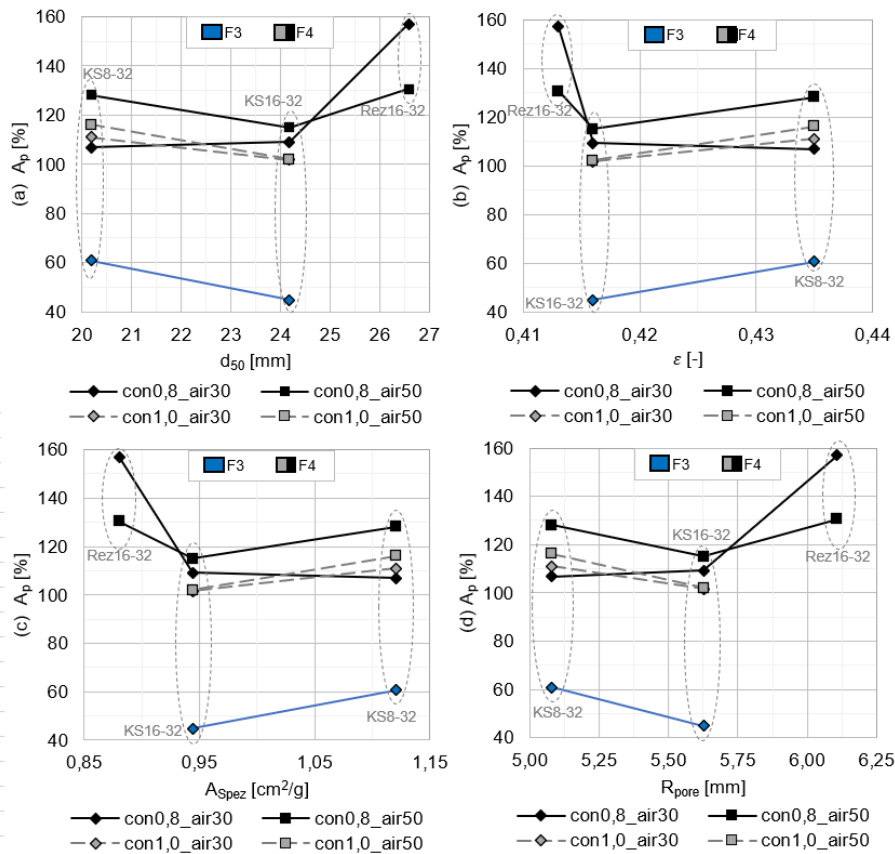


Abbildung 87: Ausschöpfung A_p parallel zur Layerausrichtung in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{spez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)). Ausschöpfung A_r rechtwinklig zur Layerausrichtung kann dem Anhang Abbildung 121 entnommen werden.

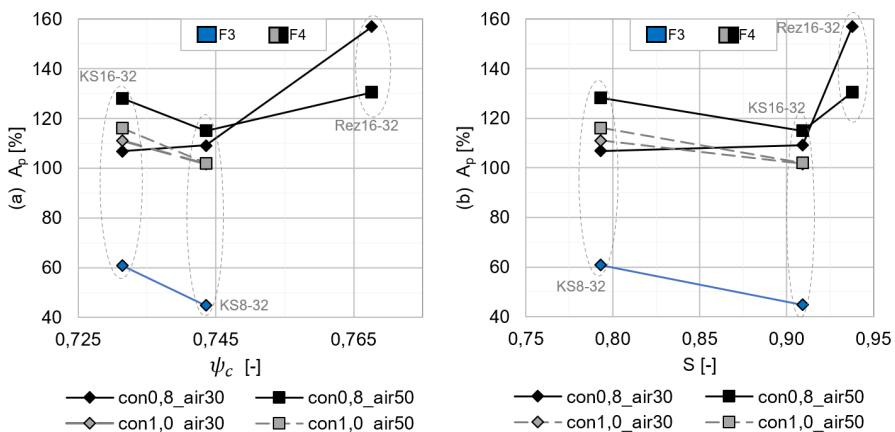


Abbildung 88: Ausschöpfung A_p rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).

con1,0 (graue gestrichelte Linien)). Ausschöpfung A_r rechtwinklig zur Layerausrichtung kann dem Anhang Abbildung 121 und Abbildung 122 entnommen werden.

Einfluss aus den Prozessparametern:

In Abbildung 89 ist die LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit (b) parallel und (a) rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie Betonvolumenstrom (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)) dargestellt. Die in Abbildung 89 gezeigten Würfeldruckfestigkeiten weisen sowohl parallel wie auch rechtwinklig zur Layerausrichtung nur eine geringe oder keine Signifikanz auf (vgl. Tabelle 9 – Standardabweichung Kalkstein: 0,5 N/mm² bis 3,3 N/mm² und Rezyklat: 3,0 N/mm² bis 4,8 N/mm²) und sollten entsprechend nur vorsichtig interpretiert werden. Zusätzlich zeigt dies, dass die Wahl der hier untersuchten Prozessparameter nur einen untergeordneten Einfluss auf die Festigkeit besitzen und vielmehr die Partikelform (plattig, wenig rund vs. wenig plattig und sehr rund) und die Rheologie des Feinkornbetons maßgeblich die Festigkeit bestimmt.

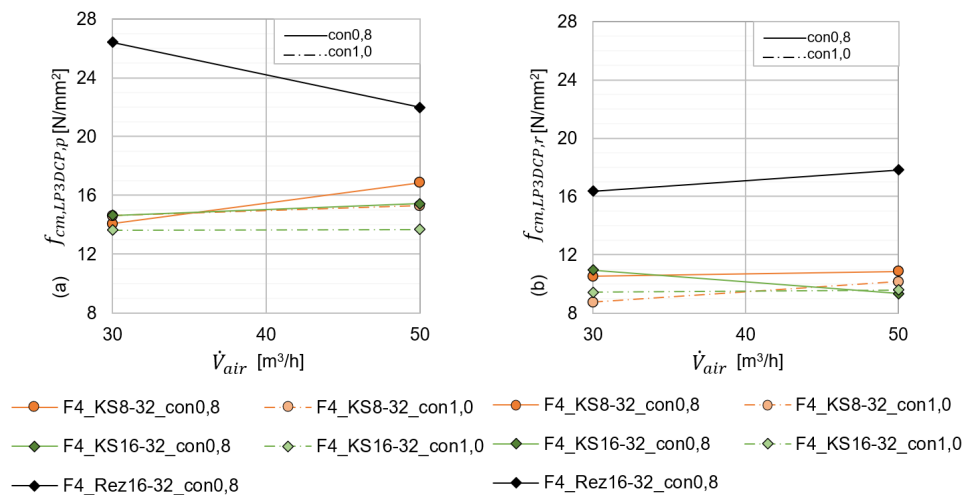


Abbildung 89: LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit (a) parallel und (b) rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)).

Dennoch nimmt nach Abbildung 89(a) unter Zunahme der kinetischen Beschleunigung (Zunahme des Luftvolumenstroms und Abnahme des Betonvolumenstroms) für das Kalkstein-Partikelbett die Würfeldruckfestigkeit parallel zur Layerausrichtung leicht zu. Dies könnte mit der plattigen, wenig runden Kornform des Kalkstein-Partikelbetts und der geringeren Durchlässigkeit in Zusammenhang stehen. Hierbei führt eine Zunahme der kinetischen Beschleunigung zu einer Zunahme des aufstehenden Feinkornbetons a_r , welcher insbesondere auf Höhe und über der Layeroberkante stärker verdichtet wird (vgl. Abbildung 90 – grauer Bereich und Abbildung 85(b)). Der Lastabtrag erfolgt nach Abbildung 85(a) über die stärker verdichteten „Säulen“ und führt dadurch zu leicht höheren Festigkeiten.

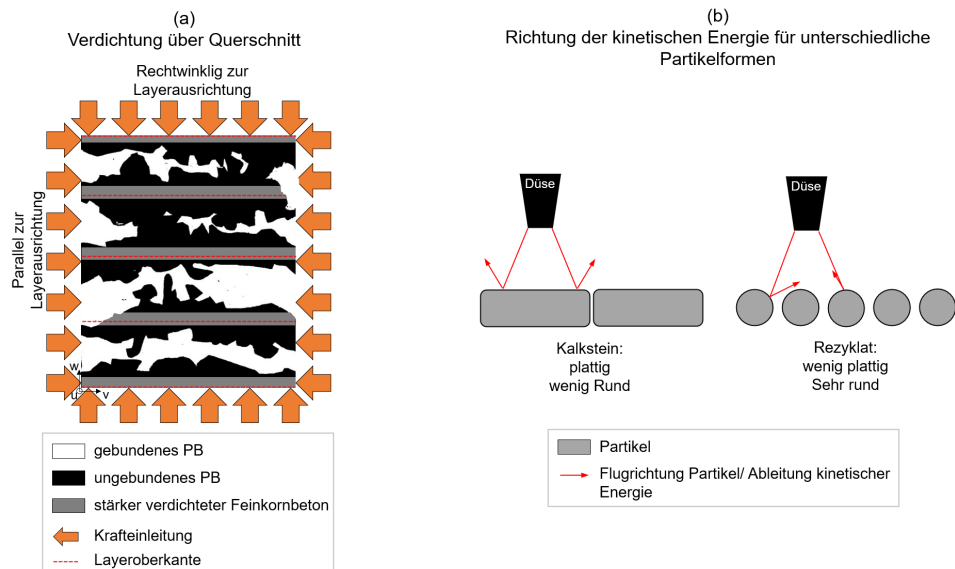


Abbildung 90: Schematische Darstellung der (a) Bereiche mit einer erhöhten Verdichtung des Feinkornbetons in Abhängigkeit der Prozessparameter bei plattiger, wenig runder Partikelform und (b) Richtung der kinetischen Energie nach Auftreffen auf unterschiedlichen Partikelformen

Für das Rezyklat-Partikelbett nimmt mit zunehmender kinetischer Beschleunigung die Würfeldruckfestigkeit parallel zur Layerausrichtung jedoch ab. Dies könnte möglicherweise auf die geringere Plattigkeit sowie auf die größere Rundheit der Partikel zurückgeführt werden. Eine stärkere Beschleunigung des Feinkornbetons könnte zu einem weniger kontrollierten Auf- und Abprall auf den Partikeln und somit zu einer ineffizienteren Verdichtung der „lastabtragenden Säulen“ führen (vgl. Abbildung 85(b)).

Die Würfeldruckfestigkeit nach Abbildung 89(b) rechtwinklig zur Layerausrichtung zeigt trotz großer Unterschiede des querschnittsbezogenen Verbunds QV (vgl. Abbildung 75) keine Abhängigkeit von den Prozessparametern auf. Die Gründe hierfür könnten an dem in Reihe geschalteten Lastabtrag liegen (vgl. in Abbildung 85(c)). Hiernach würde der Kraftfluss über die verdichteten Feinkornbereiche auf Höhe der Layeroberkante und nachfolgend über die Partikel zwischen den verdichteten Feinkornbereich-Säulen fließen. Das Versagen tritt dann nicht im „verdichteten Feinkornbereich“ auf, sondern in den Übergangsbereichen zu den ungebundenen Bereichen, so dass die Prozessparameter keine Rolle spielen.

Einfluss aus angefeuchtem Partikelbett:

In Abbildung 91 ist die LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit parallel (schwarz) sowie rechtwinklig (grau) zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 dargestellt. Wie zuvor für die Prozessparameter sind auch hier die Ergebnisse nicht oder nur wenig signifikant und sollten daher vorsichtig interpretiert werden. In den vorherigen Abschnitten wurde bereits beschrieben, dass aufgrund des Anfeuchtens des Partikelbetts die natürlich vorliegende Steinmehlschicht an die Gesteinskörnungsschicht gebunden und dies zu einem erhöhten Eindringwiderstand führen könnte (da bspw. der äquivalente Porenradius R_{pore} abnimmt). Hieraus ergibt sich ein größerer aufstehender Feinkornbeton a_F (vgl. Abbildung 62), jedoch eine sehr geringe Eindringtiefe e_2 in die darunterliegende Schicht (vgl. Abbildung 67). Das applizierte Feinkornbetonband liegt somit weniger im Übergangsbereich zweier Layer (vgl. Abbildung 53), sondern vielmehr innerhalb eines einzelnen Layers. Zusätzlich dringt der höhere aufstehende Feinkornbeton a_F tiefer in den Layer ein und bindet die einzelne Gesteinskörnungsschichten innerhalb eines Layers (jedoch nicht zu verwechseln mit dem querschnittsbezogenen Verbund QV nach Abbildung 76, welche bei Anfeuchtung des Partikelbetts sogar sinkt). Zwischen den Layer liegt aber nur noch ein geringer Verbund

vor, d.h. die einzelnen Layer tragen wie übereinander gelegte Balken. Die einzelnen Balken oder „Säulen“ innerhalb des Layer versagen dadurch frühzeitig bei einer Belastung parallel zur Layerausrichtung (vgl. Lastabtrag über nicht verklebte Strohhalme). Dennoch führt der höher aufstehende Feinkornbeton a_F innerhalb dieser Balken und die dadurch verbesserte Überbrückung zwischen den Feinkornbetonschichten und den einzelnen Gesteinskörnungsschichten innerhalb des Layers zu einer Erhöhung der Würfeldruckfestigkeit rechtwinklig zur Layerausrichtung.

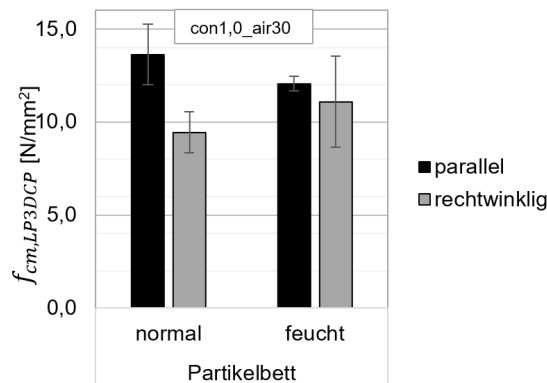


Abbildung 91: LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit parallel (schwarz) und rechtwinklig (grau) zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom $con1,0$ und Luftvolumenstrom $air30$.

8.9 Festbetoneigenschaft: Isotropie des LP3DCP-Betons

Der vorherige Abschnitt zur Untersuchung der Würfeldruckfestigkeit zeigt, dass die LP3DCP-Proben eine große Abhängigkeit von der Prüfrichtung besitzen (parallel oder rechtwinklig zur Layerausrichtung). Zur Bestimmung der Isotropie I wird das Verhältnis aus der Würfeldruckfestigkeit rechtwinklig und parallel zur Layerausrichtung betrachtet (vgl. Tabelle 9 und GL 8). Eine Isotropie von 100 % bedeutet, dass der Beton komplett isotrop ist, d.h. die gleichen Würfeldruckfestigkeiten parallel wie auch rechtwinklig zu Layerausrichtung besitzt.

Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:

In Abbildung 92 ist die Isotropie in Abhängigkeit der (a) Fließgrenze τ_0 und der (b) Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 und F4 sowie Partikelbetten KS8-32 und KS16-32 dargestellt. Hiernach nimmt die Isotropie I des LP3DCP-Betons mit Zunahme der rheologischen Kennwerten ab. Somit sinkt mit einem zäheren Feinkornbeton die Isotropie I des Feinkornbetons ab. Wie in den vorherigen Abschnitten bereits beschrieben, führt das stärkere laterale Fließen des Feinkornbetons F4 im Vergleich zu F3 zu einem größeren Auftragsvolumen am Feinkornbeton, einer Konzentrierung dieses Auftragsvolumen innerhalb des Spritzkonus und hierdurch zu einem höheren aufstehenden Feinkornbeton a_F (vgl. Abbildung 58). Zudem dringt der fließfähigere Feinkornbeton F4 beim Aufbringen einer neuen Partikelschicht besser vertikal in das Partikelbett ein, was zu einer deutlichen Zunahme des querschnittsbezogenen Verbunds QV führt (vgl. Abbildung 68). Die homogenere Verteilung des fließfähigeren Feinkornbetons F4 über den Querschnitt führt schlussendlich zu einem isotroperen Verhalten des LP3DCP-Betons.

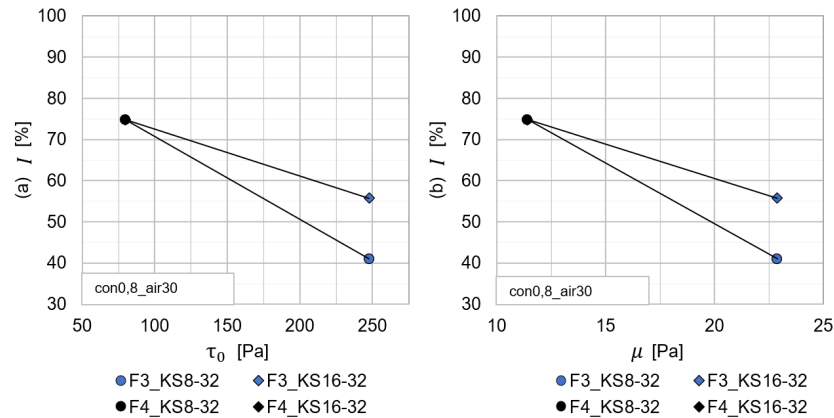


Abbildung 92: Isotropie I in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie die beiden Kalkstein-Partikelbetten (KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant)) für einen Betonvolumenstrom von con0,8 und Luftvolumenstrom von air30.

Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:

Die Isotropie I ist in Abbildung 93 in Abhängigkeit des (a) mittleren Korndurchmessers d_{50} , der (b) Porosität ϵ , der (c) spezifischen Partikeloberfläche A_{spez} , dem (d) äquivalenten Porenradius R_{pore} und in Abbildung 94 in Abhängigkeit des (a) Formbeiwerts ψ_c (Plattigkeit) sowie der (b) Sphärität S (Rundheit) dargestellt. Eine eindeutige allgemeingültige Aussage über den Einfluss der Partikel auf die Isotropie I ist nicht möglich. Dennoch scheint für eine geringe kinetische Beschleunigung (bei con1,0 – gestrichelte graue Linie) innerhalb der beiden Kalkstein-Partikelbetten (KS8-32; KS16-32) ein abnehmender Fließwiderstand mit einer Zunahme der Isotropie I einherzugehen (abnehmender Fließwiderstand repräsentiert durch – zunehmend: mittlere Korndurchmessers d_{50} , Porosität ϵ , äquivalenter Porenradius R_{pore} , Formbeiwert ψ_c sowie Sphärität; abnehmend: spezifischer Partikeloberfläche A_{spez}). Für eine hohe kinetische Beschleunigung (bei con0,8 – durchgezogene schwarze Linie) verbleibt oder nimmt die Isotropie I innerhalb der beiden Kalkstein-Partikelbetten (abnehmende Fließwiderstand von KS8-32 nach KS16-32). Dennoch scheint die Isotropie I weniger durch die Kennwerte der Partikelbetten als vielmehr durch die Rheologie und gewählten Prozessparameter bestimmt zu sein (vgl. Abbildung 92 und Abbildung 95).

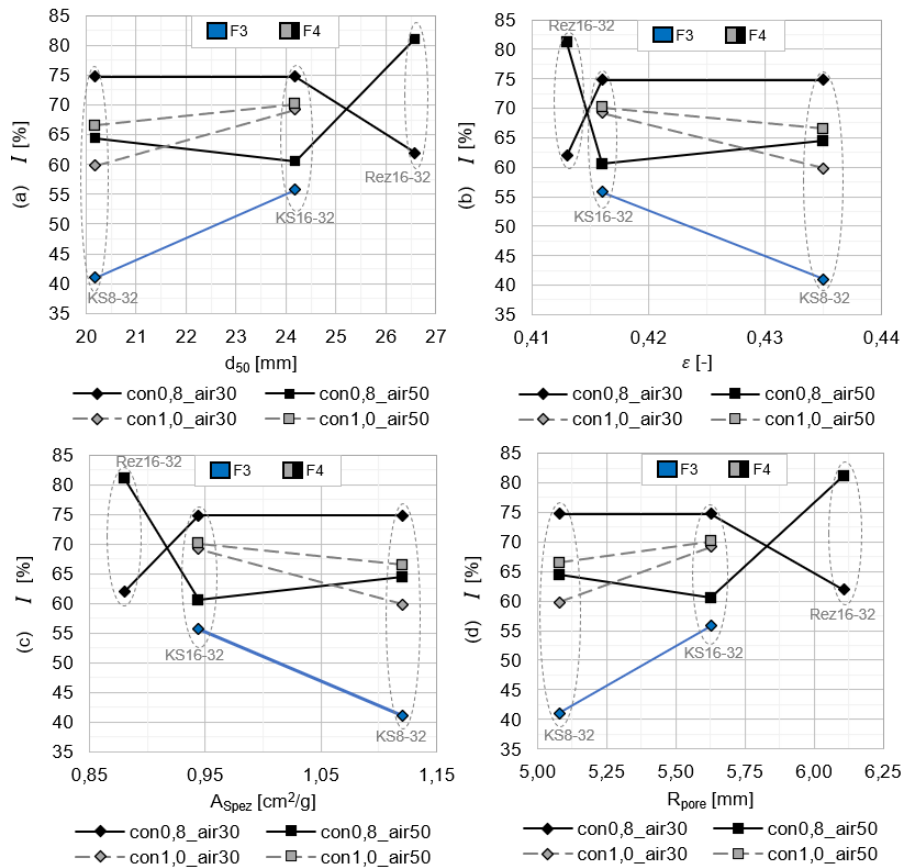


Abbildung 93: Isotropie I in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).

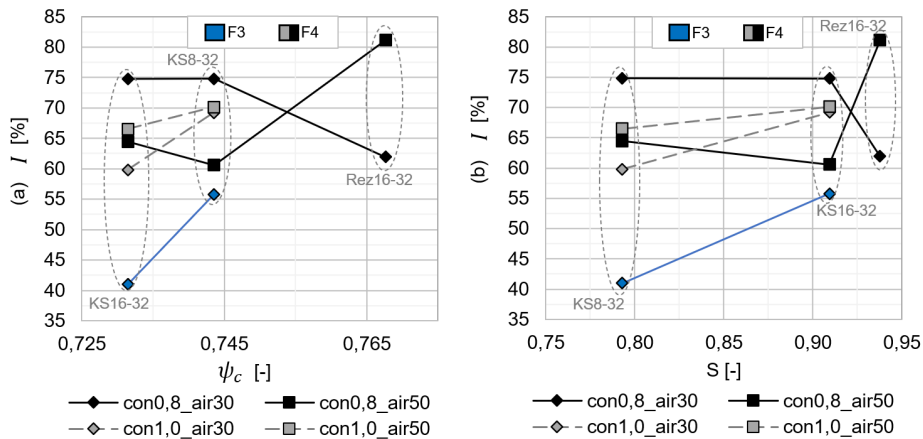


Abbildung 94: Isotropie I in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)).

Einfluss aus den Prozessparametern:

In Abbildung 95 ist die Isotropie I in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie))

dargestellt. Wie zuvor bei der Würfeldruckfestigkeit liegen auch hier entgegengesetzte Trends der Isotropie I für die Kalkstein- und Rezyklat-Partikelbetten (Abnahme des Fließwiderstands von Kalkstein- zu Rezyklat-Partikelbett) in Abhängigkeit der Prozessparameter vor.

Für die beiden Kalkstein-Partikelbetten führt eine hohe kinetische Beschleunigung (niedriger Betonvolumenstrom $con0,8$) zu einer Abnahme der Isotropie I. Dies könnte zum einen auf die plattige, wenig runde Kornform der Kalkstein-Partikelbetten zurückgeführt werden, bei welchem der auftreffende Beton sich stärker auf der Partikelbettoberfläche aufstaut und verdichtet wird (vgl. Abbildung 90 und Abbildung 61 - aufstehender Feinkornbeton a_F). Zusätzlich führt die Zunahme der kinetischen Beschleunigung zu einer Zunahme der Fließgrenze (vgl. Abbildung 43). Beim Einbau einer weiteren Partikelschicht wird sich der resultierende zähere Feinkornbeton stärker lateral verschieben und somit zu einer geringeren Isotropie I führen. Bei einer geringeren kinetischen Beschleunigung (hoher Betonvolumenstrom $con1,0$) führt jedoch eine Zunahme des Luftvolumenstroms zu einer größeren Isotropie I. Die Gründe hierfür könnten in einer geringen Verdichtung der aufgetragenen Feinkornbetonschicht sowie geringerer Zähigkeit (vgl. Abbildung 43) des Feinkornbetons und somit einem verbesserten vertikalen Eindringen liegen.

Im Kontrast zum Kalkstein-Partikelbett führt beim Rezyklat-Partikelbett eine hohe kinetische Beschleunigung (niedriger Betonvolumenstrom $con0,8$) zu einer Zunahme der Isotropie I. Offensichtlich führt der geringere Fließwiderstand (höhere Durchlässigkeit) aufgrund der weniger plattigen, runden Kornform des Partikelbetts zu einer verbesserten vertikalen Verteilung des Feinkornbetons im Partikelbett und somit zu einer verbesserten Isotropie I.

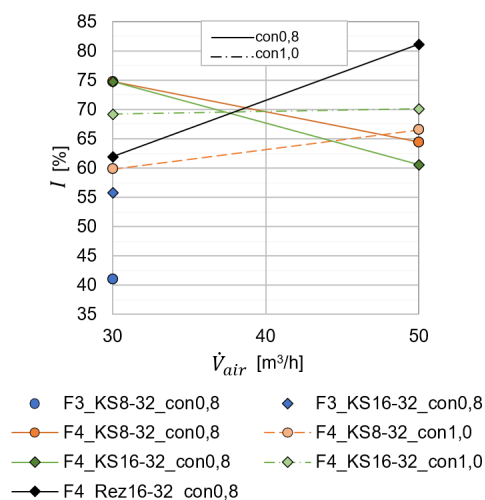


Abbildung 95: Isotropie I in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Betonvolumenstroms ($con0,8$ (durchgezogene dunkle Linie) und $con1,0$ (gestrichelte helle Linie)).

Einfluss aus angefeuchtetem Partikelbett:

In Abbildung 96 ist die Isotropie I in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 dargestellt. Hiernach führt das Anfeuchten des Partikelbetts zu einer Zunahme der Isotropie I und stimmt mit der Erklärung der Würfeldruckfestigkeit nach der Balken-Theorie überein. Dabei nimmt im Mittel die Würfeldruckfestigkeit (Mittelwert aus Würfeldruckfestigkeit parallel und rechtwinklig zur Layerausrichtung) für das angefeuchtete Partikelbett ab, führt aber zu einer größeren Isotropie I.

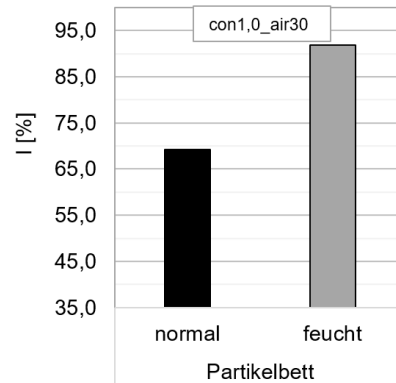


Abbildung 96: Isotropie I in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30

8.10 Zusammenfassung

Einfluss aus der Rheologie der Feinkornbetone:

Im Rahmen der Untersuchungsreihe U3 (Rheologie-, Material- & Prozessparameterstudie) werden die Erkenntnisse der Untersuchungsreihe U1 bestätigt, wonach die Rheologie des Feinkornbetons einen entscheidenden Einfluss auf Ergebnisse der LP3DCP-Proben besitzen. Dabei wird gezeigt, dass ein fließfähigerer Feinkornbeton ein verbessertes Eindringverhalten in das Partikelbett besitzt. Hierdurch erzielt ein fließfähigerer Feinkornbeton ein erheblich homogeneres LP3DCP-Betongefüge, eine deutlich höhere LP3DCP-Betondichten sowie deutlich höhere Druckfestigkeiten parallel und rechtwinklig zum Schichtverlauf. Außerdem erhöht ein fließfähigerer Feinkornbeton erheblich ein isotropes Verhalten der Festbetoneigenschaften. Während der Applizierung des Feinkornbetons kann ein fließfähiger Feinkornbeton aber auch zu einem stärkeren lateralen Fließen über den eigentlichen Spritzkonus hinausführen, wodurch es zu einer inhomogeneren horizontalen Verteilung des Feinkornbetons auf dem Partikelbett sowie zu einem breiteren LP3DCP-Querschnitt kommt (bei sonst gleichen Material- und Prozessparametern). Wird jedoch eine nächste Partikelschicht eingebaut, kann ein fließfähiger Feinkornbeton besser vertikal in das Partikelbett eindringen, wohingegen ein zäherer Feinkornbeton deutlich stärker lateral ausweicht.

Einfluss aus den Kennwerten des Partikelbetts:

Daneben wird auch gezeigt, dass das Partikelbett einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der LP3DCP-Proben besitzt. Während des Einbaus der Partikel in die einzelnen Partikelbettschichten entsteht sowohl zur Schalungsumrandung wie auch zwischen den einzelnen Layern ein Wandeffekt, wodurch die Partikel sich nicht frei legen können. Dies führt zu einer größeren Porosität im Vergleich zur klassischen Bestimmung (über ein großes Probenvolumen) und muss für das LP3DCP-Verfahren in Wand- bzw. Bauboxnähe berücksichtigt werden. Zusätzlich kann gezeigt werden, dass jedes Partikelbett in Abhängigkeit der Partikelkennwerte (bspw. Kornform, spezifische Oberfläche der Partikel, effektiver Porenradius im Partikelbett) eine spezifische Oberflächenrauigkeit sowie einen Fließwiderstand im Partikelbett aufweist und dadurch einen Einfluss auf das Fließverhalten des Feinkornbetons besitzen. Die spezifische Oberflächenrauigkeit beeinflusst dabei das laterale und der Fließwiderstand im Partikelbett das vertikale Fließen. Die hier verwendeten Kalkstein-Partikelbetten weisen dabei eine plattige und wenig runde Partikelform auf, wohingegen das Rezyklat-Partikelbett eine geringe Plattigkeit und rundere Partikelform besitzen. Eine plattige Partikelform besitzt eine geringere spezifische Oberflächenrauigkeit, was ein stärkeres laterales Fließen ermöglicht. Zusätzlich erhöht eine plattige Partikelform den vertikalen Fließwiderstand und führt somit zusätzlich zu einem reduzierten Eindringen in das Partikelbett. Für die hier verwendeten Material- und Prozessparameter wird das vertikale

Eindringverhalten von dem auf der Partikeloberfläche aufstehenden Feinkornbeton bestimmt, wohingegen die Eindringtiefe des Feinkornbetons in das darunterliegende Partikelbett nur eine untergeordnete Rolle spielt. Wird eine nächste Partikelschicht auf den aufstehenden Feinkornbeton aufgebracht, dringt der Feinkornbeton verbessert in ein Partikelbett mit geringem vertikalen Fließwiderstand ein (bspw. runde Partikelform). Insgesamt führt eine runde Partikelform somit zu einem verbesserten vertikalen Eindringverhalten und hierdurch zu einer Zunahme der gebundenen Querschnittsflächenanteile, Zunahme der LP3DCP-Betondichten und einer höheren Druckfestigkeit parallel und rechtwinklig zum Schichtverlauf.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass auch mit Rezyklat-Partikelbetten hohe Festigkeitskennwerte erzielt werden können, die im Bereich normaler Kalkstein-Partikelbetten liegen oder diese sogar übertreffen können (siehe hierzu auch Untersuchungsreihe U1).

Alle untersuchten Partikel waren von einer starken Staubschicht umgeben. Zusätzlich wurden die Partikel in großen Big Bags angeliefert und auch hier konnte visuell festgestellt werden, dass die Partikelgröße bei der Entnahme von oben nach unten abnahm. Insbesondere im letzten Drittel des Big Bags war eine deutliche Zunahme des Feinkornanteils zu beobachten. Der Einfluss auf die Festbetoneigenschaften wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht näher untersucht. Es konnte jedoch visuell beobachtet werden, dass eine lokal verstärkte Staubschicht dem Feinkornbeton Wasser entzieht und dadurch die Rheologie, das Fließverhalten und somit auch die Festbetoneigenschaften maßgeblich beeinflussen kann.

Einfluss aus den Prozessparametern:

Im Vergleich zur Rheologie und Partikelbettart besitzen die Prozessparameter (Luft- und Betonvolumenstrom) bei den in der Untersuchungsreihe U3 gewählten Material-Prozessparameter-Kombinationen eine untergeordnete Rolle. Bei der SC3DP-Applizierung des Feinkornbetons führt eine hohe kinetische Beschleunigung zu einer Reduzierung der Fließfähigkeit des Feinkornbetons, was das Eindringverhalten beeinflussen kann. Außerdem führt eine hohe Beschleunigung der Feinkornbetonpartikel während der Applizierung zu einer geringeren Spritzlayerbreite sowie zu einer homogeneren horizontalen Verteilung des Feinkornbetons auf dem Partikelbett.

Für das weitere Eindringverhalten scheint die Wirkung der gewählten Prozessparameter dann aber zusätzlich von der Partikelform abzuhängen. Für eine plattige Partikelform führt eine hohe Beschleunigung der Feinkornbetonpartikel zu einer Zunahme des aufstehenden Feinkornbetons, welcher vermutlich aber stärker verdichtet wird. Hierdurch wird eine leichte Zunahme der Druckfestigkeit parallel zum Schichtverlauf erzielt, aber das isotrope Verhalten verringert.

Bei einer runden Partikelform führt eine hohe kinetische Beschleunigung der Feinkornbetonpartikel zu einer Abnahme des aufstehenden Feinkornbetons, welcher vermutlich aufgrund eines unkontrollierten Auf- und Rückprallens des Feinkornbetons auf dem Partikelbett weniger stark verdichtet wird. Eine hohe kinetische Beschleunigung führt dadurch zu einer Abnahme der Druckfestigkeit parallel und zu einer Zunahme der Druckfestigkeit rechtwinklig zum Schichtverlauf. Außerdem steigt das isotrope Verhalten unter einer größeren kinetischen Beschleunigung des Feinkornbetons.

Einfluss aus angefeuchtetem Partikelbett:

Ein angefeuchtetes Partikelbett führt zu einem schlechteren Eindringverhalten, da die vorliegende Staubschicht an die Partikel gebunden wird und dadurch der Fließwiderstand ansteigt. Dadurch wird beim Einbau der nächsten Partikelschicht der aufliegende Feinkornbeton vor allem lateral verdrängt. Dies führt zu einer Abnahme der Druckfestigkeit parallel und zu einer Zunahme der Druckfestigkeit rechtwinklig zum Schichtverlauf. Hierdurch nimmt die Druckfestigkeit im Mittel ab, weist aber auch ein isotroperes Verhalten auf.

Konzept zur Berechnung der Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit:

Der Ansatz zur Berechnung der Verfahrensgeschwindigkeit nach GL 3 basiert darauf, dass sich der Feinkornbeton nur vertikal im Partikelbett verteilt. Allerdings zeigt sich insbesondere für die in dieser Untersuchungsreihe U3 untersuchten Material- und Prozessparameter, dass sich der Feinkornbeton inhomogen horizontal über den LP3DCP-Betonquerschnitt verteilen und sich innerhalb des Spritzkonus verstärkt akkumulieren kann. Zudem kann in Abhängigkeit der Rheologie des Feinkornbetons und der Wahl der Partikel bei Einbau einer nächsten Partikelschicht ein zäher Feinkornbeton zusätzlich lateral verdrängt werden. Das kann dazu führen, dass dadurch zwischen den einzelnen Schichten somit eine zu geringe Betonmenge vorliegt, was zu einem verminderten Verbund führt. Denkbar wäre hier, dass die Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit nach GL 3 systematisch reduziert wird, sodass auch nach einer lateralen Verdrängung eine ausreichende Menge Feinkornbeton vorliegt (vgl. Untersuchungsreihe U4).

9 Untersuchungsreihe U4: Einfluss aus erhöhtem Auftrag der Feinkornbetonmenge

9.1 Einleitung

In der Untersuchungsreihe U4 wird der Einfluss aus einem erhöhten Auftrag von Feinkornbeton (F4) auf das Partikelbett KS16-32 (entsprechend Tabelle 1 – Partikelbett F) untersucht. Hierfür werden Proben mit einer Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit entsprechend der GL 3 (normale applizierte Betonmenge) sowie Proben mit einer reduzierten Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit (erhöhte applizierte Betonmenge) hergestellt. Hierfür wird die „normale“ Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit entsprechend der GL 3 auf 70 % reduziert, was mit einer um 43 % höheren applizierten Betonmenge korrespondiert. Die Herstellung und Verarbeitung der beiden Probenvarianten (normal & erhöht) erfolgt ansonsten entsprechend der Untersuchungsreihe U3 (vgl. Abbildung 9) mit konstanten Prozessparametern (Betonvolumenstrom $\text{con}1,0$: $\dot{V}_{\text{con}} = 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$; Luftvolumenstrom $\text{air}50$: $\dot{V}_{\text{air}} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$).

9.2 Partikelbett und Rheologie

Die Kennwerte des Partikelbetts KS16-32 können Abbildung 37 und Tabelle 7 entnommen werden. Die rheologischen Eigenschaften des Feinkornbetons F4 sind in Abbildung 42 bis Abbildung 44 gezeigt.

9.3 Einfluss auf die Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche

In Abbildung 97 ist die applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %) dargestellt. Eine Erhöhung der applizierten Betonmenge führt zu einem deutlichen Anstieg der Spritzlayerbreite w_L . Da innerhalb des Spritzkonus mehr Feinkornbeton je Fläche appliziert wird, wird das laterale Fließen des Feinkornbetons über die Spritzkonusbreite hinaus verstärkt (vgl. Abbildung 48(a)).

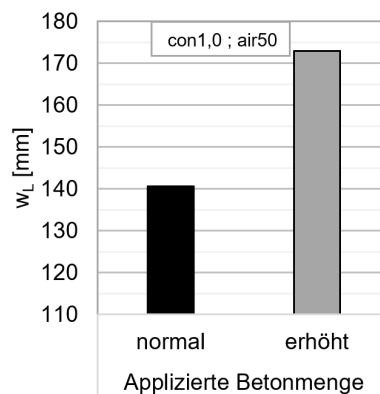


Abbildung 97: Applizierte Spritzlayerbreite w_L auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom $\text{con}1,0$ und Luftvolumenstrom $\text{air}50$.

9.4 Eindringverhalten

In Abbildung 98(a) ist der aufstehende Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche und die (b) Eindringtiefe e_2 in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %) dargestellt. Sowohl der aufstehende Feinkornbeton a_F wie auch die Eindringtiefe e_2 nehmen mit Zunahme der applizierten Betonmenge zu. Aufgrund der größeren

applizierten Betonmenge und der hieraus resultierenden größeren Spritzlayerbreite w_L kann sich aufgrund der Fließgrenze ein höherer Feinkornbetonkegel und somit größerer aufstehender Feinkornbeton a_F einstellen. Die Zunahme der Eindringtiefe e_2 könnte mit der verringerten Düsen-Verfahrgeschwindigkeit zusammenhängen, wodurch die kinetische Verdichtung auf der Partikeloberfläche länger verweilt und dadurch den Feinkornbeton verbessert in die Porenräume des Partikelbetts eindringen kann. Daneben könnte es auch an der inhomogenen Verteilung des Zementleims sowie Gesteinskörnung innerhalb des Spritzkonus und der Spritzlayerbreite w_L liegen. Nach (Freund et al. 2023; Ginouse und Jolin 2015) reichert sich in Richtung Spritzkonusmitte vermehrt die Gesteinskörnung und zum Spritzkonusrand der Zementleim an und konnte visuell so auch festgestellt werden (vgl. Abbildung 99). Grundsätzlich trifft beim Verfahren der Düse immer zuerst der zementleimreiche Teil des Spritzkonus auf der Partikelbettoberfläche auf. Durch die Reduzierung der Düsen-Verfahrgeschwindigkeit trifft somit eine größere Menge an zementleimreichem Feinkornbeton auf, bevor danach der Feinkornbetonanteil mit höherem Gesteinskörnungsanteil auf der Partikelbettoberfläche auftrifft. Die größere Menge an zementleimreichem Feinkornbeton und dessen verbesserte Eindringfähigkeit kann besser in die Porenräume des Partikelbetts eindringen und führt dadurch zu einer erhöhten Eindringtiefe e_2 .

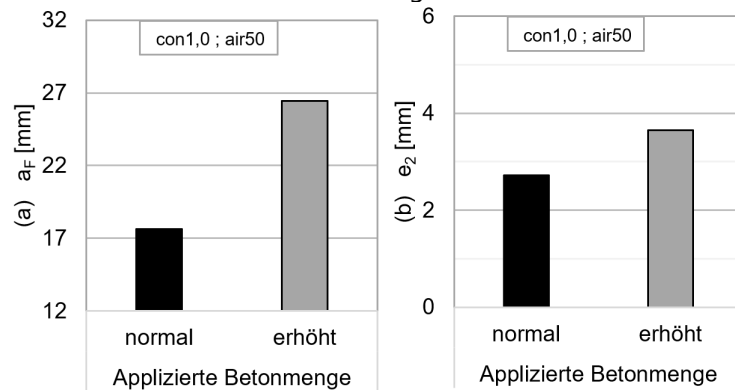


Abbildung 98: (a) Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche und (b) Eindringtiefe e_2 in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air50.

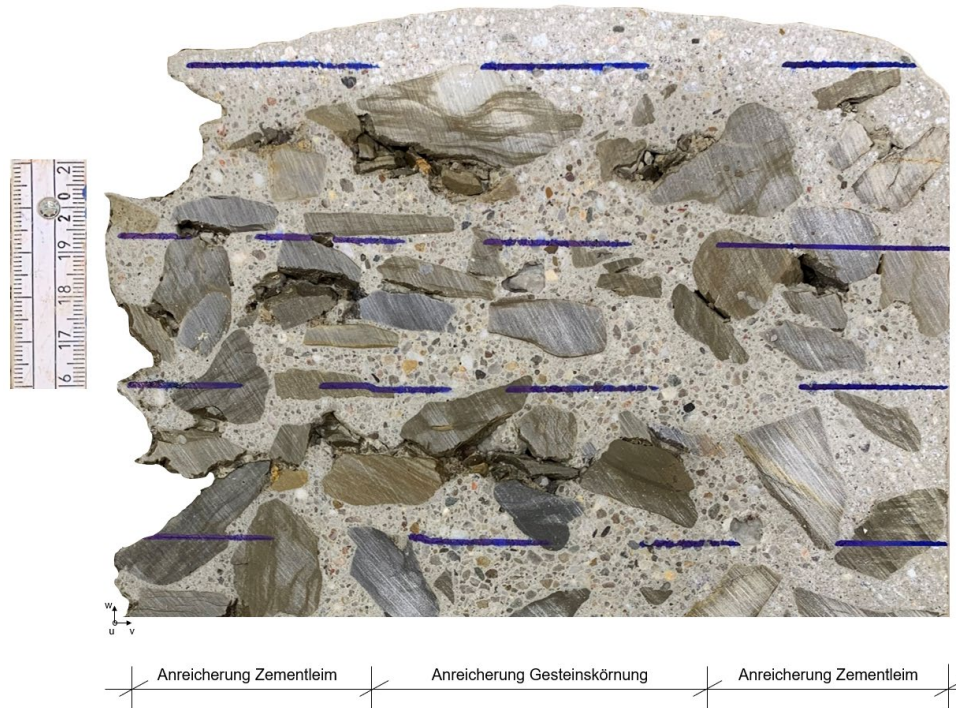


Abbildung 99: Verteilung der Gesteinskörnung über Spritzlayerbreite w_L bei einer Probe mit erhöhter applizierter Feinkornbetonmenge: Anreicherung der Gesteinskörnung in der Mitte und zunehmende Anreicherung von Zementleim in Richtung des Randes.

9.5 Verbunduntersuchung

In Abbildung 100(a) ist der querschnittsbezogene Verbund QV in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %) dargestellt. Wie schon für die Spritzlayerbreite w_L , den aufstehenden Feinkornbeton a_F und die Eindringtiefe e_2 führt die Erhöhung der applizierten Betonmenge auch zu einer Erhöhung des querschnittsbezogenen Verbunds QV. Insbesondere der erheblich größere aufstehende Feinkornbeton a_F mit knapp 27 mm füllt bereits ohne den Einbau der nächsten Partikelschicht annähernd die Schichthöhe von 32 mm. Während des Einbaus der darüber liegenden Partikelschicht füllt der Feinkornbeton entsprechend die restlichen Hohlräume und führt dadurch zu einem verbesserten querschnittsbezogenen Verbund QV (vgl. Abbildung 100(b)).

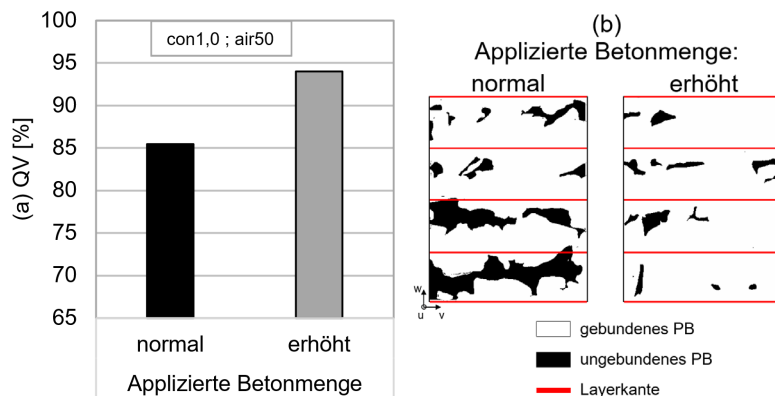


Abbildung 100: (a) Querschnittsbezogener Verbund QV und (b) gebundene und ungebundene Partikelbettbereiche über die mittleren 4 Layer (Layerhöhe $e_2 = 32\text{ mm}$; Layer 2 bis Layer 5) in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet

nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %) für das Partikelbett KS16-32 und einem Betonvolumenstrom con1,0 sowie Luftvolumenstrom air50.

9.6 Festbetoneigenschaft: Betondichte, Würfeldruckfestigkeit und Isotropie

In Abbildung 101 ist die Betondichte ρ_B in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) gezeigt. Auch hier steigt aufgrund des höheren Anteiles an gebunden LP3DCP-Betonbereichen erwartungsgemäß die Betondichte ρ_B .

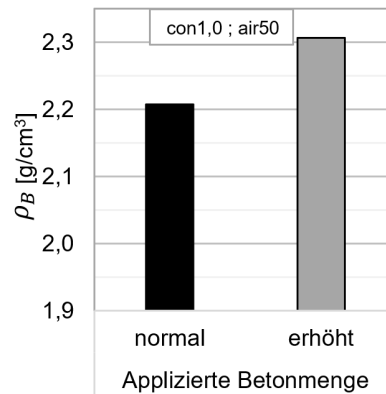


Abbildung 101: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air50.

In Abbildung 102 ist die (a) LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit (parallel und rechtwinklig zur Layerausrichtung) und (b) Isotropie I in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) gezeigt. Eine Erhöhung der applizierten Betonmenge führt zu einem Anstieg der LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit um 47 % (parallel) respektive 61 % (rechtwinklig) und eine leichte Verbesserung der Isotropie von 70 % auf 77 %. Zurückzuführen ist das auf die deutlich verbesserten Kennwerte des Eindringverhaltens (aufstehender Feinkornbeton a_f auf der Partikelbettoberfläche, Eindringtiefe e_2) und der hieraus resultierenden Verbesserung des querschnittsbezogenen Verbunds QV.

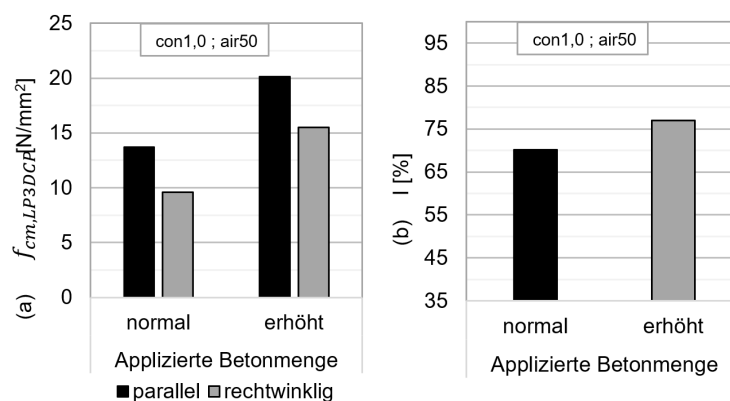


Abbildung 102: (a) LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit (parallel und rechtwinklig zur Layerausrichtung) und (b) Isotropie I in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air50.

9.7 Zusammenfassung

Eine Erhöhung der applizierten Feinkornbetonmenge führt zu einem deutlich verbesserten Eindringverhalten, Erhöhung der gebundenen LP3DCP-Betonbereichen sowie Erhöhung der Betondichte. Entsprechend führt das auch zu einer deutlichen Zunahme der Druckfestigkeit parallel und rechtwinklig zum Schichtverlauf sowie ein leicht verbessertes isotropes Verhalten. Auf der anderen Seite

nimmt aber auch die Spritzlayerbreite unkontrollierter zu, was möglicherweise nicht unbedingt erwünscht ist. Zusätzlich kann gezeigt werden, dass sich wie beim SC3DP-Prozess auch im LP3DCP-Prozess die Gesteinskörnung stärker in Querschnittsmitte und der zementleimreiche Anteil stärker am Querschnittsrand konzentriert.

10 Untersuchungsreihe U5: Untersuchung von Konzepten zur Bewehrungsintegration

10.1 Einleitung

In der Untersuchungsreihe U5 wird entsprechend der Abbildung 9 das Tragverhalten von konventionell (REF) sowie mittels des LP3DCP-Verfahrens hergestellte großformatige Biegebalken untersucht. Hierfür werden Biegebalken mit einer Abmessung von $15 \times 15 \times 70 \text{ cm}^3$ ($B \times H \times L$) in einem Vierpunktbiegeversuch geprüft (vgl. Abbildung 10). Grundsätzlich werden unbewehrte sowie bewehrte Biegebalken untersucht, wobei für die bewehrten Biegebalken auf Stahl- sowie Carbonfaserbewehrung zurückgegriffen wird. In jeden bewehrten Biegebalken werden jeweils zwei Stahlstäbe oder zwei Carbonfaserstränge eingelegt (vgl. Abbildung 10), welche entsprechend Tabelle 3 eine maximale Zugtragfähigkeit von 31,1 (Stahl) oder 14,6 kN (Carbon) erzielen. Neben einer unterschiedlichen Zugtragfähigkeit weist der Stahl außerdem ein starres und die Carbonfaserbewehrung ein flexibles Verformungsverhalten auf. In Abhängigkeit der Verformbarkeit der beiden Bewehrungen (starr vs. flexibel) könnte der Einbau einer nächsten Partikelbettschicht die Tragfähigkeit der jeweiligen Bewehrung beeinflussen (bspw. durch Verdrängen der Carbonfaserbewehrung durch ein Gesteinskorn). Bei den bewehrten LP3DCP-Biegebalken wird zudem die Einlegereihenfolge der Bewehrung variiert, da ein Unterschied in der Ankopplung sowie mögliche Inhomogenität erwartet wird:

- **PBF:** 1. Partikelbett – 2. Bewehrung – 3. Feinkornbeton
- **PFB:** 1. Partikelbett – 2. Feinkornbeton – 3. Bewehrung

Alle LP3DCP-Biegebalken wurden mit der Verfahrensgeschwindigkeit entsprechend der GL 3 (normale applizierte Betonmenge) unter konstanten Prozessparametern (Betonvolumenstrom $\dot{V}_{\text{con}} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$; Luftvolumenstrom $\dot{V}_{\text{air}} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$) hergestellt.

Sowohl die konventionell (REF) als auch mittels des LP3DCP-Verfahrens hergestellten Proben werden mit dem Feinkornbeton F4 hergestellt. Als Partikelbett werden die drei Partikelbetten KS8-32, KS16-32 und Rez16-32 eingesetzt (entsprechend Tabelle 1 – Partikelbett E bis G).

Bei den REF-Proben werden die drei Partikelbetten (KS8-32; KS16-32; Rez16-32) als unbewehrte und bewehrte (Stahl- sowie Carbonfaserbewehrung) Biegebalken untersucht. Bei den LP3DCP-Proben werden die drei Partikelbetten (KS8-32; KS16-32; Rez16-32) nur als unbewehrte Biegebalken hergestellt. Die bewehrte LP3DCP-Biegebalken erfolgt ausschließlich für das Partikelbett KS16-32.

Anmerkung: Die REF- und LP3DCP-Biegebalken sollen mit dem identischen Volumenverhältnis aus Feinkornbeton zu Partikel hergestellt werden. In einem ersten Schritt wurden zuerst die LP3DCP-Biegebalken hergestellt. Danach erfolgte erst die konventionelle Herstellung der REF-Proben. Allerdings erwies sich die Herstellung der REF-Proben bei den Partikelbetten KS16-32 und Rez16-32 als äußerst schwierig, da ein Mischen und Verarbeiten bei identischen Volumenverhältnis wie bei den LP3DCP-Biegebalken kaum möglich war. Um eine Herstellung der konventionell hergestellten REF-Biegebalken dennoch umsetzen zu können, wurden für die beiden Partikelbetten der Feinkornbetonanteil jeweils um ca. 8 % (KS16-32) respektiv 4 % (Rez16-32) im Vergleich zu den LP3DCP-Biegebalken leicht erhöht.

10.2 Partikelbett und Rheologie

Die Kennwerte der Partikelbetten KS8-32, KS16-32 und Rez16-32 können der Abbildung 37 und Tabelle 7 entnommen werden. Die rheologischen Eigenschaften des Feinkornbetons F4 sind in Abbildung 42 bis Abbildung 44 gezeigt.

10.3 Unbewehrte Biegebalken

In Abbildung 103 sind die Biegezugfestigkeiten $f_{ct,fl}$ unbewehrter Biegebalken für REF sowie LP3DCP-Proben in Abhängigkeit der drei Partikelbetten KS8-32, KS16-32 und Rez16-32 dargestellt. Demnach nimmt die Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}$ bei den unbewehrten REF-Biegebalken von den beiden Kalkstein-Partikelbett (KS8-32; KS16-32) hin zum Rezyklat-Partikelbett Rez16-32 zu und deckt sich mit den Erkenntnissen der REF-Würfeldruckfestigkeit (vgl. Abbildung 83). Bei den LP3DCP-Proben kann ebenfalls eine Zunahme der Biegezugfestigkeiten $f_{ct,fl}$ vom Kalkstein- hin zum Rezyklat-Partikelbett erkannt werden. Allerdings könnte die höhere Rezyklat-Biegezugfestigkeiten $f_{ct,fl}$ auch auf eine höhere Kornfestigkeit des Rezyklat-Partikelbetts selbst zurückgeführt werden. Um dies auszuschließen, kann hierfür zusätzlich die Ausnutzungsgrad A betrachtet werden, daher wie verhält sich die LP3DCP- zur konventionell hergestellten REF-Biegezugfestigkeit. Und auch hier nimmt die Ausnutzungsgrad A von den Kalkstein- zur Rezyklat-Partikelbetten zu. Somit lässt sich die Zunahme der Biegezugfestigkeiten $f_{ct,fl}$ auf das verbesserte Eindringverhalten des Rezyklat-Partikelbetts selbst zurückführen (und ist nicht von einer höheren Kornfestigkeit des Rezyklat-Partikelbetts dominiert). Dieser Zusammenhang wird so auch schon in der Untersuchungsreihe U3 gezeigt, wonach das Rezyklat-Partikelbett zu einem verbesserten Eindringverhalten des Feinkornbetons ebenfalls zu einer höheren Ausnutzungsgrad A in Bezug auf die Würfeldruckfestigkeit führt (vgl. Abbildung 87 und Abbildung 88).

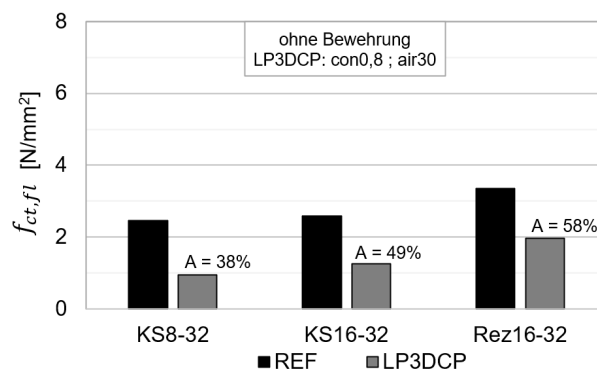


Abbildung 103: Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}$ unbewehrter Biegebalken für konventionell (REF – schwarz) sowie mittels des LP3DCP-Verfahrens hergestellten (dunkelgrau) Proben und für die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32). Angabe des Ausnutzungsgrad A, Verhältnis der LP3DCP- zur konventionell hergestellten REF-Biegezugfestigkeit. LP3DCP-Proben hergestellt unter konstanten Prozessparametern (Betonvolumenstrom con0,8 und Luftvolumenstrom air30).

Insgesamt erzielen die unbewehrten LP3DCP-Biegebalken im Vergleich zu den REF-Biegebalken eine geringere Biegezugfestigkeiten (vgl. Abbildung 103: schwarz vs. grau). Auf Seiten der LP3DCP-Biegebalken lässt sich das unter anderem auf ein noch nicht perfekt abgestimmtes LP3DCP-Verfahren und dem damit einhergehenden lokal wenig bzw. ungebundenen Betonbereichen zurückführen (vgl. Abbildung 75: querschnittsbezogener Verbund QV: 94 bis 97 %). Im Vergleich zu den REF-Biegebalken muss sich bei den LP3DCP-Biegebalken die Spannungen somit auf einen kleineren Querschnittsbereich verteilen. Hieraus können größere Spannungen entstehen und somit zu einer Reduzierung der LP3DCP-Biegezugtragfähigkeit führen. Daneben konnte bei den REF-Biegebalken während der Herstellung erkannt werden, dass sich der Feinkornbeton F4 aufgrund seiner hohen Fließfähigkeit durch die eingebrachte Verdichtungsenergie in den unteren Bereichen des Biegebalkens anreicherte. Dadurch wird insbesondere im Zugbereich des REF-Biegebalkens eine besonders gute Betongüte mit wenig Fehlstellen erzielt, was zu einer erhöhten Biegezugfestigkeit führen dürfte.

10.4 Bewehrte Biegebalken

Konventionell hergestellte bewehrte Referenz-Proben

In Abbildung 104 sind die REF-Biegezugfestigkeiten konventionell hergestellter Proben ohne sowie mit Stahl- und Carbonfaserbewehrung für die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) gezeigt. Wie zu erwarten führt die Stahlbewehrung im Vergleich zu unbewehrten Biegebalken zu einer deutlichen Tragfähigkeitszunahme (> 214 %), wobei hier kein Unterschied mehr zwischen Kalkstein- oder Rezyklat-Partikelbett erkannt werden kann. Die Carbonfaserbewehrung führt im Vergleich zu den unbewehrten Biegebalken zu keiner nennenswerten Zunahme der Tragfähigkeit (zwischen 83 % und 107 %). Neben der geringeren maximalen Zugtragfähigkeit der Carbonfaserbewehrung (Stahl: 31,1 kN vs. Carbonfaser: 14,6 k

N) könnte es aber auch mit dem flexiblen Verhalten der Carbonfaserbewehrung zusammenhängen. Im Gegensatz zur Stahlbewehrung kann die flexible Carbonfaserbewehrung von der Gesteinskörnung verformt werden, d.h. die Bewehrung liegt nicht mehr perfekt gerade innerhalb des Partikelbetts und wird beispielsweise um ein Gesteinskorn umgeleitet. Dabei können an diesen Stellen Spannungsspitzen entstehen und die Carbonfaserbewehrung hierdurch frühzeitiger versagen lassen. Darüber hinaus weisen diese Art von Carbonfaserbewehrung im Vergleich zur Stahlbewehrung aufgrund der glatten Mantelfläche einen geringeren Auszieh Widerstand auf (Rolland et al. 2018).

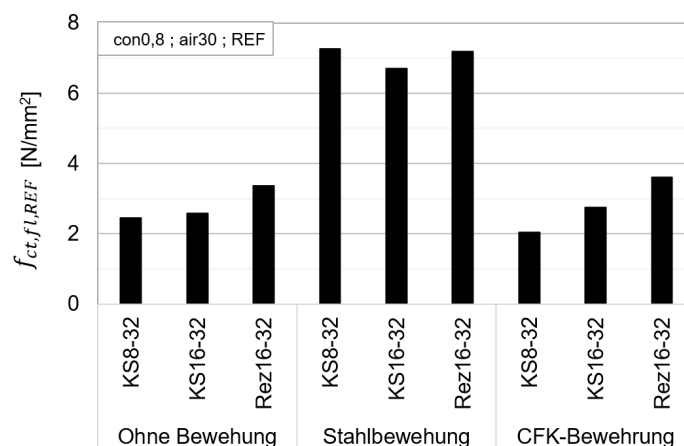


Abbildung 104: REF-Biegezugfestigkeit konventionell hergestellter Proben ohne (links) sowie mit Stahl- (mitte) und Carbonfaserbewehrung CFK (rechts) für die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32).

Bewehrungsverbund der LP3DCP-Proben

In Abbildung 105 ist die qualitative Beurteilung des Ankopplungsgrads der Bewehrung (Stahl- (S) und Carbonfaserbewehrung (CFK)) in den LP3DCP-Beton in Abhängigkeit der Einbaureihenfolge PBF (Partikel – Bewehrung – Feinkornbeton) oder PFB (Partikel – Feinkornbeton – Bewehrung) gezeigt. Die qualitative Beurteilung des Ankopplungsgrads erfolgt dabei jeweils an 8 eingebundenen Bewehrungen (vgl. Abbildung 106). Dabei gilt die Bewehrung als gut eingebunden, wenn die Bewehrung vollständig und ohne Lufteinschlüsse von dem Feinkornbeton und der Gesteinskörnung umschlossen ist (vgl. Abbildung 106 – gut eingebunden: Bildnummer 1.1; 1.2; 2.1; 3.1; 3.2; 4.1 und schlecht eingebunden: Bildnummer 2.2; 4.2). Ein Ankopplungsgrad von 100 % bedeutet dabei, dass alle 8 untersuchten Bewehrungen gut eingebunden sind, daher vollständig und ohne Lufteinschlüsse.

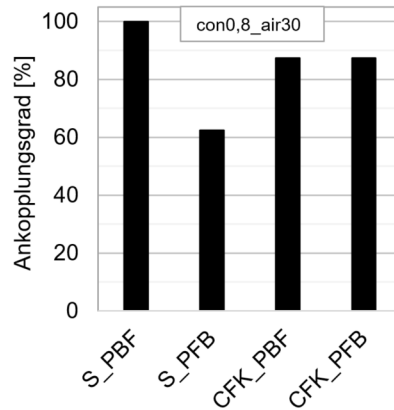


Abbildung 105: Qualitative Beurteilung des Ankopplungsgrads der Bewehrungseinbindung (Stahl (S)- und Carbonfaserbewehrung (CFK)) in den LP3DCP-Beton in Abhängigkeit der Einbaureihenfolge PBF (Partikel – Bewehrung – Feinkornbeton) oder PFB (Partikel – Feinkornbeton – Bewehrung). Alle Proben mit dem Kalkstein-Partikelbett KS16-32, dem Feinkornbeton F4 sowie unter konstanten Prozessparametern (Betonvolumenstrom con0,8 und Luftvolumenstrom air30) hergestellt.

Für die starre Stahlbewehrung führt demnach die Einbaureihenfolge Partikel, Bewehrung und dann Feinkornbeton zu einem Ankopplungsgrad von 100 % und somit zu einer sehr guten Einbindung der Bewehrung (vgl. Abbildung 105 – S_PBF und Abbildung 106(a) – Bild 1.1; 1.2). Demnach ummantelt der zuletzt aufgebrauchte Feinkornbeton die Bewehrung von allen Seiten ausreichend. Der Einbau einer weiteren Partikelschicht führt hierbei nicht zu einem Fehlereintrag in Form von beispielsweise Luftporen. Wird die Einbaureihenfolge auf Partikel, Feinkornbeton und dann Bewehrung abgeändert, nimmt der Ankopplungsgrad der Einbindung ab (vgl. Abbildung 105 – S_PFB). In der Abbildung 106(a) im Bild 2.2 ist beispielhaft eine Fehlerstelle gezeigt. Die Bewehrung wird dabei von der später aufgebrauchten Partikelschicht abgedeckt und verhindert dadurch eine vollständig umschlossene Bewehrung. Die Verwendung von fließfähigeren Systemen könnte jedoch zu besseren Ergebnissen führen. Für die Carbonfaserbewehrung erfolgt unabhängig der Einbaureihenfolge mit knapp 90 % eine gute Einbindung der Bewehrung (vgl. Abbildung 105 – CFK_PBF; S_PFB). Möglicherweise führt der geringe Querschnitt der Carbonfaserbewehrung dazu, dass diese einfach einzubinden ist.

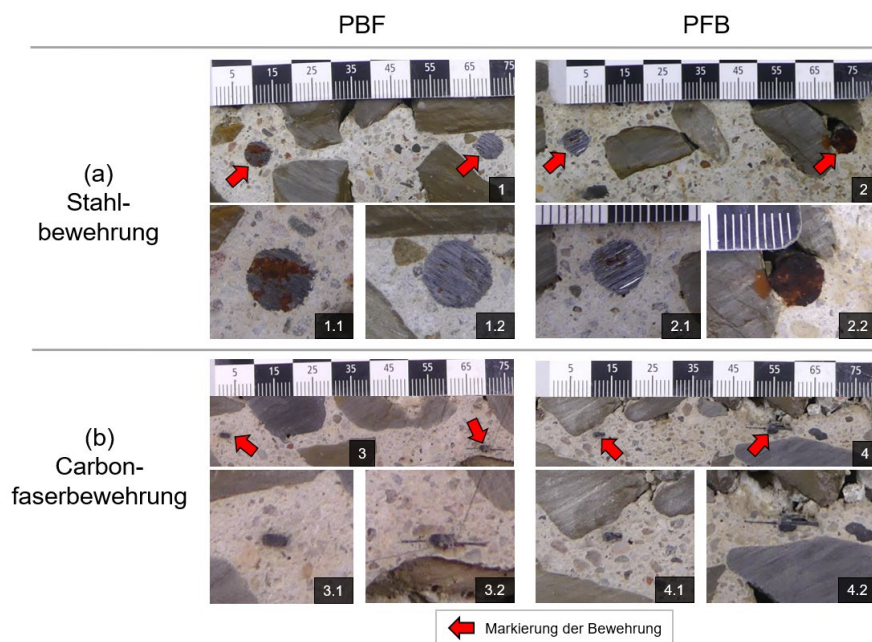


Abbildung 106: Einbindung der (a) Stahl- und (b) Carbonfaserbewehrung in den LP3DCP-Beton in Abhängigkeit der Einbaureihenfolge PBF (links: Partikel – Bewehrung – Feinkornbeton) oder PFB (rechts: Partikel – Feinkornbeton – Bewehrung). Alle Proben mit dem Kalkstein-Partikelbett KS16-32, dem Feinkornbeton F4 sowie unter konstanten Prozessparametern

(Betonvolumenstrom $con0,8$ und Luftvolumenstrom $air30$) hergestellt. Gesamtansicht (1 – 4) und vergrößerte Ansicht der Bewehrung (1.1; 1.2; 2.1; 2.2; 3.1; 3.2; 4.1; 4.2)

Bewehrte LP3DCP-Proben

In Abbildung 107 ist die REF- und LP3DCP-Biegezugfestigkeit unbewehrter und bewehrter (Stahl- und Carbonfaser (CFK)) Biegebalken dargestellt. Bei den LP3DCP-Biegebalken wird zudem die Einbaureihenfolge unterschieden ((PBF) Partikel – Bewehrung – Feinkornbeton oder (PFB) Partikel – Feinkornbeton – Bewehrung). Hierbei führt bei den LP3DCP-Biegebalken der Einsatz der Stahlbewehrung zu einer fast viermal höheren Tragfähigkeit, wohingegen bei den REF-Biegebalken der Einsatz der Stahlbewehrung die Tragfähigkeit nur um etwa das Zweieinhalbfache erhöht (vgl. Abbildung 107: grau vs. schwarz). Der größere Tragfähigkeitszuwachs könnte dabei mit der verbesserten Verdichtung des Feinkornbetons im Bereich der Bewehrungslage durch den beschleunigten Auftrag des Feinkornbetons zusammenhängen. Zudem könnte die nachfolgend aufgetragene Gesteinskörnungsschicht zu einer verbesserten Verzahnung zwischen der Bewehrung und der LP3DCP-Beton führen. Die Carbonfaserbewehrung führt auch hier zu keiner nennenswerten Zunahme der Tragfähigkeit (zwischen 99 % bis 104 %). Wie zuvor könnte das an einer zu gering gewählten Tragfähigkeit der Carbonfaserbewehrung sowie der leichten Verformbarkeit der Carbonfaserbewehrung und der hiermit einhergehenden Spannungsspitzen liegen.

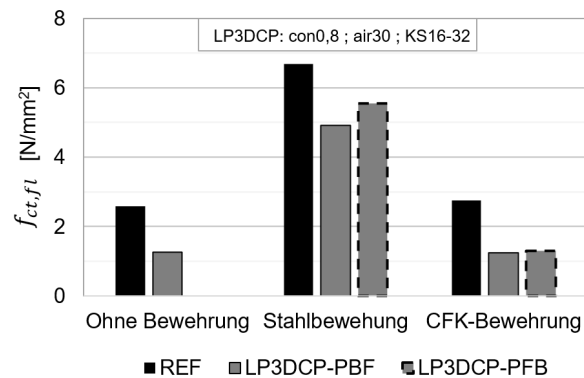


Abbildung 107: Biegezugfestigkeit unbewehrter und bewehrter (Stahl- oder Carbonfaser (CFK)) Biegebalken für konventionell (REF – schwarz) sowie mittels des LP3DCP-Verfahrens hergestellte (dunkelgrau) Proben für das Kalkstein-Partikelbett KS16-32. Zusätzlich bei den LP3DCP-Proben - Unterscheidung der Einbaureihenfolge: (PBF) Partikel – Bewehrung – Feinkornbeton (durchgezogene schwarze Umrandungslinie) oder (PFB) Partikel – Feinkornbeton – Bewehrung (gestrichelte schwarze Umrandungslinie). LP3DCP-Proben hergestellt unter konstanten Prozessparametern (Betonvolumenstrom $con0,8$ und Luftvolumenstrom $air30$).

Daneben erzielen die bewehrten LP3DCP- im Vergleich zu den bewehrten REF-Biegebalken auch geringere Biegezugfestigkeiten im Bereich von 74 % bis 73% (vgl. Abbildung 107: grau vs. schwarz). Wie zuvor kann auch hier der querschnittsbezogene Verbund QV hinzugezogen werden (vgl. Abbildung 75), wonach bei den LP3DCP-Biegebalken aufgrund der nicht vollständig gebundenen Bereichen größere Spannungen entstehen. Diese wird durch die Abbildung 108 deutlich, in welcher der Verlauf der Biegerisse über die REF- sowie die LP3DCP-Biegebalken gezeigt ist. Hierbei bilden sich für den REF-Biegebalken klassische schrägverlaufende Biegerisse aus. Auch bei dem LP3DCP-Biegebalken können diese klassischen schrägverlaufenden Biegerisse erkannt werden, allerdings verlaufen diese dort zum Teil auch stufenartig mit horizontalen Anteilen im Bereich des ungebundenen Betonquerschnitts, was wiederum zu einer Reduzierung der LP3DCP-Biegezugfestigkeit führt.

Ein Einfluss in Abhängigkeit der Einbaureihenfolge auf die Biegezugfestigkeit ist nicht eindeutig bewertbar (vgl. Abbildung 107: PBF vs. PFB (durchgezogene vs. gestrichelte schwarze Umrandungslinien), obwohl tendenziell die Einbaureihenfolge PFB zu leicht höheren mechanischen Ergebnissen führt. Dies ist vermutlich auf die geringe Probenanzahl (eine Probe je Variante) zurückzuführen und steht im Kontrast mit den Ergebnissen der qualitativen Beurteilung des

Ankopplungsgrads der Bewehrungseinbindung (vgl. Abbildung 105). Dennoch könnte die Variante PFB den Vorteil besitzen, dass die Bewehrung in den stark verdichteten Feinkornbeton eingedrückt wird und dadurch nach unten einen guten Verbund besitzt. Wird nun im nächsten Arbeitsschritt die darüber liegende Partikelbettschicht aufgebracht, fallen die Gesteinskörner direkt auf die Bewehrung. Durch den Auftrag der nachfolgenden Feinkornsicht werden Gesteinskörner und Bewehrung zudem stark miteinander verzahnt. Der verbesserte Verbund zur darunterliegenden Feinkornsicht und die direkte Verzahnung mit den darüber liegenden Gesteinskörnern könnte die leichte Zunahme der Biegezugfestigkeiten erklären. Diese Vorteile würden dann dem Nachteil, dass die Gesteinskörner die Bewehrung von dem nachfolgenden Spritzstrahl abschirmt (vgl. Abbildung 106(a) – Bild 2.2), überwiegen.

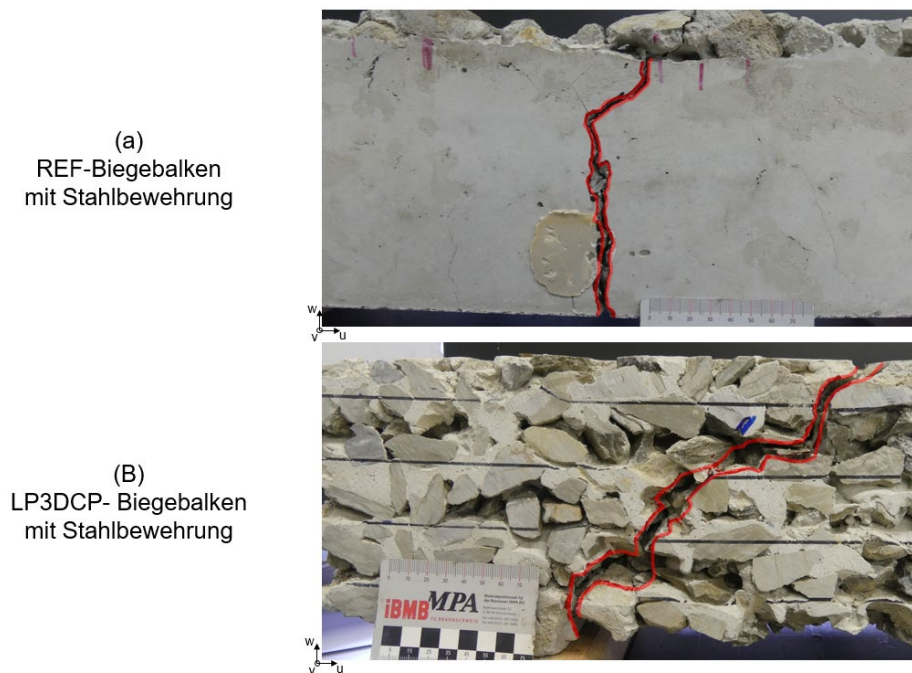


Abbildung 108: Verlauf der Biegerisse über Biegebalken für eine (a) REF- und (b) LP3DCP-Probe. Verlauf der Risse rot markiert.

10.5 Zusammenfassung

Bei den unbewehrten Biegebalken erzielen die LP3DCP- im Vergleich zu den REF-Balken geringere Biegezugfestigkeiten, die in Abhängigkeit des Partikelbetts im Bereich von 38 % bis 58 % der REF-Biegezugfestigkeit liegen. Bei Verwendung von Stahlbewehrung erzielen die LP3DCP- im Vergleich zur REF-Biegebalken ebenfalls eine geringere Biegezugfestigkeit, die jedoch in Abhängigkeit der Einbaureihenfolge bereits im Bereich von 74 % bis 83 % der REF-Biegezugfestigkeit liegen. Die geringeren LP3DCP-Biegezugfestigkeiten lassen sich dabei mit einer in dieser Untersuchungsreihe noch nicht perfekt abgestimmten Auswahl der Material- und Prozessparameter erklären, die zu ungebundenen LP3DCP-Betonbereichen innerhalb der einzelnen Schichten sowie in den Randbereichen führen. Darüber hinaus mussten die REF-Biegebalken mit einer leicht erhöhten Feinkornbetonmenge hergestellt werden, welcher sich zusätzlich im unteren Bereich des REF-Biegebalkens konzentriert und die Bewehrung dadurch gut in den Beton eingebunden wurde. Entsprechend könnte eine vollständig gebundene LP3DCP-Biegeprobe zu einer ähnlichen oder sogar erhöhten Biegezugfestigkeit als bei den REF- Biegeprobe führen. Die Verwendung von Carbonfaserbewehrung führte dabei nicht zu einer Tragfähigkeitszunahme. Die Gründe hierfür könnten in Spannungsspitzen zwischen Carbonfaser und Partikel sowie an der glatten Mantelfläche der Carbonbündel und der hiermit einhergehende geringere

Auszieh Widerstand liegen. Außerdem wird gezeigt, dass die Einlegereihenfolge der Bewehrung (PBF: 1. Partikelbett – 2. Bewehrung – 3. Feinkornbeton und PFB: 1. Partikelbett – 2. Feinkornbeton – 3. Bewehrung) keinen signifikanten Unterschied in der Biegezugfestigkeit ergibt.

11 Untersuchungsreihe U6: Untersuchung der automatisierten Ausbringung von Partikeln

11.1 Einleitung

Die Untersuchungen der Untersuchungsreihe U6 wurden in zwei Versuchsreihen aufgeteilt, in den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der beiden Untersuchungen dargestellt.

In der Versuchsreihe 1 stand die grundsätzliche Möglichkeit der automatisierten Verteilung der Partikel im Fokus, so wurde wie in *Untersuchungsreihe U6 – Untersuchung der automatisierten Ausbringung von Partikeln* beschrieben zunächst ein Verteilungstool genutzt, um eine vordefinierte Menge an Aggregaten von 39,6kg zu verteilen.



Abbildung 109: Verteilungstool am Portal 1 – DBFL

11.2 Versuchsreihe 1

In Abbildung 109 ist das Verteilungstool zu erkennen, das genutzt wurde, um die rezyklierte Gesteinskörnung von einem Ende der Schalung zum anderen zu verteilen. Wie im Abschnitt Untersuchungsreihe U6 – Untersuchung der automatisierten Ausbringung von Partikeln bereits gezeigt, verfügt das Verteilungstool über einen Anschluss für das Portal 1 des DBFL, darunter befindet sich eine 15cm hohe und 25mm dicke Schichtholzplatte, an der wiederum eine elastische Gummilippe befestigt ist. In einer kurzen experimentellen Vorstudie wurde das Verteilungstool ohne die elastische Gummilippe genutzt und es wurde deutlich, dass die Aggregate eher zu einer Lückenbildung neigen.

Während der ersten Versuchsreihe wurde davon ausgegangen, dass die Aggregate manuell eingelegt werden und in Länge des Tools gehäuft am Eintrittspunkt des Tools ausliegen, da eine zentrierte Auslegung der Aggregate zu einer ungleichmäßigen Verteilung führen können. Im Folgenden konnten die notwendigen Pfade des Portals mithilfe von Rhino 3D in Kombination mit Grasshopper erstellt werden, was sich nahtlos dem bisherigen Workflow zur Generierung der Pfadwege der Robotereinheit anschließt. Um die Integration in einen Workflow, in dem auch die Shotcrete Applikation mit dem Portal 2 gewährleistet wird, zu simulieren, wurden die Pfade so gewählt, dass das Portal 2 immer wieder zu einem Ausgangspunkt außerhalb des Druckbereiches verfährt, nachdem eine Schicht Aggregate verteilt wurde. Innerhalb der softwareseitigen Steuerung der Robotereinheit wurden Parameter angelegt, die eine schnelle Änderung der anzunehmenden Schalungsgröße möglich machen. Abgeleitet aus der Dimensionierung der Schalungsgröße kann so ein Pfadweg generiert werden, der auf möglichst viele Anwendungsbereiche appliziert werden kann.

Wie eingangs beschrieben wurden während der Versuchsreihe die Geschwindigkeiten, sowie der Abstand des Tools zum Druckbett untersucht. Als Ausgangshypothese wurde angenommen, dass ein Abstand von 32mm ideal sein sollte als Abstand von Tool zu Partikelbett, da dies die angestrebte Layerhöhe in Abhängigkeit zur Korngröße der Aggregate ist. In Tabelle 10 sind die Durchgänge mit den jeweils genutzten Abständen von Tool zu Partikelbett hier D_1 , sowie die verwendete Verfahrensgeschwindigkeit hier V_1 dargestellt. In Abbildung 110 sind die dazu passenden Resultate nach dem Verteilungsprozess von links oben nach rechts unten abgebildet. In Rot markiert wurden die Lücken, die beim Auslegen der Aggregate entstanden sind.

Zwar wurden 32mm Entfernung zunächst als ideal betrachtet, dennoch wurde eingangs ein geringerer Wert erprobt, um ausschließen zu können, dass sich das Tool grundsätzlich entgegen der Annahme verhält. Wichtig dabei ist auch, dass durch die Elastizität der unteren Gummilippe ein genaues Bemessen des Abstandes vom unteren Ende des Tools zum Druckbett nur bedingt möglich ist, somit musste sich experimentell an einen Idealwert herangetastet werden.

Als Ausgangsgeschwindigkeit wurde 3000mm/min bestimmt, da sich somit das Portal 1 in einer ähnlichen Geschwindigkeit bewegen könnte, wie das Portal 2 für die Feinkornapplikation. Langfristiges Ziel der automatisierten Auslegung soll ein Zusammenspiel aus beiden Portalen sein, um einen reibungslosen Ablauf beider Portale miteinander zu erreichen und unnötige Wartezeiten durch das Auslegen der Partikel zu vermeiden.

Vergleicht man Tabelle 10 mit der Abbildung 110, dann wird deutlich, dass bei einer Entfernung von 20mm ein Auslege-Bild entsteht, das deutliche Leerstellen (in rot markiert) aufweist und somit ungeeignet wäre, um nachfolgende Schichten zu applizieren. Erhöht man den Abstand auf 32mm, ist ein deutlich homogeneres Verteilungsbild zu erkennen, was dennoch Lücken aufweist. Test vier und fünf weisen die wenigsten Leerstellen sowie doppelt ausgelegte Partikel auf und wurden somit als am besten geeignete Entfernung zwischen Druckbett und Tool bewertet. In den darauffolgenden Untersuchungen wurde erprobt, inwieweit geringere Verfahrensgeschwindigkeiten das Ergebnis beeinflussen können. Das Resultat zeigt, dass geringere Verfahrensgeschwindigkeiten einen negativen Effekt auf die auszulegenden Partikel haben kann und auch für den Ablauf beider Portale miteinander als ungeeignet erachtet wird. Zusätzlich zu den in Abbildung 110 dargestellten Ablage-Bildern wurde festgestellt, dass eine Anzahl von Partikeln zu den jeweiligen Seiten des Tools ausbrechen und zu einer Häufung abseits des Pfades führen, dies hätte einen negativen Einfluss auf die Verteilung von Partikeln in großflächigen Schalungen, da somit keine gleichmäßigen Layerhöhen erreicht werden.

Tabelle 10: Versuchsreihe 1: Abstandswerte des Tools zum Partikelbett in D_1 , sowie Verfahrensgeschwindigkeit in V_1

Test Nr.	D_1 in mm	V_1 in mm/min
1	20	3000
2	32	3000
3	40	3000
4	48	3000
5	56	3000
6	40	2000

Test Nr.	D_1 in mm	V_1 in mm/min
7	48	2000
8	40	1000
9	48	1000

Quelle: ITE

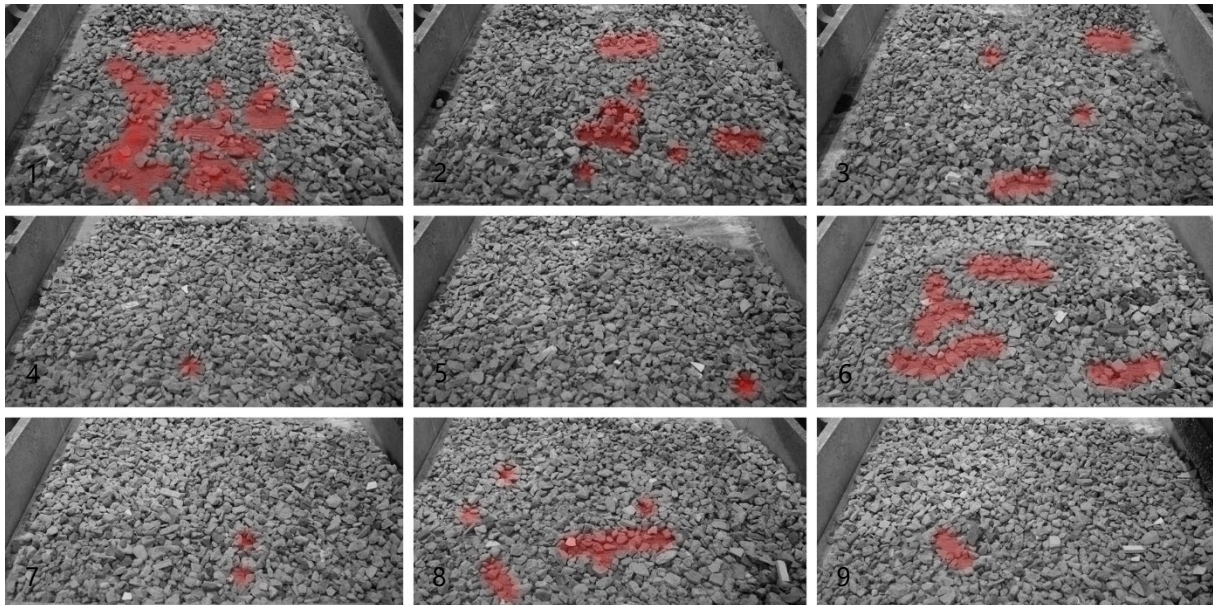


Abbildung 110: Verteilung der Partikel innerhalb der Schalung mit Verteilungstool am Portal 1; in rot markiert, die jeweiligen Leerstellen ohne abgelegte Partikel.

11.3 Versuchsreihe 2

In einer zweiten Versuchsreihe wurde das Prinzip der Ausbringung mit dem vorangegangenen Versuch der Verteilung kombiniert. Ziel war es, mit einem Tool die Arbeitsschritte des Einlegens und Verteilens zu ermöglichen.



Abbildung 111: Beschickungskorb am Portal 1 des DBFL

Wie in Abbildung 111 zu sehen, wurde ein Beschickungskorb genutzt, welcher eine vordefinierte Menge an Partikeln unterschiedlicher Korngröße halten kann. Ähnlich wie das Verteilungstool der Versuchsreihe 1 lässt sich der Beschickungskorb an das Portal 1 anschließen und kann somit auf ähnliche Weise mit in den Druckablauf des LP3DCP Verfahrens eingewoben werden. Zusätzlich kann die geladene Menge durch Steuerung des 2-Wege Luftventils punktgenau geöffnet werden, sodass der Transport von

Partikeln in die Schalung gewährleistet ist. Insgesamt hat der Beschickungskorb ein Volumen von knapp 122l und kann somit eine maximale Menge von 154,365kg der rezyklierten 16mm-32mm Gesteinskörnung halten. Je nach Rohdichte des verwendeten Materials kann die Menge an zu ladenden Aggregaten variieren. Grundsätzlich lässt sich der Beschickungskorb für alle in diesem Forschungsauftrag verwendeten Gesteinskörnungen verwenden, variiert werden muss jeweils nur der Abstand vom Tool zum Druckbett.

Im Unterschied zum Verteilungstool der Versuchsreihe 1, kann eine bearbeitende Person außerhalb des Druckbereichs den Beschickungskorb befüllen, während zeitgleich das Portal 2 den Feinkornbeton der vorherigen Schicht appliziert. Somit können Arbeitsabläufe besser kombiniert und aufeinander abgestimmt werden. Des Weiteren können Aggregate besser auf dem Druckbett verteilt werden, da nicht die gesamte Masse an Partikeln ausliegt, sondern ein Großteil der Aggregate im Beschickungskorb verbleibt und erst mit stetigen Vorfahren des Portal 1 abgegeben wird. Dies sorgt zusätzlich zu einer geringeren Beanspruchung des Tools am unteren Ende, sodass Biegungen und daraus resultierende Veränderungen des Auslegeergebnisses verhindert werden können. Dies wird auch durch die Form des Beschickungskorbes erreicht, der durch die relativ kleine Öffnung des Tools an der unteren Seite nicht das gesamte Material auf einmal entlädt.

In Tabelle 11 sind die deutlich geringeren Werte für D_1 im Vergleich zu vorangegangenen Versuchsreihe zu erkennen. Auch in dieser Tabelle ist D_1 die Entfernung des Tools zum Druckbett und V_1 die Verfahrensgeschwindigkeit des Roboterportals. Ähnlich wie in Versuchsreihe 1 war der genaue Effekt und das Verhalten der Gummilippe in Bezug auf die Entfernung des Tools zum Druckbett nicht klar definierbar, sodass ein experimentelles Herantasten an einen Idealwert nötig war. Bereits nach einem ersten Test von V_1 mit 22mm wurde deutlich, dass die abgelegten Aggregate ein deutlich homogeneres Bild abgeben, als in der vorangegangenen Versuchsreihe. Daraufhin wurde in Abständen von jeweils 5mm der Abstand zum Druckbett erhöht. Es wurde ebenfalls untersucht, inwieweit eine schnellere Verfahrensgeschwindigkeit Auswirkungen auf das Auslegebild hat. Mit dem Ergebnis, dass eine deutlich höhere Verfahrensgeschwindigkeit von mindestens 5000 mm/min einen negativen Effekt auf das Druckbild hat. Für zukünftige Versuche ist somit eine Verfahrensgeschwindigkeit von 3000-4000mm/min ideal.

Tabelle 11: Versuchsreihe 2: Abstandswerte des Tools zum Partikelbett in D_1 , sowie Verfahrensgeschwindigkeit in V_1

Test Nr.	D_1 in mm	V_1 in mm/min
1	22	3000
2	27	3000
3	32	3000
4	27	5000
5	27	7000

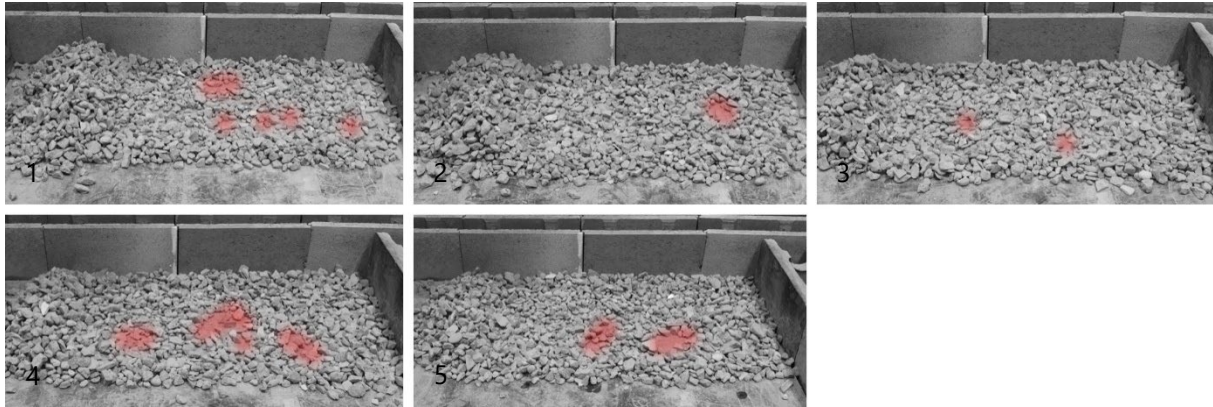


Abbildung 112: Verteilungsbild der Partikel

Wie in Abbildung 112 zu sehen ist wurde ein homogenes Ablagebild in Abschnitt 2 erreicht, der Abstand betrug 27mm und wurde mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 3000 mm/min erreicht. Auch bei 32mm Abstand konnte eine bedruckbare Schicht erzeugt werden. In Abschnitt 4 und 5 sind deutliche Fehlstellen sichtbar, im Unterschied zu den vorherigen Versuchen wurden hier höhere Verfahrensgeschwindigkeiten gewählt (siehe Tabelle 11). Deutlich wird auch, dass es im Gegensatz zum Verteilungstool, das in Versuchsreihe 1 verwendet wurde, einen Bereich gibt, in dem das Tool nicht bis zum Ende der Schalung verfahren konnte (Toter Winkel des Ablegens), da es ansonsten mit der Schalung kollidiert wäre. Dies gilt es bei zukünftigen Drucken zu berücksichtigen, da nicht der gesamte Bereich bedruckbar ist. Eine mögliche Art dem entgegenzuwirken wäre eine deutlich größere Schalungsgröße zu wählen, was allerdings zur Folge hätte, dass mehr ungebundene Gesteinskörnung benötigt wird, unabhängig von der angestrebten Form. Eine weitere Möglichkeit dem entgegenzuwirken wäre ein weiteres Verfahren des Tools über die ausgelegte Schicht ohne neue Aggregate abzulegen, um eine nachträgliche Glättung und Verteilung der Aggregate zu ermöglichen. Allerdings hätte dies eine erhebliche zeitliche Verzögerung des Ablaufes zur Folge.

11.4 Zusammenfassung

Während der Versuche wurde deutlich, dass es große Unterschiede der verwendeten Tools gab. So hat das Verteilungstool eine höhere Elastizität aufgewiesen, als der darauf verwendete Beschickungskorb. Dies liegt am Aufbau des Tools und der höheren geometrischen Aussteifung des Beschickungskorbes, sowie der Art wie die Partikel eingeleitet werden. Während das Verteilungstool die Aggregate geschoben hat, lag die Hauptlast der losen Gesteinskörnung am unteren Ende des Tools und hat somit zu einer Beanspruchung und daraus resultierenden Verformung des Tools geführt. Vergleicht man dazu die Beanspruchung mit dem Beschickungskorb, so war die Hauptlast innerhalb des Korbes und konnte über die Gesamtläche des Tools vorangeschoben werden, was weniger punktuelle Beanspruchung zur Folge hatte und somit in einer geringeren Verformung des Tools resultierte. Die bessere Lastverteilung und das Einleiten der Aggregate durch den Beschickungskorb in Versuchsreihe 2 hat es möglich gemacht, geringere Abstände vom Tool zum Druckbett zu verwenden, sodass nach der zweiten Versuchsreihe der Idealwert von Tool zu Druckbett bei 27mm liegt. Dabei gilt es zu beachten, dass durch die Elastizität der verwendeten Gummilippe der Realwert von D1, also dem Abstand des Tools zum Druckbett, höher ist, da die Gummilippe beim Schieben der Aggregate zu einem gewissen Teil nachgibt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die verwendete Zeit, die nötig war, um das Portal 1 an seine Ausgangsposition zu bringen. In dieser Versuchsreihe wurden Ausgangspunkte außerhalb der druckbaren Fläche gewählt, um ein reibungsloses Befüllen des Korbes zu ermöglichen. Je nach Größe der Schalung und daraus resultierenden Pfadwegen muss mit einem erheblichen zeitlichen Mehraufwand gerechnet werden, im Gegensatz zur bisherigen händischen Befüllung der Schalungen.

12 Untersuchungsreihe U7:Untersuchung großformatiger Geometrien

12.1 Einleitung

Wie bereits in der Beschreibung zu Untersuchungsreihe U7 erwähnt, wurde diese Versuchsreihe zusammen mit Architekturstudierenden der TU Braunschweig realisiert. Über das Semester hinweg fanden Veranstaltungen statt, die die Studierenden mit dem Ablauf des LP3DCP-Verfahrens vertraut gemacht haben. Zusätzlich konnten sich die Studierenden in vorab definierten Teilaspekten einem Thema annehmen, zu dem sie über das Semester hinweg unter Anleitung eine Versuchsidee formuliert haben. Ausgehend von den Forschungsideen der Studierenden fand ein interner Designwettbewerb statt, um eine geeignete Form für einen möglichen Demonstrator zu finden.

In Abbildung 113 ist der Demonstrator zu sehen, der aus der Arbeit zusammen mit den Studierenden entstanden ist. Deutlich zu erkennen sind die drei Einzelmodule, die nun zusammengefügt sind, sowie die nachbearbeiteten Flächen mit der angestrebten terrazzoartigen Oberfläche.

12.2 Design

Während des Seminars hatten die Studierenden die Chance, ein Design selber zu bestimmen, um eine aussagekräftige Form für einen möglichen Demonstrator zu finden. Die Aufgabe bestand darin, auf die besonderen Vorzüge des LP3DCP einzugehen. Zum einen sollte die Form einen gewissen Grad der Komplexität entsprechen, um deutlich zu machen, dass es einen vergrößerten Spielraum der Formvielfalt im Vergleich zu anderen additiven etablierten Fertigungstechniken und konventionellen Fertigungsmethoden mit Betonwerkstoffen gibt. Zum anderen sollte der Demonstrator die besondere Ästhetik der rauen und ungerichteten Partikel abbilden, als auch die terrazzoartige Oberfläche von nachbearbeiteten Flächen. Eine weitere Auflage war die Modularität des Demonstrators, da untersucht werden sollte, welche Schwierigkeiten aus einer Partitionierung und anschließender Zusammensetzung der Bauteile entstehen.

Die Design-Vorschläge der Studierenden wurden innerhalb der Gruppe zur Diskussion gestellt und auf ihre Realisierbarkeit überprüft. Gegen Ende der dreiwöchigen Designphase wurde eine Variante ausgewählt, die mit in die Versuche übernommen wurde. In Abbildung 113 ist das finale Design zu sehen. Der Demonstrator ist ein Stadtmöbel, das in drei Module aufgeteilt ist, die durch Gewindestangen miteinander verbunden werden können. Die Bank bietet Platz für bis zu drei Personen und verfügt über Sitzflächen mit der charakteristischen Terrazzooptik, während die übrigen Flächen unbearbeitet geblieben sind. Die Idee des Designs beruht auf einem Entwurf von Patrizia Hinners und Jana Hasselmeyer, die beide Teilnehmerinnen des Workshops an der TU-Braunschweig waren.

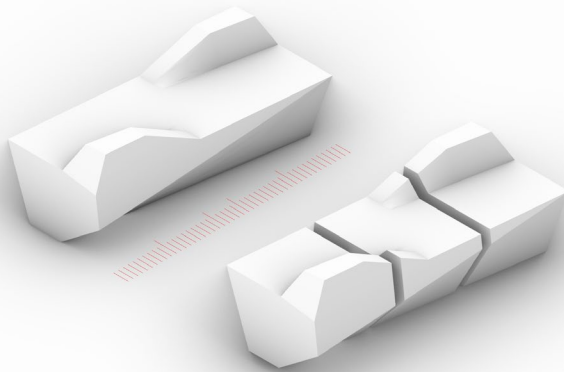


Abbildung 113: Design Demonstrator LP3DCP - Seminar

12.3 Versuchsvorbereitung

Um aus dem 3D Modell die Information für das DBFL nutzbar zu machen, wird das 3D-Modell zunächst in Schichten umgewandelt, hierfür wird die Schichthöhe der verwendeten Partikelgröße verwendet, in diesem Fall 32mm. Aus der Schichthöhe ergibt sich die maximale Anzahl der Layer, die durch das Portal 2 abzufahren sind. Die Informationen können mithilfe des digitalen Workflows aus Rhino in Kombination mit Grasshopper in Koordinaten für das DBFL umgewandelt werden, um somit die abzufahrenden Punkte zu generieren. Zusätzlich dazu können innerhalb der Grasshopper Oberfläche Parameter des Toolkopfes eingestellt werden. So kann der Luftdruck, die Geschwindigkeit und die Pumpenleistung mit eingestellt werden, um auf unterschiedliche Bedingungen, wie Materialfluss oder geometrische Anforderungen, reagieren zu können.

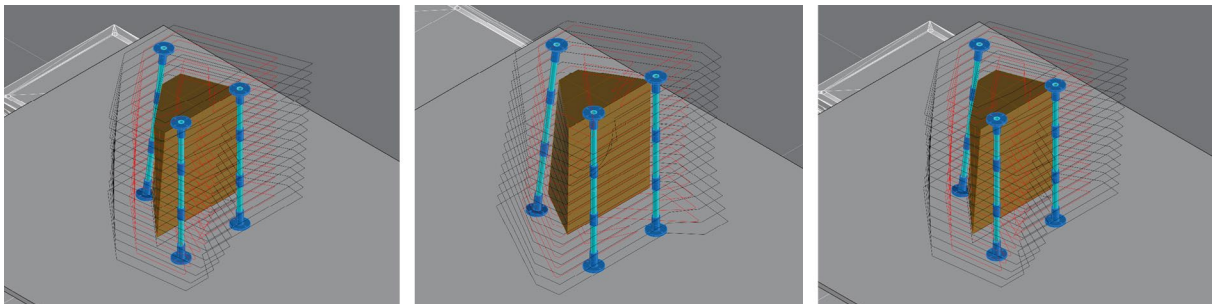


Abbildung 114: Aufteilung der 3D-Körper in Pfade

In Abbildung 114 sind die drei Segmente der Bank zu erkennen, aufgeteilt in 16 Schichten für die jeweils äußeren Teile, sowie 17 Schichten für den Mittelteil. In rot markiert verläuft der tatsächlich abzufahrende Pfad des Roboters während die schwarze Kontur eine Vorschau der zu erwartenden Geometrie darstellt.

Als Schalung wurde auf die bisher verwendete Holzschalung verzichtet. Stattdessen wurden Optionen erarbeitet, die einen modularen und größenunabhängigen Aufbau zulassen und gleichzeitig eine Wiederverwendbarkeit ermöglichen. Wie die Vorstudie zum Forschungsantrag des LP3DCP (Mai et al. 2021) gezeigt hat, ist unbehandeltes Holz als Schalung nur bedingt von Vorteil. Zwar ist ein schichtweiser Aufbau gut realisierbar, allerdings kommt es zu Verformungen bei einer Größe von 1m x 1m, was eine Wiederverwendbarkeit ausschließt. Als Alternative zu den Schalungsbrettern wurde ein System aus beschichteten Schalungssteinen entwickelt. Dies ermöglicht es, kostengünstig große Schalungen modular aufbauen zu können und gleichzeitig eine Wiederverwendbarkeit zu ermöglichen. Die Schalungssteine haben eine Höhe von 24cm, sodass sich schnell mehrere Layer übereinander aufbauen lassen. Wie in Abbildung 116 zu sehen, wurden Markierungen gemacht, um die Höhe der Layer kontrollieren zu können. Zuvor wurde dies durch die Höhe der Schalungshölzer ermöglicht. Beschichtet

wurden die Schalungssteine mit einem Kunststoff für Bodenbeläge, um eine mögliche Verbindung des Feinkornbetons mit der Schalung zu verhindern.

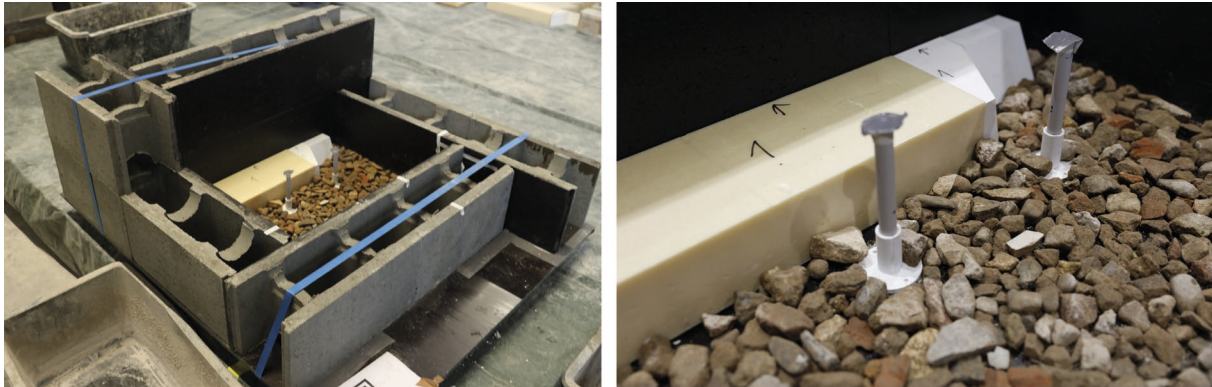


Abbildung 115: Links - Schalung mit beschichteten Schalungssteinen; rechts Anschlüsse für Leerrohre in Schalung

Im nächsten Schritt musste das Zusammenfügen der drei Module gewährleistet werden. Wie in Abbildung 115 zu erkennen, wurden dafür Leerrohre verwendet, die mit einem 3D gedruckten Anschluss innerhalb der Schalung fixiert wurden und danach modular aufeinander gesteckt werden konnten. Ziel der Leerrohre ist ein Nachspannen der Module, um eine starke Verbindung der drei Einzelmodule miteinander zu erreichen (Vantuyghem et al. 2020). Die Höhe der Leerrohr-Segmente entsprach 15 cm, damit sichergestellt werden konnte, dass die aufgesteckten Module nicht mit dem Shotcrete Tool des Portal 2 kollidieren.

12.4 Versuchsdurchführung

Für die Versuche wurden drei Schalungen für die Einzelmodule aufgestellt, zunächst nur mit einer Lage Schalungssteine. Durch das hohe Eigengewicht der Schalungssteine (27kg pro Stein) können die Steine aneinander gestellt werden ohne zusätzliche Sicherung. Um sicherzustellen, dass es keine Verschiebung der Schalungssteine infolge von Bearbeitung kommt, wurden sie mit Spanngurten gesichert. Im ersten Schritt wurde eine Schicht Aggregate ausgelegt, auf die im weiteren Prozess der Feinkornbeton appliziert wurde. Die ersten beiden Schichten wurden so angelegt, dass eine geschlossene Fläche entsteht, in den darauffolgenden Schichten wurden nur die Umrandungen gedruckt.

Zusätzlich wurde - wie zuvor erwähnt - versucht, die innenliegenden Aggregate durch ein leichteres Material auszutauschen. Um dies zu ermöglichen, muss das genaue Ablegen der leichten Aggregate gewährleistet werden. In Abbildung 116 ist zu erkennen, dass die leichteren Partikel mithilfe eines Augmented Reality Setups ausgelegt werden können. Dabei sieht die bearbeitende Person ein 3D-Modell (hier farblich markiert) der zu erstellenden Geometrie inklusive des Bereiches, der ungebunden bleibt und sich somit für den Austausch mit leichteren Partikeln eignet. Die bearbeitende Person kann so zielgenau die Aggregate an ihre gewollte Position legen, bevor Feinkornbeton appliziert wird. Zusätzlich zu den Partikeln können auch andere Objekte angezeigt werden. So wurden in diesem Fall Platzhalterelemente mit angezeigt, da diese ähnlich wie die Partikel schrittweise im Laufe des Druckprozesses eingefügt werden müssen.



Abbildung 116: AR-Integration während des LP3DCP-Drucks

Die Integration der leichteren Blähtonpartikel konnte das Gewicht des Demonstrators um etwa 14 kg pro Modul reduzieren. Dieser Wert könnte zunehmen, wenn der Anteil an austauschbarer Gesteinskörnung erhöht wird. Dies kann durch eine andere Geometrie erzeugt werden, ist aber abhängig von der strukturellen Integrität des Bauteils.

Schwierigkeiten bei der Integration zweier Partikel birgt die Automatisierung. So ist es zwar möglich, automatisiert eine Schicht Partikel auszubringen, allerdings konnten bis zu diesem Zeitpunkt nur Partikel einer Sorte ausgelegt werden. Auch der Augmented-Reality Aufbau lässt sich nicht auf ein automatisiertes System übertragen, da das visuelle Feedback der 3D-Geometrie nur für die manuelle Verteilung von Vorteil ist.

Um die Informationen vom 3D-Modell auf das robotische System zu übertragen, wurde Rhinoceros 3D in Kombination mit Grasshopper genutzt. Dabei wurde ein Workflow des ITE erarbeitet, bei dem ausgehend von Linien Informationen für ein 3D-Körper aufgeteilt werden kann und in nutzbare Informationen für die robotischen Portale des DBFL an der TU Braunschweig umgewandelt werden können. Zusätzlich zu den geometrischen Informationen, die das robotische Portal abfahren soll, werden Parameter zur Steuerung des Shotcrete-Tools mit eingewoben. So kann die Leistung der Pumpe, Luftdruck und Entfernung der Nozzle zum Druckbett, sowie Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters mit in den digitalen Workflow eingebunden werden.

Da zum Zeitpunkt des Workshops die Untersuchungen zum Feinkornbeton nicht abgeschlossen waren, wurde für die Versuche ein Beton genutzt, der bereits für andere Shotcrete-Kampagnen genutzt wurde. Da dieser Feinkornbeton keine idealen Eigenschaften für das LP3DCP-Verfahren hat, kam es zu Lücken innerhalb des Gefüges.

12.5 Nachbearbeitung

In Abbildung 117 (Abschnitt 1-3) ist das Zwischenelement des Demonstrators zu erkennen. Um die drei Module zusammenfügen zu können, muss die Verbindungsfläche geebnet werden. Hierfür wurde in 10mm Schritten jeweils drei Schichten abgetragen. Um genügend Material zu erhalten, dass im Nachbearbeitungsprozess abgetragen werden kann, wurde bei den Modulen jeweils ein extra Layer aufgedruckt.

Für die Sitzflächen wurde zunächst manuell Feinkornbeton aufgetragen, um ungewünschte Leerstellen an den Außenseiten zu füllen und sicherzustellen, dass nicht zu viele Aggregate der rezyklierten Gesteinskörnung abgetragen werden. Im weiteren Verlauf wurden Pfade für die einzelnen zu fräsenden Flächen generiert. Da der Prozess des Fräsens ein iterativer Prozess ist, bei dem nicht klar definiert ist, wie viel Material abgetragen werden muss, wurden die Pfade so angelegt, dass in 5mm Schritten die Flächen abgefräst werden konnten. In Abbildung 117(Abschnitt 4-9) sind die Schritte abgebildet, jeweils nach 5mm Abtrag. Wie deutlich zu erkennen ist, wird in den ersten Schritten kein Vollmaterial abgetragen. Da sich die gedruckte Fläche vom 3D-Modell unterscheidet, ist es notwendig über mehrere Schichten hinweg subtraktiv die gefräste Fläche an die Ausgangsgeometrie des 3D-Modells anzupassen.

Da das finale Objekt (siehe Abbildung 118) aus drei Einzelmodulen besteht, musste auch hier beim Fräsprozess darauf geachtet werden, dass die Standflächen bei allen drei Modulen gleichmäßig abgetragen werden, da ansonsten die Module zueinander nicht mehr passgenau sein könnten. So könnte ein Höhenunterschied der Module dazu führen, dass die Leerrohre sich nicht mehr treffen, oder die Sitzfläche uneben wird. Im finalen Schritt wurden die drei Module aneinandergestellt und die Sitzfläche im Ganzen gefräst. Für den Prozess des Nachbearbeitens wurden insgesamt 15 Einzelflächen definiert, die über eine glatte terrazzoartige Oberfläche verfügen sollten. Der Verfahrensweg für die beiden Rückenteile belief sich auf etwa 74m. Bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 300mm/min wurde hierfür etwa 247 Minuten reine Laufzeit des Portals 1 benötigt. Dabei gilt es zu bedenken, dass ein Großteil dieser Zeit mit Aufstellen, Einmessen und Ausrichten der Einzelteile verbracht wurde.

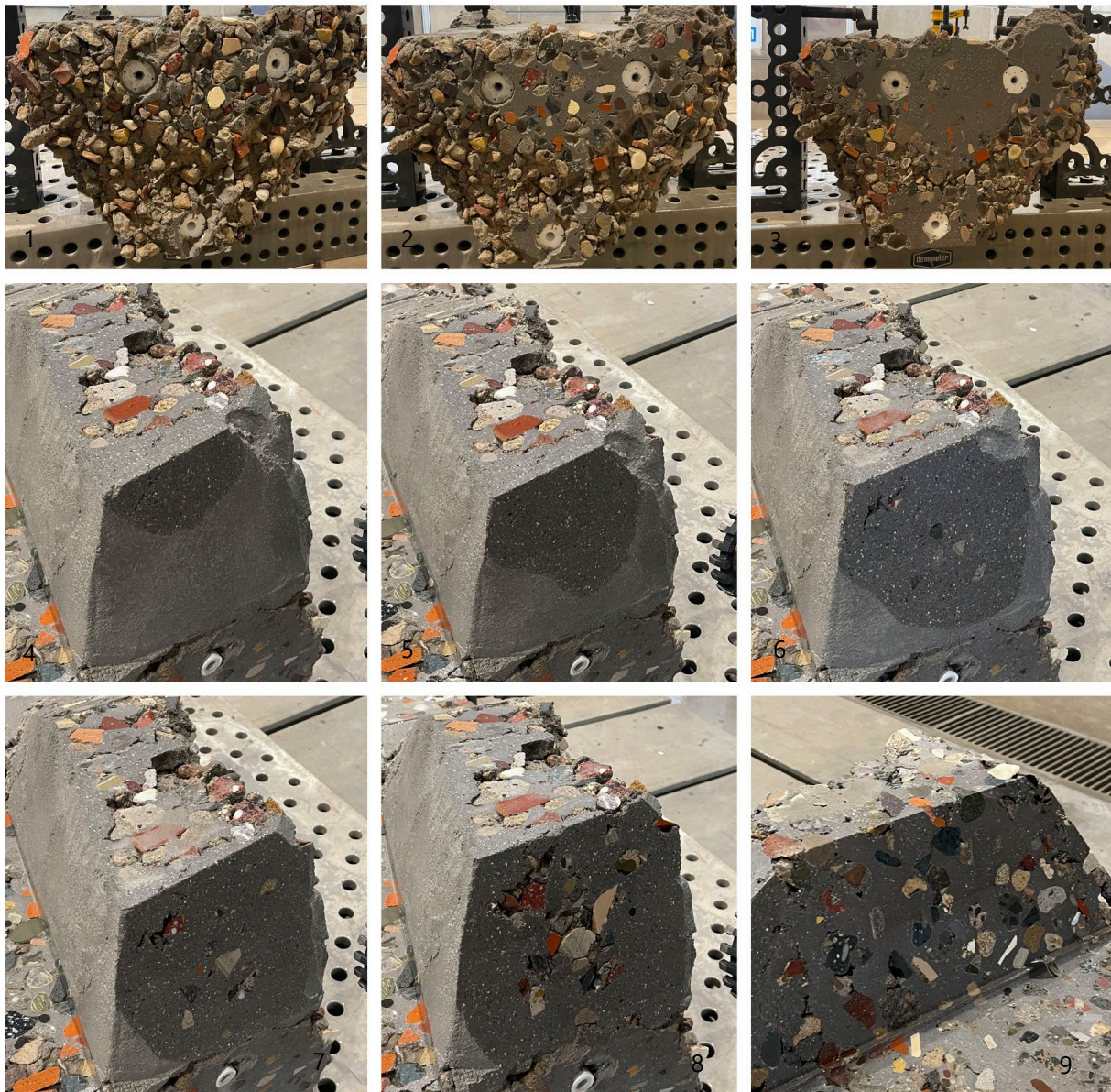


Abbildung 117: Schrittweise Oberflächenbearbeitung durch Fräsen: Bild 1-3 Anschlussfläche eines Moduls; Bild 4-9 Schrittweiser Abtrag einer Fläche

Der bei der Nachbearbeitung benötigte Zeitaufwand macht deutlich, dass ein Abfräsen der Bauteile möglich ist, aber so zeitaufwändig ist, dass Strategien überlegt werden müssen, um die Fräszeit zu minimieren. In Abbildung 116 sind zusätzlich zu den Leerrohren auch Platzhalter-Elemente (Styrodur, in Gelb dargestellt) zu erkennen. Diese Platzhalterelemente sorgen für eine Ausrichtung der Partikel, sowie

eine klare Abgrenzung für den Feinkornbeton. Der Vorteil dabei ist, dass eine Oberfläche geschaffen wird, bei der keine zusätzlichen Partikel außerhalb der angestrebten 3D-Form eingefangen werden und den Fräsprozess unnötig verlängern. Fräst man die unbearbeiteten rauen Oberflächen, so ist davon auszugehen, dass zunächst mehrere Ausgleichsschichten gefräst werden müssten und sich im Prozess Partikel ungewollt lösen könnten.



Abbildung 118: Stadtmöbel - Demonstrator des LP3DCP

12.6 Zusammenfassung

Innerhalb der Untersuchungsreihe U7 konnten einige Forschungsfragen adressiert werden und neue Impulse für das LP3DCP-Verfahren erarbeitet werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der alternativen Schalungsmethodik, die in weiteren Versuchen übernommen wurde. Auch die Verwendung von Blähtonaggregaten im Zentrum des Demonstrators wird für zukünftige Demonstratoren in Betracht gezogen, müsste aber im Zusammenspiel mit einer automatisierten Ausbringung der Partikel stattfinden.

Die Verbindung der Elemente wurde durch Leerrohre und nachträglichem Nachspannen angestrebt. Die Schwierigkeit dabei lag in der genauen Platzierung der Leerrohre zueinander, so gab es minimale Verschiebungen zwischen den Modulen. Dies führte im weiteren Prozess dazu, dass die Gewindestangen, die zum Zusammenhalten der Segmente beiträgt, nicht gewährleistet werden konnte. Um die genaue Platzierung der Leerrohre, über den gesamten Schichtverlauf sicherzustellen, muss eine Fixierung innerhalb der Schalung gewährleistet sein. Denkbar wäre hier die Integration der Leerrohr-Module mit horizontalen Bewehrungselementen.

13 Untersuchungsreihe U8: Untersuchung zu geometrischen Freiheitsgraden

13.1 Einleitung

Wie in Kapitel 4.2 bereits beschrieben, wurden in der ersten Versuchsreihe drei Proben mit sich unterscheidenden Anstiegswinkeln gedruckt. So wurde zunächst überprüft, inwieweit sich die gedruckte Probe von der prognostizierten Geometrie unterscheidet: einerseits durch Überhänge und Unterschnitte, andererseits durch das unkontrollierte Einfangen loser Partikel zu den beiden Seiten.

13.2 Versuchsreihe 1

Für die Untersuchungsreihe 8 wurden wie im Kapitel zuvor die Schalungssteine verwendet, da unterschiedliche Größenanforderungen, resultierend aus der Größe der Proben, für die Schalung vorlagen. Wichtig hierbei ist ebenfalls, dass im Unterschied zu vorherigen Probekörpern, die Probeschalungen nicht die bereits antizipierte Probenbreite haben, sondern variabel sind und somit leichter lose Gesteinskörnung gebunden werden kann.

Für die Proben wurden einfache Druckpfade definiert, die jeweils versetzt zu den darunter liegenden Pfaden verlaufen, sodass am Ende der gewünschte Anstiegswinkel entsteht.

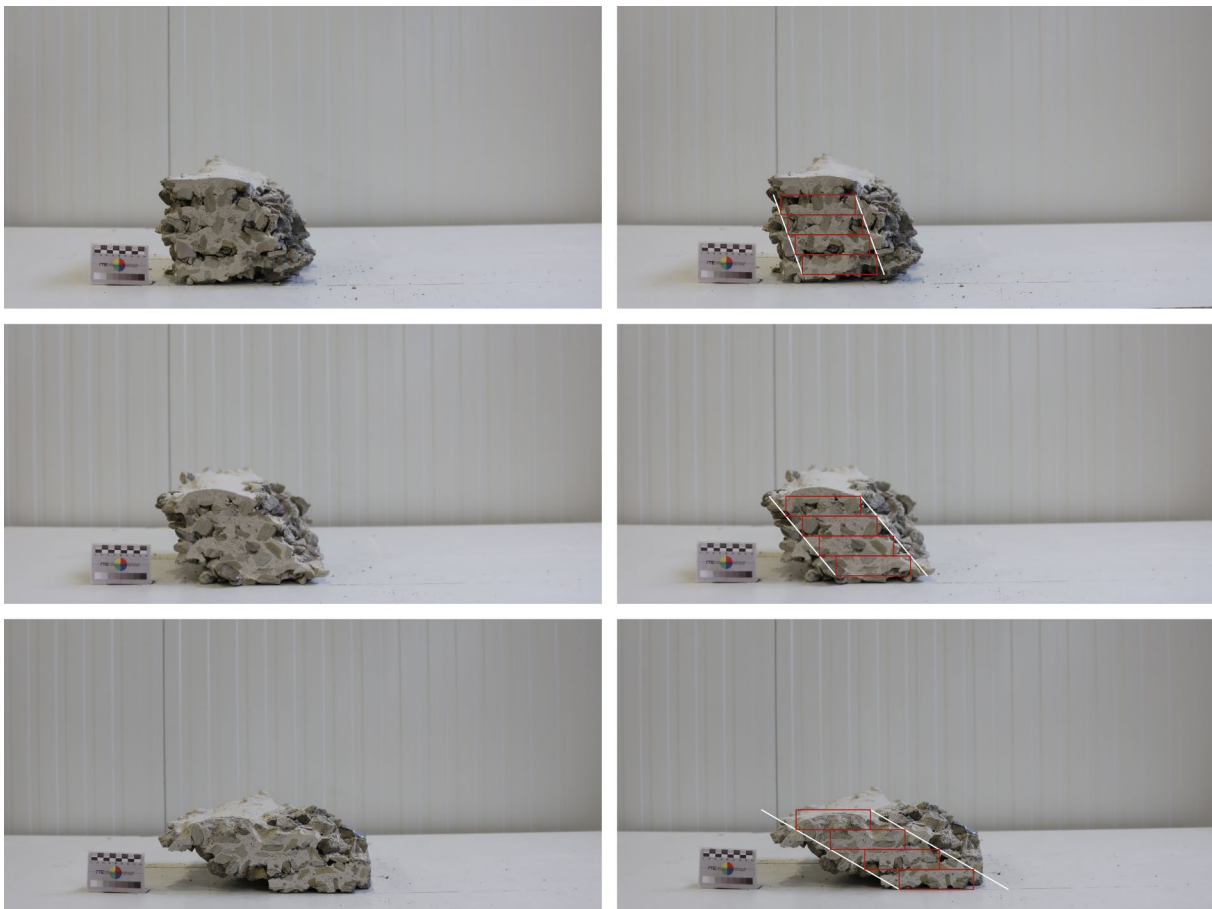


Abbildung 119: Linearer Anstieg der geschnittenen Proben; rechts: gedruckte Probe inklusive angenommene Idealform

Wie in Abbildung 119 zu erkennen, unterscheiden sich die geschnittenen Proben deutlich von den zuvor angenommenen Verläufen. Zum einen ist deutlich zu erkennen, dass die Schichtbreite nicht

ausschließlich durch die Fließfähigkeit des Materials definiert wird, sondern ebenfalls durch das Binden loser Partikel zu den Seiten. Einige dieser Steine sind mit geringer Haftung gebunden, da nur ein kleiner Teil durch den Feinkornbeton umschlossen wurde. Diese Partikel lösen sich häufig während des Ausschalprozesses. Betrachtet man die Unterschiede zwischen angenommener Größe und tatsächlichem Druckergebnis so wird deutlich, dass es zu einer deutlichen Vergrößerung der Geometrie kommt, die bis zu 32mm betragen kann, abhängig von genutzter Korngröße. Ebenfalls wird der Höhenunterschied deutlich zwischen Probe 1 und 3, so übersteigt die Probe 1 die angenommene Höhe, während Probe 3 unter der erwarteten Höhe bleibt. Dies lässt sich durch den höheren Durchfluss des Feinkornbetons durch das Partikelbett erklären. Zusätzlich dazu sind deutliche Leerstellen in Probe 1 und 2 zu erkennen, die eine zusätzliche Höhe erklären.

13.3 Versuchsreihe 2

In der zweiten Versuchsreihe der Untersuchung wurde ein Bogenmotiv mit ansteigenden Layeranzahl gewählt. Das Bogenmotiv wurde in einer Auflösung von 4, 6 und 8 Layern gedruckt, um Schlüsse für einen Detailierungsgrad zukünftiger Demonstratoren ziehen zu können.

Ähnlich wie in der vorangegangenen Versuchsreihe wurde auch hier wieder eine modulare Schalung gewählt, um auf die stark unterschiedlichen Größenordnungen variabel reagieren zu können.

Im Unterschied zu Versuchsreihe 1 wurden für die Proben zwei parallel zueinander verlaufende Druckpfade erstellt, da der obere Layer ansonsten keinen Verbund mit den darunter liegenden Schichten eingegangen wäre, denn der exponentielle Anstieg des Bogens versetzt die Pfade zu weit voneinander.

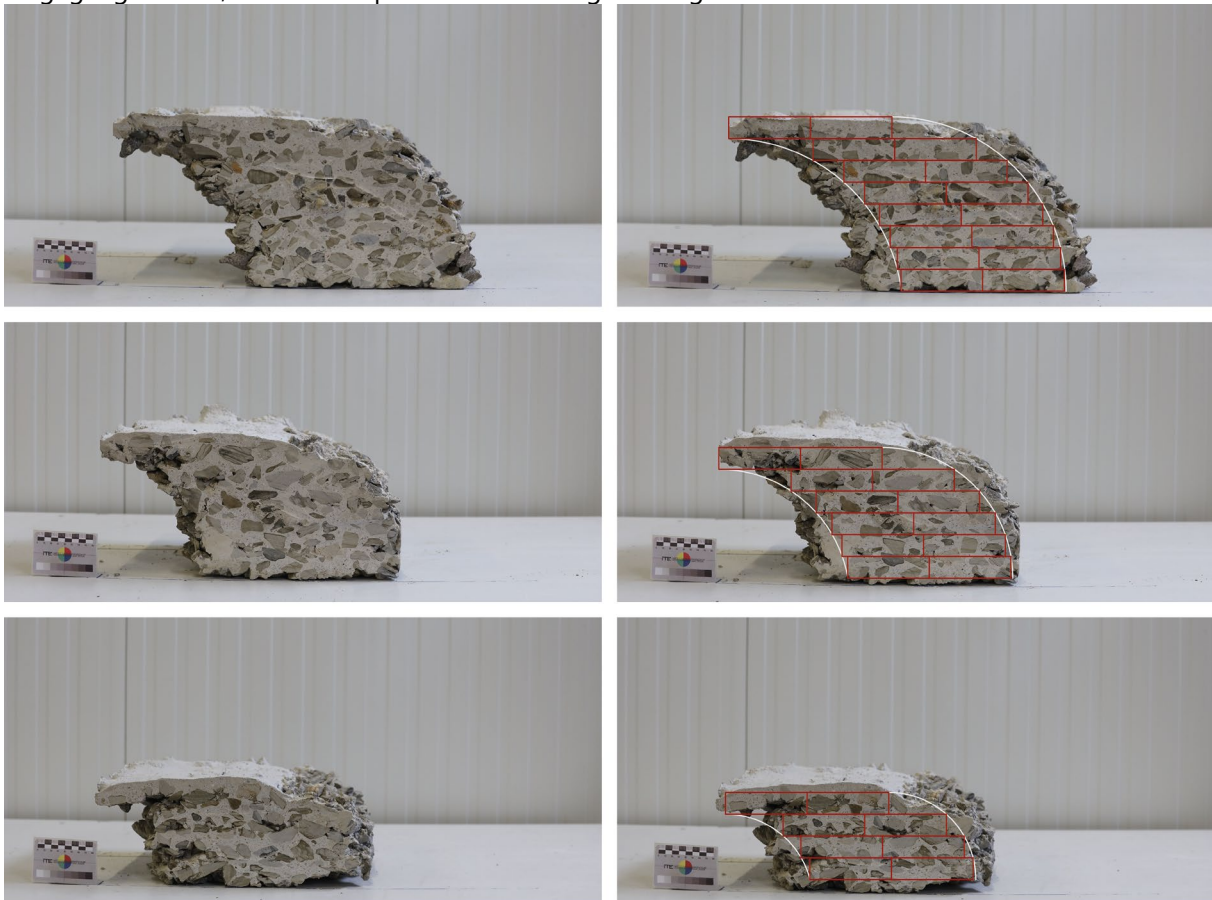


Abbildung 120: Gedrucktes Bogenmotiv; rechts: gedruckte Probe inklusive angenommene Idealform

In Abbildung 120 sind die zuvor angenommenen Geometrien im Vergleich mit den tatsächlichen Druckergebnissen zu erkennen. Deutlich erkennbar sind auch hier die zuvor beschriebenen Aufdickungen zu den Rändern, da ebenfalls zusätzliche Partikel eingefangen wurden. Betrachtet man Probe 3 mit der geringsten Auflösung, so ist das Bogenmotiv kaum erkennbar. Zwar bildet sich ein abzulesender Bogen an der Außenseite, allerdings ist der Unterschnitt im Bogeninneren kaum ablesbar.

Betrachtet man Probe 2 so ist auch hier der äußere Teil des Bogens deutlich sichtbar und auch der innere Teil ist leichter als Bogen identifizierbar. Allerdings ist auch hier nicht von einer befriedigenden geometrischen Lösung zu sprechen.

Probe 1, die Probe mit der höchsten Auflösung zeigt ein deutliches Bogenmotiv, sowohl an der Innenseite als auch an der Außenseite. Durch die höhere Anzahl an Layern und größeren Skalierung der Probe im Allgemeinen nimmt der Anteil an äußeren Partikeln im Verhältnis zum gesamten Volumen ab, somit ist die Probe deutlich näher am ursprünglich erwarteten Ergebnis.

13.4 Zusammenfassung

Das LP3DCP-Verfahren weist klare geometrische Kanten auf, solange die Schalung die Größe der gewünschten Form hat. Wenn eine Schalung genutzt wird, die eine größere Skalierung als der zu erstellende Körper aufweist, ist eine deutliche Volumenzunahme der Probe zum antizipierten 3D-Modell zu erkennen. Dies liegt an der zusätzlichen und unkontrollierbaren Bindung von Partikeln an den Außenseiten, zum einen ist dabei die Fließfähigkeit des Feinkornbetons zu beachten, zum anderen die Korngröße der Partikel.

14 Vergleich der ökologischen Aspekte von LP3DCP-Beton

Im folgenden Abschnitt wird der ökologische Aspekt des LP3DCP-Verfahrens hinsichtlich des möglichen Zementersparungspotenzials bezogen auf die Herstellung von 1 m³ Beton bewertet. Für die Berechnung werden gemäß Tabelle 12 die beiden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens verwendeten Feinkornbetone F0 und F4 herangezogen, die somit den höchsten (600 kg/m³) und niedrigsten (412 kg/m³) Zementgehalt repräsentieren. Da die Korngruppe 16-32 die besten Ergebnisse hinsichtlich der Festigkeitskennwerte aufweist, werden die Partikelbettvarianten A (Rez16-32) mit einer maximalen Porosität von 0,59 sowie F (KS16-32) und G (Rez16-32) mit einer minimalen Porosität von jeweils 0,41 für die Auswertung herangezogen.

Zur Herstellung von einem m³ LP3DCP-Beton wird nur so viel Feinkornbeton äquivalent zum Hohlraumgehalt des Partikelbetts eingebaut werden. Entsprechend kann der Zementgehalt für einen m³ LP3DCP-Beton durch die Multiplikation des Zementgehalts der Feinkornbetone F0 und F4 mit der Porosität der Partikelbetten berechnet werden. Demnach liegt der Zementgehalt für einen m³ LP3DCP-Beton, der mit dem Feinkornbeton F0 hergestellt wird, in Abhängigkeit von der Porosität zwischen 246 und 354 kg/m³. Bei Verwendung des Feinkornbetons F4 liegt der Zementgehalt dagegen nur noch zwischen 169 und 243 kg/m³.

Tabelle 12

Zementgehalt für einen 1 m³ LP3DCP-Beton für den Feinkornbeton F0 und F4. Wasser/Feinstoff-Wert (w/f); Porosität ϵ des Partikelbetts (PB). Fettgedruckter Zementgehalt für die weitere Bewertung verwendet.

	Feinkornbeton		PB	LP3DCP-Beton
	w/f [-]	Zementgehalt [kg/m ³]	(min. – max.) ϵ [-]	(min. – max. Porosität) Zementgehalt [kg/m ³]
F0	0,39	600	0,41 / 0,59	246 / 354
F4	0,41	412	0,41 / 0,59	169 / 243

In (Roussel 2012) wird die Porosität für runde Gesteinskörnung mit 0,37 - 0,41 und für gebrochene Gesteinskörnung mit 0,43 - 0,50 angegeben. Dies stimmt gut mit der Porosität der Partikelbett-Varianten F und G überein, weswegen für den weiteren Vergleich des Zementgehalts für einen m³ Beton mit anderen Herstellungsverfahren der Zementgehalt von 246 kg/m³ (F0) und 169 kg/m³ (F4) verwendet wird. In Tabelle 13 ist eine Übersicht der Zementgehalte für die Herstellung von einem m³ Beton in Abhängigkeit des LP3DCP-Verfahrens sowie wie nach (Flatt und Wangler 2022) der Zementgehalte für die Herstellung von einem m³ Beton der bisher üblichen 3D-Druckverfahren mit 1K- und 2K-Systemen und bei konventioneller Herstellung dargestellt. Das LP3DCP-Verfahren erzielt dabei mit 169 (F4) bis 246 (F0) kg/m³ je 1 m³ Beton einen geringeren Zementgehalt als die bisher bekannten 3D-Druckverfahren mit minimal 303 bis maximal 800 kg/m³ und liegt im Bereich der konventionellen Betone (minimal 180 bis maximal 450 kg/m³). Bei konservativer Betrachtung, d.h. bei Verwendung des Feinkornbetons F4 und des minimalen Zementgehalts für konventionelle 3D-Druckverfahren (303 bis 331 kg/m³), liegt das Zementersparpotenzial des LP3DCP-Verfahrens zwischen 44 % und 49 % gegenüber konventionellen 3D-Druckverfahren. Vergleicht man den Zementgehalt des LP3DCP-Verfahrens (F0: 246 kg/m³; F4: 169 kg/m³) mit der konventionellen Herstellung (180 - 450 kg/m³), so liegt das Einsparpotenzial zwischen -37 % und 62 %. Auch hier erreicht das LP3DCP-Verfahren bei einem konservativen Szenario (Feinkornbeton F4; minimaler Zementgehalt bei konventioneller Herstellung (180 kg/m³)) noch ein leicht positives Einsparpotenzial von 6 %.

Tabelle 13

Zementgehalt für einen 1 m³ Beton für das LP3DCP-Verfahren (Porosität: 0,41) sowie minimaler und maximaler Zementgehalt anderer Herstellungsverfahren (Flatt und Wangler 2022) Potentielle minimale und maximale Zement einsparung durch das LP3DCP-Verfahren im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren bei Verwendung der Feinkornbetone F0 und F4. Maximale verwendete Partikelgröße d_{max} . Konservative Betrachtung. Fett markierte Zahlen zur Zement einsparung für ein realistisches, konservatives Szenario.

Betonvariante	Zementgehalt je 1 m ³ Beton (min. bis max.) [kg/m ³]	d_{max} [mm]	Zement einsparung [%]	
			bei F0 (min. bis max.)	bei F4 (min. bis max.)
LP3DCP mit F0	246	64		
LP3DCP mit F4	169	64		
3D-Beton (1K)	331 bis 579	9,5	26 bis 58	49 bis 71
3D-Beton (2K)	303 bis 800	2	19 bis 69	44 bis 79
Konventioneller Beton	180 bis 450	32	-37 bis 45	6 bis 62

Die Ergebnisse zeigen, dass etablierte Beton-3D-Druckverfahren aufgrund prozessbedingter Einschränkungen überwiegend auf zementreiche Feinkornbetone angewiesen sind, da grobe Gesteinskörnungen im 3D-Druckprozess bislang nicht verarbeitet werden können. Das LP3DCP-Verfahren verfolgt demgegenüber einen grundlegend abweichenden Ansatz, bei dem großkörnige Gesteinskörnungen beziehungsweise Rezyklate nicht Bestandteil einer pumpfähigen Betonmischung sind, sondern im additiven Fertigungsprozess gezielt selektiv mit Zementleim umhüllt werden. Der Zement Einsatz wird dabei primär durch den Hohlraumgehalt des Partikelbetts bestimmt und nicht durch rheologische Anforderungen. Der quantitative Vergleich verdeutlicht, dass mit dem LP3DCP-Verfahren bei vergleichbarer mechanischer Leistungsfähigkeit ein deutlich reduzierter Zementgehalt pro Kubikmeter Beton realisierbar ist, woraus sich ein erhebliches ökologisches Einsparpotenzial hinsichtlich Zementverbrauch und Primärrohstoffeinsatz ergibt. Dieses Potenzial könnte künftig weiter gesteigert werden, wenn direkt auf der Baustelle gebrochene grobe Recyclingkörnungen im Bereich von 16 bis 64 mm im LP3DCP-Verfahren eingesetzt werden. Da diese nur in begrenztem Umfang zerkleinert werden müssen und unmittelbar vor Ort mit dem LP3DCP-Verfahren verarbeitet werden können, lassen sich Transportwege und der damit verbundene Energieeinsatz reduzieren. Unter der Annahme nachhaltiger Energieträger im Zerkleinerungsprozess ergibt sich somit ein zusätzliches Einsparpotenzial im Gesamtenergieeinsatz bei gleichzeitiger Schonung primärer Gesteinskörnungsressourcen.

Derzeit sind jedoch mehrere Prozessschritte mit hohem personellen Aufwand verbunden und noch nicht automatisiert. Dies betrifft insbesondere die Siebung der Rezyklate sowie die schrittweise Erweiterung der Schalungsgeometrie. Diese Faktoren schränken eine wirtschaftliche Anwendung des LP3DCP-Verfahrens gegenwärtig ein. Hinzu kommt, dass das Verfahren im Gegensatz zu den meisten etablierten Beton-3D-Druckverfahren einen zusätzlichen subtraktiven Nachbearbeitungsschritt erfordert. Dieser ermöglicht zwar hochpräzise CNC-gefräste Oberflächen sowie die Integration von Trockenstoßverbindungen, ist jedoch mit einem vergleichsweise hohen Zeit- und Maschinenaufwand verbunden.

15 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die Leistungsfähigkeit des LP3DCP-Verfahrens evaluiert. Hierfür wurden die möglichen Einflussparameter auf die Leistungsfähigkeit identifiziert sowie ein Verständnis über das Eindringverhalten des Feinkornbetons in das Partikelbett herausgearbeitet. Außerdem wurde an großformatigen Proben die Bearbeitbarkeit der Oberflächen, sowie Möglichkeiten zur automatisierten Partikelverteilung untersucht.

Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass bei einer geeigneten Abstimmung der Material- und Prozessparameter das LP3DCP-Verfahren gleiche oder sogar bessere mechanische Eigenschaften im Vergleich zu konventionell hergestellten Betonen aufweisen. Hierbei wurde herausgearbeitet, dass insbesondere die Rheologie des Feinkornbetons sowie die Partikelform einen wesentlichen Einfluss auf das Eindringverhalten des Feinkornbetons besitzt. Die Wahl eines fließfähigen Feinkornbetonsystems in Kombination mit runden Partikelformen weist das beste Eindringverhalten sowie hohe mechanische Eigenschaften auf. Dabei erwies sich eine Korngruppe zwischen 16 mm und 32 mm als besonders vielversprechend. Korngruppen mit Anteilen unter 16 mm erschwerte tendenziell das Eindringen des Feinkornbetons. Bei Korngruppen über 32 mm bis 64 mm sind die Partikel so groß, dass diese annähernd die volle Fläche des Spritzstrahls ausfüllen. Hierbei kann es dann aufgrund des beschleunigten Auftrags des Feinkornbetons und des resultierenden Abfalls zu einer negativen Entwicklung der mechanischen Eigenschaften kommen. Die Variation der Prozessparameter und dadurch Variation der kinetischen Beschleunigung besitzt im Vergleich zur Rheologie oder Partikelform einen untergeordneten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Dennoch kann aber die Wahl einer hohen kinetischen Beschleunigung sowie einer plattigen Partikelform zu einer Zunahme der mechanischen Eigenschaften führen. Gleichzeitig führt die Wahl einer runden Partikelform unter hohen kinetischen Beschleunigungen tendenziell zu einer Abnahme der mechanischen Eigenschaften, erzielt aber zugleich auch ein isotropes mechanisches Verhalten.

Bei der Applizierung des Feinkornbetons auf das Partikelbett breitet sich in Abhängigkeit der Rheologie und der Partikelform der Feinkornbeton unterschiedlich stark auf den Partikeloberflächen aus. Dabei führt ein fließfähiger Feinkornbeton zu einem verstärkten lateralen Fließen über die Partikelbettoberfläche. Zusätzlich weisen Partikelbetten mit einer plattigen Kornform eine geringere Oberflächenrauigkeit des Partikelbetts auf, was ein laterales Fließen zusätzlich verstärkt. Die mechanischen Eigenschaften hängen dabei von dem Eindringverhalten des Feinkornbetons in das Partikelbett ab. Im Rahmen der hier untersuchten Parameter konnte gezeigt werden, dass das Eindringverhalten und somit auch die mechanischen Eigenschaften von dem aufstehenden Feinkornbeton auf dem Partikelbett bestimmt werden. Die Eindringtiefe des Feinkornbeton in das darunter liegende Partikelbett scheint keine wesentliche Rolle zu spielen. Vielmehr wird bei Einbau einer nächsten Partikelschicht in Abhängigkeit der rheologischen Kennwerte und Partikelform der Feinkornbeton entweder vertikal oder lateral verdrängt.

Die Anwendung einer Gleichung zur Berechnung der Düsen-Verfahrgeschwindigkeit (vgl. GL 3) führt bereits zu guten Ergebnissen. Bei Auftreten eines lateralen Fließens kann das aber auch dazu führen, dass nicht alle LP3DCP-Betonbereiche immer perfekt gebunden sind. Eine Reduzierung der Düsen-Verfahrgeschwindigkeit und somit einer Erhöhung der applizierten Betonmenge können eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bewirken.

Zusätzlich konnte dargelegt werden, dass der LP3DCP-Prozess bei optimaler Wahl der Material- und Prozessparametern zukünftig ähnliche Biegezugfestigkeiten wie konventionell hergestellte Betone erzielen können. Die Einlegereihenfolge der horizontalen Bewehrung besitzt keinen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit (1. Partikel, 2. Bewehrung, 3. Feinkornbeton oder 1. Partikel, 2. Feinkornbeton, 3. Bewehrung).

Die Anwendung des LP3DCP-Verfahrens kann dabei effektiv den Zementgehalt gegenüber konventionellen 3D-Druckverfahren reduzieren. Bei den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eingesetzten zementreduzierten Feinkornbetone wurden für 1 m³ LP3DCP-Beton 177 kg Zement eingesetzt, was im Bereich von konventionell hergestelltem Beton liegt (Flatt und Wangler 2022). Daneben konnte gezeigt werden, dass auch mit Rezyklat-Partikeln eine hohe mechanische Eigenschaft erzielt und somit Primärressourcen geschont werden können. Unter der Voraussetzung der Nutzung regenerativer Energiequellen, insbesondere bei der Rezyklataufbereitung und Bauteilproduktion, lässt sich das ökologische Einsparpotenzial des LP3DCP-Verfahrens hinsichtlich Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen weiter steigern.

Während die für einen stabilen Druckprozess maßgeblichen Material- und Prozessparameter hinreichend untersucht wurden, bestehen im Bereich der Digitalisierung und der Integration digitaler Werkzeuge weiterhin Entwicklungspotenziale. Der Einsatz eines Augmented-Reality-(AR)-Setups kann die manuelle Partikelablage unterstützen, indem Positionierung und Layerhöhen visuell geführt werden. Dieser Ansatz stellt jedoch primär eine Assistenztechnologie dar und ersetzt keine vollständig automatisierte Prozesskette.

Im Hinblick auf die Automatisierung ist ein simultanes Ablegen von Partikeln in definierter Schichthöhe grundsätzlich möglich, erfordert jedoch eine weitergehende robotische Feinabstimmung zur Steigerung von Geschwindigkeit und Prozessstabilität. Für eine industrielle Skalierung ist eine deutliche Erhöhung des Automatisierungsgrades sowie der Prozesszuverlässigkeit essenziell, da mit zunehmender Bauteilgröße die manuelle Befüllung der Schalung mit Rezyklaten sowohl ergonomisch als auch logistisch an Grenzen stößt. Spätestens wenn die Partikelablage aufgrund eingeschränkter menschlicher Reichweite nur noch mithilfe technischer Hilfsmittel realisierbar ist, wird eine automatisierte und zuverlässige Beschickung der Schalung unverzichtbar. Das momentan noch manuell durchgeführte Sieben der Rezyklatpartikel und die Qualitätskontrolle stellt einen weiteren automatisierbaren Vorgang dar, der die Produktivität deutlich steigern könnte.

Im Gegensatz zu alternativen 3D-Druckverfahren ist das LP3DCP-Verfahren auf eine Schalung angewiesen, um die ausgelegten Partikel lagenweise zu fixieren. Dies stellt im Hinblick auf Skalierbarkeit und maximal realisierbare Bauteilabmessungen eine konstruktive Herausforderung dar. Der derzeitige Prozess der schichtweisen Partikelablage mit anschließender Applikation des Feinkornbetons erfordert eine „mitwachsende“ Schalung, da ein Mindestabstand der Düse von etwa 20 cm einzuhalten ist. Mit zunehmender Bauteilgröße und geometrischer Komplexität steigen daher die Anforderungen an Konzeption, Dimensionierung und Handhabung der Schalungssysteme. Darüber hinaus nimmt der seitliche Druck der ungebundenen Partikel auf die Schalungsinenseiten mit jeder weiteren Schicht zu, wodurch die Belastungen der Schalungselemente progressiv ansteigen. Insbesondere aufgrund des modularen Aufbaus der derzeit entwickelten LP3DCP-Schalungssysteme ist bei zunehmender Bauteilgröße mit einem erhöhten Risiko von Verformungen oder Ausbeulungen zu rechnen. Dadurch könnte die Skalierbarkeit mit dem aktuell eingesetzten System konstruktiv begrenzt sein. Vor diesem Hintergrund sind weiterführende Untersuchungen erforderlich, um speziell ausgelegte, hochstabile und zugleich wirtschaftlich einsetzbare Schalungssysteme für großmaßstäbliche LP3DCP-Anwendungen zu entwickeln.

Die durch die Schalungsdimensionierung bedingten Limitierungen prädestinieren das Verfahren insbesondere für modulare Bauweisen, wobei die maximal realisierbaren und damit konstruktiv begrenzten Bauteilabmessungen noch systematisch zu untersuchen sind. Einzelne Module können über kraftschlüssige, vorgespannte Trockenstoßverbindungen zu größeren Tragstrukturen gefügt werden. Diese konstruktive Strategie eröffnet zugleich Potenziale hinsichtlich Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit. Das modulare Fügen mittels Vorspannung ermöglicht eine weitgehend zerstörungssarme Trennung der Bauteile und unterstützt damit eine kreislaufgerechte Bauweise.

Zusätzliche Größenbegrenzungen ergeben sich aus transport- und handhabungstechnischen Randbedingungen. Vorgefertigte LP3DCP-Bauteile müssen so dimensioniert sein, dass sie mit üblichen Umschlagmitteln, beispielsweise Gabelstaplern, auf Transportfahrzeuge verladen werden können, wodurch bauphysikalische Restriktionen entstehen. Demgegenüber sind in-situ hergestellte Bauteile hinsichtlich ihrer Abmessungen grundsätzlich weniger limitiert, da ihre Versetzung in der Regel mittels auf der Baustelle vorhandener Krantechnik erfolgen kann oder sie unmittelbar am Verwendungsort produziert werden. In diesem Fall ergeben sich Größenbegrenzungen primär aus fertigungstechnischen Strategien, insbesondere im Hinblick auf Bewehrungsintegration, Vorspannkonzepte sowie weitere prozessbedingte Randbedingungen.

Im Rahmen der Herstellung des Demonstrators konnte der gesamte Prozessablauf unter praxisnahen Bedingungen erprobt werden. Dabei wurden weitere Forschungsfelder identifiziert. Insbesondere sollte die Segmentierung von Bauteilen sowie deren anschließender kraftschlüssiger Verbund mittels Vorspannung für LP3DCP-hergestellte Bauteile vertieft untersucht werden. Darüber hinaus ist der Einsatz alternativer Partikeltypen, die keine Anforderungen an Festigkeit oder Lastabtrag erfüllen müssen, bislang nicht ausreichend erforscht. Der gezielte Einsatz leichter Partikel könnte zu einer Reduktion des Eigengewichts führen und damit die Handhabung sowie Montage von LP3DCP-gefertigten Betonelementen verbessern.

Die Untersuchungen zu den geometrischen Freiheitsgraden zeigen, dass die geometrische Auflösung des LP3DCP-Verfahrens maßgeblich durch die maximale Partikelgröße der eingesetzten Gesteinskörnung begrenzt wird. Der ohne zusätzliche Nachbearbeitung erreichbare Detaillierungsgrad ist unmittelbar von der Partikelgröße abhängig. Diese definiert eine untere Grenze für minimal realisierbare Strukturabmessungen sowie für darstellbare Krümmungsradien. Freiformgeometrien, wie beispielsweise Bögen, werden erst dann geometrisch eindeutig ausgebildet, wenn der Krümmungsradius ein deutliches Vielfaches der verwendeten Partikelgröße beträgt. Liegt der Krümmungsradius hingegen in der Größenordnung der Partikelabmessung, dominiert die diskrete Kornstruktur die Formabbildung, sodass eine kontinuierliche Krümmung nur eingeschränkt darstellbar ist. Ungeachtet dieser auflösungsbedingten Einschränkungen ist hervorzuheben, dass Freiformgeometrien, Überhänge und komplexe Krümmungen im LP3DCP-Verfahren realisierbar sind. Dadurch wird ein hoher gestalterischer Freiheitsgrad bei der Formgebung von Betonkörpern ermöglicht. Die Kombination aus digitalen 3D-CAD-Entwurfswerkzeugen und der direkten Umsetzung mittels LP3DCP eröffnet neue architektonische Gestaltungsspielräume.

Mit zunehmendem Technologiereifegrad des LP3DCP-Verfahrens sind künftig Bauraten denkbar, die über denen anderer additiver Betonfertigungsverfahren liegen könnten. Das Verfahren erscheint daher insbesondere für massige Gründungsbauteile geeignet. Darüber hinaus sind hybride Konzepte vorstellbar, bei denen das LP3DCP-Verfahren den tragenden Kern von Decken- oder Wandelementen bildet, während in einem zweiten Arbeitsschritt eine Sichtoberfläche, beispielsweise mittels eines anderen additiven Verfahrens, appliziert wird. Diese Deckschicht könnte ebenfalls robotisch aufgebracht werden und zu einer hybriden Bauweise führen, die sowohl hinsichtlich des Automatisierungsgrades als auch der Bauteilqualität Effizienzpotenziale aufweist.

Mit dem LP3DCP-Verfahren lassen sich bewusst ungerichtete und unebene Oberflächenstrukturen realisieren, welche die materialimmanente Rauheit des Prozesses gestalterisch hervorheben und dadurch neue architektonische Typologien ermöglichen. Der nachträgliche Abtrag solcher Oberflächen hin zu einer terrazzoartigen Beschaffenheit ist jedoch mit erheblichem Mehraufwand verbunden. Einmess- und Ausrichtprozesse müssen für jede zu bearbeitende Fläche erneut durchgeführt werden, während der materialabtragende Schleif- beziehungsweise Fräsprozess aufgrund begrenzter Eintauchtiefen iterativ erfolgt. Dies kann sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Auswirkungen nach sich ziehen. Die Bearbeitungszeit ist zudem maßgeblich vom eingesetzten Fräswerkzeug abhängig: Kleinere Werkzeuge ermöglichen eine höhere Detailauflösung, erhöhen jedoch den Zeit- und

Energieaufwand. Eine Beschleunigung und Effizienzsteigerung des Nachbearbeitungsprozesses könnte durch die Implementierung einer geschlossenen digitalen Prozesskette aus 3D-Scan, automatisierter Geometrieauswertung und adaptiver Bahnplanung realisiert werden.

Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse war nicht Bestandteil des vorliegenden Forschungsprojekts. Gleichwohl ist davon auszugehen, dass eine wirtschaftliche Umsetzung maßgeblich von einer weitgehenden Automatisierung der bislang manuell ausgeführten Prozessschritte abhängt. Dies betrifft insbesondere die Partikelklassierung, den schrittweisen Aufbau der Schalungsgeometrie sowie weiterführende Untersuchungen zur maximal realisierbaren Bauteilgröße und deren konstruktiven Grenzen. Aus produktionsökonomischer Perspektive ist insbesondere die Steigerung relevanter Produktivitätskennzahlen entscheidend, darunter die Baurate, der Automatisierungsgrad, Rüst- und Nebenzeiten sowie der spezifische Energie- und Personalaufwand pro Bauteileinheit. Der subtraktive CNC-Nachbearbeitungsschritt beeinflusst diese Kennzahlen maßgeblich, da er zusätzliche Maschinenlaufzeiten, Einmessprozesse und gegebenenfalls Umrüstvorgänge erfordert

Während dieser Prozess im Rahmen einer Vorfertigung unter kontrollierten Randbedingungen grundsätzlich gut plan- und standardisierbar ist, stellt er bei einer in-situ-Anwendung aufgrund des erhöhten Rüstaufwands, variierender Umgebungsbedingungen und zusätzlicher logistischer Abstimmungen eine produktivitätsrelevante Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund ergeben sich unterschiedliche ökologische und logistische Rahmenbedingungen für Vorfertigungs- und in-situ-Konzepte. Während die Baustellenfertigung Transportwege reduzieren und eine direkte Wiederverwendung von Rezyklaten ermöglichen kann, bietet die Vorfertigung Vorteile hinsichtlich Maßhaltigkeit, Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit. Die jeweiligen Vor- und Nachteile sollten im Rahmen zukünftiger ganzheitlicher Bewertungen systematisch untersucht werden.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten daher den Fokus auf die vollständige Automatisierung des Verfahrens sowie auf eine systematische Wirtschaftlichkeitsanalyse legen, die in-situ- und Vorfertigungskonzepte vergleichend bewertet. Dabei sollten Transportwege, Produktionsabläufe, Bauzeiten im Vergleich zu additiven und konventionellen Verfahren sowie CO₂-Bilanzierungen berücksichtigt werden. Darüber hinaus bietet die Entwicklung modularer Bauweisen mit vorgespannten Trockenstoßverbindungen ein erhebliches Potenzial im Kontext von Kreislaufwirtschaft, Demontierbarkeit und Wiederverwendung.

Zusammenfassend wird das LP3DCP-Verfahren als ein technologisch und ökologisch vielversprechender Ansatz im additiven Betonbau eingeschätzt. Die nachgewiesenen mechanischen Eigenschaften, die hohen geometrischen Freiheitsgrade sowie das Potenzial für hohe vertikale Bauraten infolge großer Schichtstärken sprechen für die Weiterentwicklung des Verfahrens. Bei konsequenter Automatisierung und Integration digitaler Prozessketten kann das LP3DCP-Verfahren in Kombination mit Recyclingpartikeln und nachhaltigen Energieträgern einen Beitrag zu einer ressourcen- und emissionsreduzierten Bauweise leisten.

16 Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Böhler, David

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig

Zöllner, Jan-Phillip

Institut Für Tragwerksentwurf (ITE), TU Braunschweig

Fachliche Betreuung

Prof. Dr. Harald Kloft

Institut Für Tragwerksentwurf (ITE), TU Braunschweig

Prof. Dr. Norman Hack

Institut Für Tragwerksentwurf (ITE), TU Braunschweig

Prof. Dr. Dirk Lowke

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig

Prof. Dr. Inka Mai

Institut für Robotergestützte Fertigung der gebauten Umwelt; TU Berlin

17 Kurzbiographien



M.Sc. David Böhler

Geb. 1990; 2010 – 2012 Ausbildung zum Zimmerer; bis 2020 Studium Bauingenieurwesen, TU Braunschweig; 2020 – 2024 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Fachgebiet Baustoffe, TU Braunschweig; seit 2024 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Binder Jetting Technology, TU München
Arbeitsschwerpunkte: Additive Fertigung, 3D-Drucken, Selective Paste Intrusion, Shotcrete 3D Printing, Large Particle 3D Printing, Rheologie, Dauerhaftigkeit von 3D-gedruckten Bauteilen



M.Sc. Jan-Phillip Zöllner

Geboren 1992, Masterstudium der Architektur abgeschlossen im Jahr 2021, seit 2022 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragwerksentwurf, unter Leitung von Prof. Dr. Harald Kloft, sowie Prof. Dr. Norman Hack, zuvor Lehrbeauftragter am Institut für Entwerfen und Raumkomposition unter der Leitung von Prof. Volker Staab, Arbeitsschwerpunkt: Digitales Gestalten.



Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft

Bis 1990 Studium Bauingenieurwesen, TU Darmstadt, 1991 – 1993 Projekt Ingenieur Strabag Bau AG, Köln/Darmstadt, 1993 – 1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter - Promotion; 1998-2001 Ingenieur bei Bollinger + Grohmann, Frankfurt; Seit 2002 Mitgründer und Partner OSD, Frankfurt; 2002 - 2011 Universitätsprofessor am Institut für Tragwerksentwurf und Konstruktion, TU Kaiserslautern; 2007 – 2009 Universitätsprofessor am Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz; Seit 2011 Universitätsprofessor am Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig; Seit 2020 Boardmember des TRR 277 Additive Manufacturing in Construction



Prof. Dr. (sc. ETH) Norman Hack

Geb. 1979, bis 2012 Studium der Architektur, TU Wien, Architectural Association; 2009-2010 Specialist Computational Design Herzog und deMeuron; 2012 -2013 Research Assistant Future Cities Laboratory, Singapore ETH Centre for Global Environmental Sustainability; 2018 PhD, Architecture and Digital Fabrication, ETH Zürich; seit 2018 Junior Professor Digital Building Fabrication am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) TU Braunschweig



Prof. Dr.-Ing. Inka Mai

Geb. 1989; bis 2013 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens und Bauingenieurwesen, TU Braunschweig, Chalmers Tekniska Högskola und University of Rhode Island; seit 2013 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Fachgebiet Baustoffe, TU Braunschweig; 2013 – 2018 Promotion; 2019 – 2023 als Oberingenieurin und Arbeitsgruppenleitung am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Fachgebiet Baustoffe, TU Braunschweig; seit 2023 Professorin am Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Robotergestützte Fertigung der gebauten Umwelt der TU Berlin.

**Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke**

Geb. 1974; bis 2000 Studium Bauingenieurwesen, TU Cottbus; 2001 – 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter und 2006 – 2013 Leitung der Abteilung Betontechnologie am Centrum für Baustoffe und Materialprüfung, TU München; 2013 Promotion; 2013 – 2017 Leitung der Abteilung Betontechnologie, Leiter Forschung und Lehrbeauftragter am Centrum für Baustoffe und Materialprüfung, TU München; 2017 – 2024 Universitätsprofessor am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Fachgebiet Baustoffe, TU Braunschweig; seit 2023 Universitätsprofessor am Lehrstuhl für Binder Jetting Technology, TU München; Arbeitsschwerpunkte: Rheologie und digitale Fertigung; Gefüge, Mechanik und Dauerhaftigkeit

18 Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

Aejmelaeus-Lindström, Petrus; Rusenova, Gergana; Mirjan, Ammar; Medina Ibáñez, Jesús; Gramazio, Fabio; Kohler, Matthias (2020): Rock print Pavilion: robotically fabricating architecture from rock and string. In: *Constr Robot* 4 (1-2), S. 97–113. DOI: 10.1007/s41693-020-00027-8.

Baumert, Christian; Garrecht, Harald (2020): Minimization of the Influence of Shear-Induced Particle Migration in Determining the Rheological Characteristics of Self-Compacting Mortars and Concretes. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 13 (7). DOI: 10.3390/ma13071542.

Böhler, D.; Freund, N.; Mai, I.; Lowke, D. (Hg.) (2023): Shotcrete 3D Printing - Effect of material-process interaction on the global and local material density. 21. ibausil. Weimar.

Böhler, David; Mai, Inka; Freund, Niklas; Lachmayer, Lukas; Raatz, Annika; Lowke, Dirk (2022): Influence of Material and Process Parameters on Hardened State Properties of Shotcrete 3D-Printed Elements. In: Richard Buswell, Ana Blanco, Sergio Cavalaro und Peter Kinnell (Hg.): Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Bd. 37. Cham: Springer International Publishing (RILEM Bookseries), S. 255–260.

Dressler, I.; Freund, N.; Lowke, D. (2020): Control of Strand Properties Produced with Shotcrete 3D Printing by Accelerator Dosage and Process Parameters. In: F. Bos, S. Lucas, R. Wolfs und T. Salet (Hg.): Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Digital Concrete 2020: Springer, S. 42–52.

Estellé, Patrice; Lanos, Christophe; Perrot, Arnaud; Amziane, Sofiane (2008): Processing the Vane Shear Flow Data from Couette Analogy. In: *Applied Rheology* 18 (3), 34037-1-34037-6. DOI: 10.1515/arh-2008-0009.

Flatt, Robert J.; Wangler, Timothy (2022): On sustainability and digital fabrication with concrete. In: *Cement and Concrete Research* 158, S. 106837. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106837.

Freund, N.; David, M.; Böhler, D.; Mai, I.; Ullmann, S.; Dröder, K.; Lowke, D. (Hg.) (2023): Shotcrete 3D Printing - Interaction of nozzle geometry, homogeneity and hardened concrete properties. 21. ibausil. Weimar.

Gelardi, G.; Mantellato, S.; Marchon, D.; Palacios, M.; Eberhardt, A. B.; Flatt, R. J.: Chemistry of chemical admixtures, S. 149–218.

Ginouse, Nicolas; Jolin, Marc (2014): Experimental and Numerical Investigation of Particle Kinematics in Shotcrete. In: *J. Mater. Civ. Eng.* 26 (11), Artikel 06014023, S. 6014023. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001092.

Ginouse, Nicolas; Jolin, Marc (2015): Investigation of spray pattern in shotcrete applications. In: *Construction and Building Materials* 93, S. 966–972. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.061.

Ginouse, Nicolas; Jolin, Marc; Bissonnette, Benoit (2014): Effect of equipment on spray velocity distribution in shotcrete applications. In: *Construction and Building Materials* 70, S. 362–369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.116.

González-Taboada, Iris; González-Fonteboa, Belén; Martínez-Abella, Fernando; Carro-López, Diego (2017): Self-compacting recycled concrete: Relationships between empirical and rheological parameters and proposal of a workability box. In: *Construction and Building Materials* 143, S. 537–546. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.156.

- Hapgood, Karen P.; Litster, James D.; Biggs, Simon R.; Howes, Tony (2002): Drop penetration into porous powder beds. In: *Journal of colloid and interface science* 253 (2), S. 353–366. DOI: 10.1006/jcis.2002.8527.
- Khayat, K. H.; Mikanovic, N. (2012): Viscosity-enhancing admixtures and the rheology of concrete. In: N. Roussel (Hg.): *Understanding the rheology of concrete*: Woodhead Publishing Materials, S. 209–228.
- Khayat, Kamal H. (1998): Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials — An overview. In: *Cement and Concrete Composites* 20 (2-3), S. 171–188.
- Kloft, H.; Krauss, H.-W.; Hack, N.; Herrmann, E.; Neudecker, S.; Varady, P.; Lowke, D. (2020): Shotcrete 3D Printing (SC3DP): A robot-guided technology for Additive Manufacturing of large-scale reinforced concrete components. In: *Cement and Concrete Research (special issue)* 134, Artikel 106078. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106078.
- Koehler, E. P.; Fowler, D. W. (2004): Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete. Research report ICAR-105-3F.
- Lachmayer, Lukas; Böhler, David; Freund, Niklas; Mai, Inka; Lowke, Dirk; Raatz, Annika (2023): Modelling the influence of material and process parameters on Shotcrete 3D Printed strands - cross-section adjustment for automatic robotic manufacturing. In: *Automation in Construction* 145, S. 104626. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104626.
- Larrard, F. de: *Concrete Mixture Proportioning. A scientific approach*. E&FN Spon: London.
- Li, H. Z.; Wang, J.; Fan, J. M. (2009): Analysis and modelling of particle velocities in micro-abrasive air jet. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49 (11), S. 850–858. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.05.012.
- Lootens, D.; Jousset, P.; Martinie, L.; Roussel, N.; Flatt, R. J. (2009): Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. In: *Cement and Concrete Research* 39 (5), S. 401–408. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.01.012.
- Lowke, D.; Dini, E.; Perrot, A.; Weger, D.; Gehlen, C.; Dillenburger, B. (2018): Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. In: *Cement and Concrete Research* 112, S. 50–65. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.018.
- Mai, Inka; Brohmann, Leon; Freund, Niklas; Gantner, Stefan; Kloft, Harald; Lowke, Dirk; Hack, Norman (2021): Large Particle 3D Concrete Printing-A Green and Viable Solution. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 14 (20). DOI: 10.3390/ma14206125.
- Mechaymech, A.; Assaad, J. J. (2019): Stability of Self-Consolidating Concrete Containing Different Viscosity Modifiers. In: *Civil Engineering Infrastructures Journal* 52 (2), S. 245–263.
- Oger, L.; Troadec, J. P.; Bideau, D.; Dodds, J. A.; Powell, M. J. (1986): Properties of disordered sphere packings I. Geometric structure: Statistical model, numerical simulations and experimental results. In: *Powder Technology* 46 (2-3), S. 121–131. DOI: 10.1016/0032-5910(86)80018-3.
- Palacios, M.; Flatt, R. J.: Working mechanism of viscosity-modifying admixtures, S. 415–432.
- Pierre, A.; Weger, D.; Perrot, A.; Lowke, D. (2018): Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing. Analytical and experimental study. In: *Materials and Structures* 51 (1), S. 1221. DOI: 10.1617/s11527-018-1148-5.
- Plank, J.: Technology Trends in the Chemistry of PCEs and Other Chemical Admixtures. In: ICSP proceedings, ICSP 2018, China.

- DIN EN 12390-3:2019, Oktober 2019: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.
- DIN EN 12390-5:2019, Oktober 2019: Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern.
- DIN EN 12350-5:2019, September 2019: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß.
- DIN EN 12350-6:2019, September 2019: Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte.
- DIN EN 933-1:2021, Juli 2021: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren.
- DIN EN 1097-6:2022, Mai 2022: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohddichte und der Wasseraufnahme.
- Rolland, Arnaud; Quiertant, Marc; Khadour, Aghiad; Chataigner, Sylvain; Benzarti, Karim; Argoul, Pierre (2018): Experimental investigations on the bond behavior between concrete and FRP reinforcing bars. In: *Construction and Building Materials* 173, S. 136–148. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.169.
- Roussel, N. (Hg.) (2012): *Understanding the rheology of concrete*: Woodhead Publishing Materials.
- Salvador, Renan P.; Cavalaro, Sergio H.P.; Cano, Miguel; Figueiredo, Antonio D. (2016): Influence of spraying on the early hydration of accelerated cement pastes. In: *Cement and Concrete Research* 88, S. 7–19. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.06.005.
- Schneider, Caroline A.; Rasband, Wayne S.; Eliceiri, Kevin W. (2012): NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. In: *Nature methods* 9 (7), S. 671–675. DOI: 10.1038/nmeth.2089.
- Schwanda, F. (1959): Der Hohlraumgehalt von Korngemischen. Ein Vergleich rechnerisch gewonnener Werte mit versuchsmäßig ermittelten. In: *Beton* 9, S. 427–431.
- Sonebi, Mohammed; Feys, Dimitri (2024): *Measuring Rheological Properties of Cement-based Materials*. Cham: Springer Nature Switzerland (39).
- Stieß, Matthias (2009): *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sympatec (2023): *Partikelformanalyse - Partikelform und Formparameter*. Online verfügbar unter URL <https://www.sympatec.com/de/partikelmesstechnik/>, zuletzt geprüft am 27.11.2023.
- Thorsten Wagner (2016): *ij-particlesizer: ParticleSizer 1.0.1*: Zenodo.
- Vantghem, Gieljan; Corte, Wouter de; Shakour, Emad; Amir, Oded (2020): 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. In: *Automation in Construction* 112, S. 103084. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103084.
- Wallevik, Olafur Haraldsson; Wallevik, Jon Elvar (2011): Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. In: *Cement and Concrete Research* 41 (12), S. 1279–1288. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.01.009.
- Weger, Daniel (2020): *Additive Fertigung von Betonstrukturen mit der Selective Paste Intrusion – SPI*. Dissertation. Technische Universität München, München. Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt.
- Weger, Daniel; Gehlen, Christoph (2021): Particle-Bed Binding by Selective Paste Intrusion-Strength and Durability of Printed Fine-Grain Concrete Members. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 14 (3). DOI: 10.3390/ma14030586.

Weger, Daniel; Pierre, Alexandre; Perrot, Arnaud; Kränkel, Thomas; Lowke, Dirk; Gehlen, Christoph (2021): Penetration of Cement Pastes into Particle-Beds: A Comparison of Penetration Models. In: *Materials* 14 (2), S. 389. DOI: 10.3390/ma14020389.

19 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Visualisierung des LP3DCP Verfahrens (Foto: ITE).....	9
Abbildung 2: Eindringprinzip in Abhängigkeit der Rheologie des Feinkornbetons in ein Partikelbett für sehr fließfähigen (links) Feinkornbeton, fließfähigen (Mitte) und zähen Feinkornbeton (rechts).....	10
Abbildung 3: Versuchseinrichtungen: (links) SAMMI (Credit: iBMB) und (rechts) DBFL.....	18
Abbildung 4: Feinkornbetonapplizierung auf ein Partikelbett mit dem Shotcrete-3D-Printing-Verfahren: Einflussnehmende Prozessparameter und resultierender Feinkornbeton auf und in dem Partikelbett nach der Applizierung.....	19
Abbildung 5: Schematische Darstellung der aufzubringende Betonmenge: 1. Layerbreite wL ergibt sich aus der Wahl der Material- und Prozessparameter. 2. Berechnung der Verfahrensgeschwindigkeit der Düse so, dass (a) vor dem Eindringprozess immer so viel Beton appliziert wird, dass (b) nach dem Eindringprozess die Hohlräume zwischen dem Partikelbett vollständig gefüllt sind.....	20
Abbildung 6: Herstellung der Probe der Untersuchungsreihe U2 (DBFL): (a) Bauboxen sowie mitwachsende Schalung (b) Aufbringen der Gesteinskornschicht (c) Applizierung des Feinkornbetons.....	21
Abbildung 7: Prinzip der Probenahme aus den Spritzstreifen der Untersuchungsreihe U1: für das Partikelbett A und B mit einer Layerhöhe von jeweils 3,2 cm, Gesamthöhe von 19,2 cm. Koordinatenrichtung u = Druckrichtung = Länge von 100 cm.....	24
Abbildung 8: Prinzip der Probenahme aus den Spritzstreifen der Untersuchungsreihe U2 für das Partikelbett C und D mit einer Layerhöhe von jeweils 3,2 und 6,4 cm, Gesamthöhe von 16,0 und 19,2 cm. Koordinatenrichtung u = Druckrichtung = Länge von 100 cm.....	24
Abbildung 9: Prinzip der Probenahme aus den Spritzstreifen der Untersuchungsreihe U3 für das Partikelbett E, F und G mit einer Layerhöhe von jeweils 3,2 cm, Gesamthöhe von 19,2 cm. Koordinatenrichtung u = Druckrichtung = Länge von 100 cm.....	26
Abbildung 10: Biegebalken: a) Prinzip der Probenahme aus den Spritzstreifen sowie (b) Setup zur Vierpunktbiegeprüfung der Biegebalken (gültig sowohl für konventionell (REF) wie auch mittels des SC3DP-Verfahrens hergestellte Biegebalken). Koordinatenrichtung u = Druckrichtung.	27
Abbildung 11: Verteilungstool.....	28
Abbildung 12: Beschickungskorb am Portal 1.....	29
Abbildung 13: Anstiegswinkel der linearen Proben; in rot markiert angenommene Layer und die daraus resultierende Auflösung.....	31
Abbildung 14: Verlauf Bogenmotiv; in rot markiert angenommene Layer und die daraus resultierende Auflösung.....	31
Abbildung 15: Charakterisierung der Kornform mittels ImageJ (Schneider et al. 2012).....	32
Abbildung 16: Scherprotokoll des Rheometers am Beispiel der Probe ST0.0_SP0.4 (Scherspannung in Schwarz; Drehzahl in Blau).....	35
Abbildung 17: ICAR Plus Rheometer: (a) Rheometertopf, (b) 4-Flügel-Vane-Paddel, (c) Scherprofil.....	35
Abbildung 18: Würfeldruckfestigkeit: (a) Prüfung rechtwinklig (r) sowie parallel (p) zur Layerausrichtung. Die Koordinatenachse u beschreibt die Druckrichtung.....	37

Abbildung 19: Ermittlung der Bereiche mit und ohne Verbund: (a) Querschnittsansicht der unbearbeiteten Probe, (b) Querschnittsansicht nach Markierung der Fehlstelle und (c) nach Binarisierung und Ermittlung der Flächenanteile „Verbund“ sowie „kein Verbund“ mittels ImageJ.....	39
Abbildung 20: Ermittlung aus einer (a) Ursprungsdatei mittels eines Matlab-Tools die (b) Spritzlayerbreite w_L	39
Abbildung 21: Ermittlung des aufliegenden Feinkornbetons a_F auf der obersten Partikelbettoberkante	40
Abbildung 22: (a) Foto-Setup zur Aufnahme der mittig in Längsrichtung durchgesägten Probe und (b) Auswertungsvarianten zur Ermittlung der Betonhöhen $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$ (rot markierte Flächen): oben - in der Mitte durchgesägte Probe (Schnittkante blau markiert); V1: Auswertung der Eindringtiefe im Bereich der Schnittkante; V2: Auswertung der Eindringtiefe im Bereich, in dem der Feinkornbeton frei ausfließen kann; V3: Auswertung der Eindringtiefe im Gesamtbereich (inkl. überstehende Gesteinskörnung).....	41
Abbildung 23: links: Aufgenommenes Bild zur grafischen Auswertung der Eindringtiefe; rechts: Mittels Matlab ausgewertete Betonhöhe $h_{F,1}$	41
Abbildung 24: Rheologische Kennwerte des Feinkornbetons (F0) für die (a) Fließgrenze und (b) plastische Viskosität des Feinkornbetons unter Variierung der Stabilisierer (ST: 0; 0,05; 0,1 M.-% v. G.)- sowie Fließmitteldosierung (FM: 0,4; 0,5 M.-% v. Z.)	42
Abbildung 25: Layerbreite der LP3DCP-Streifen w_L , LP3DCP für (a) das Partikelbett Rez16-32 und (b) das Partikelbett Rez4-32 unter Variierung der Stabilisierer (ST)- sowie Fließmitteldosierung (FM).....	43
Abbildung 26: Layerbreite der LP3DCP-Streifen w_L , LP3DCP in Abhängigkeit der Fließgrenze τ_0 für die beiden Partikelbetten Rez16-32 und Rez7-32	43
Abbildung 27: LP3DCP-Bohrkerne über 5 Schichten aus dem Partikelbett (a) Rez16-32 und (b) Rez4-32 B unter Variierung der Stabilisierer (St)- sowie Fließmitteldosierung (FM).	44
Abbildung 28: Beispiel einer μ CT-Untersuchung der Zwischenschichten für die beiden Partikelbetten (a) Rez16-32 und (b) Rez4-32 für eine Stabilisiererdosierung (ST) von 0,0 % (oben) und 0,1 % (unten) und einer Fließmitteldosierung (FM) von 0,5 %.....	44
Abbildung 29: Porosität ε_{LP3DCP} basierend auf den μ CT-Untersuchungen der Bohrkerne aus den LP3DCP-Proben für das Partikelbett (a) Rez16-32 und (b) Rez4-32.....	45
Abbildung 30: Druckfestigkeit f_{cm} der LP3DCP-Proben für Partikelbett (a) Rez16-32 und (b) Rez4-32, Fließmitteldosierung von 0,4 % (links) und 0,5 % (rechts), Belastung rechtwinklig zum Schichtverlauf (dunkelgrau), parallel zum Schichtverlauf (hellgrau) und für konventionell hergestellten Beton ohne Gesteinskörnung (gestrichelte Linie).....	46
Abbildung 31: Schichtorientierung in den Druckfestigkeitsproben (Partikelbett Rez16-32, ST0,1_FM0,5) für (a) Belastung rechtwinklig zum Schichtverlauf und b) Belastung parallel zum Schichtverlauf - poröse Bereiche zwischen den Schichten sind rot markiert.....	47
Abbildung 32: Darstellung der Partikelbetten als (a) Draufsicht und (b) Seitenansicht für die Partikelbetten Bas16-32 (links) und Bas32-64 (rechts)	49
Abbildung 33: Prüfung der gleichbleibenden rheologischen Kennwerte der Feinkornbetone über die Zeit mittels des Ausbreitmaßes. Feinkornbeton F0 (grau Linie) mit einem Kalksteinmehlanteil von 36l und Feinkornbeton F1 (schwarze Linie) mit einem Kalksteinmehlanteil (KSM) von 36l je m^3 Feinkornbeton. Herstellung erfolgt mit dem Stabilisierertyp 1(1.ST) und unter konstanter Fließmittel (FM)- und Stabilisiererdosierung (ST) von 0,4 M.-% sowie 0,1 M.-%.	49

- Abbildung 34: Seitenansicht der Würfelproben für die beiden Partikelbetten (a) Bas16-32 und (b) Bas32-64 in Abhängigkeit des Betonvolumenstroms (con0,6; con1,3) sowie Luftvolumenstroms (air30; air40).
..... 50
- Abbildung 35: Würfeldruckfestigkeit der LP3DCP- und konventionell hergestellten REF-Proben für die beiden Partikelbetten (a) Bas16-32 und (b) Bas32-64 in Abhängigkeit des Betonvolumenstroms con0,6 (links) und 1,3 (rechts) sowie des Luftvolumenstroms (air30; air40), Belastung rechtwinklig zum LP3DCP-Schichtverlauf (dunkelgrau), parallel zum LP3DCP-Schichtverlauf (hellgrau), für konventionell hergestellten REF-Beton ohne Gesteinskörnung (gestrichelte schwarze Linie) und für konventionell hergestellte REF-Beton mit Gesteinskörnung (GK) (durchgezogene schwarze Linie) 51
- Abbildung 36: Isotropie der LP3DCP-Proben für die beiden Partikelbetten (a) Bas16-32 und (b) Bas32-64 in Abhängigkeit des Betonvolumenstroms con0,6 (links) und con1,3 (rechts) sowie des Luftvolumenstroms (air30; air40). 52
- Abbildung 37: Sieblinien der zwei Kalkstein-Partikelbetten KS8-32 und KS16-32 sowie des Rezyklat-Partikelbettes Rez16-32 54
- Abbildung 38: Darstellung der Partikelbetten als (a) Draufsicht und (b) Seitenansicht für die Partikelbetten KS8-32 (links), KS16-32 (mitte) und Rez16-32 (rechts) 55
- Abbildung 39: Schematische Darstellung der Oberflächenrauigkeit für die drei Partikelbetten KS8-32 (links), KS16-32 (mitte) und Rez16-32 (rechts) 56
- Abbildung 40: Porosität je Layer für die Partikelbetten KS8-32 (schwarzer Kreis und schwarz gestrichelte Linie), KS16-32 (grauer Diamant und graue Punkt-Strichellinie) und Rez16-32 (graues Rechteck und schwarz Linie). Layer 1 = erster, unterster aufgebraute Layer und Layer 6 = oberster, letzter aufgebraute Layer 56
- Abbildung 41: Prüfung der gleichbleibenden rheologischen Kennwerte der Feinkornbetone über die Zeit mittels des Ausbreitmaßes. Feinkornbeton F1 (grau Linie – aus Untersuchungsreihe U2) mit dem Stabilisierertyp 1(1.ST). Weiterentwicklung der Feinkornbetonrezeptur mit Stabilisierertyp 2 (2.ST) unter konstanter Fließmittel (FM)- und Stabilisiererdosierung (ST) von 0,3 M.-% sowie 0,1 M.-%. Variation der rheologischen Eigenschaften durch Anpassung des Wasser/Feinstoffwerts (wf) (schwarze Linien). Definition der Feinkornbetone F2 und F3 (rot Linie – nur systematisch dargestellt) sowie F4 (schwarze Linie) 57
- Abbildung 42: Rheologische Charakterisierung der Feinkornbetone F1 – F4 mittels dem ICAR Plus Rheometer – Entnahme direkt aus dem Mischer: (a) Fließkurven und (b) Fließgrenze τ_0 und (c) Viskosität μ in Abhängigkeit eines variierenden Wasser-Feinstoffwerts (wf) sowie konstanter Fließmittel- & Stabilisiererdosierung. Der F2 erweist sich als nicht pumpbar. 58
- Abbildung 43: Charakterisierung der Penetrometer-Fließgrenze $\tau_{0,pen}$ des Feinkornbetons F4 in Abhängigkeit der Zeit nach Applizierung des Feinkornbetons auf dem Partikelbett für variierenden Luft (air)- und Betonvolumenstrom (con) für (links) den gesamten Auswertungszeitraum und (rechts) die ersten 20 Minuten. 58
- Abbildung 44: (a) Initiale 10 min-Penetrometer-Fließgrenze $\tau_{0,pen,it,10min}$ und (b) Geschwindigkeit des Strukturaufbaus $ast,10min$ innerhalb der ersten 10 min in Abhängigkeit des Luft- und Betonvolumenstroms (con) für den Feinkornbeton F4 59
- Abbildung 45: Ausbreitmaß ABM_{SC3DP} in Abhängigkeit der Feinkornbetone F3 und F4 sowie für F4 unter variierendem Luftvolumenstrom (air). Ermittelt nach ca. 5 Minuten nach Verlassen der SC3DP-Düse... 60
- Abbildung 46: Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit (berechnet nach GL 3): (a) In Abhängigkeit des Betonvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), der drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie

unter Variation des Luftvolumenstroms (air30 (durchgezogene Linien) und air50 (gestrichelte Linien). (b) In Abhängigkeit der Porosität ϵ des Partikelbetts für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32; KS16-32 & Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene Linien); con1,0 (gestrichelte Linien)) 61

Abbildung 47: Applizierte Spritzlayerbreite wL auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant)) für einen Luft- (air30) und Betonvolumenstrom (con0,8)..... 62

Abbildung 48: Applizierung des Feinkornbetons auf das Partikelbett: (a) Laterale Verschiebung eines fließfähigen Feinkornbetons auf der Partikelbettoberfläche über den Spritzkonus hinaus; gemessene Spritzlayerbreite wL und effektive, tatsächlich vorliegende Spritzlayerbreite wL,eff ; (b) Form des aufgetragenen Feinkornbetons: (oben) zäher Feinkornbeton F3 mit kastenförmige Ausprägung und (unten) fließfähiger Feinkornbeton F4 mit runder Ausprägung aufgrund lateraler Verschiebung. 62

Abbildung 49: Applizierte Spritzlayerbreite wL auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche $ASpez$ und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32; KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))..... 63

Abbildung 50: Applizierte Spritzlayerbreite wL auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32; KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))..... 64

Abbildung 51: Applizierte Spritzlayerbreite wL auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Vierteck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene Linie) und con1,0 (gestrichelte Linie)). Anmerkung: F4_KS8-32_con1,0 und F4_KS16-32_con1,0 liegen genau hintereinander..... 65

Abbildung 52: Applizierte Spritzlayerbreite wL auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30..... 66

Abbildung 53: Schematische Darstellung des Eindringverhaltens bei mehreren Schichten mit einer in dieser Untersuchungsreihe üblichen Schichthöhe von 32 mm: Der auf der Partikeloberfläche aufstehende Feinkornbeton a_F , die Eindringtiefen e_1 und e_2 des Feinkornbetons in das Partikelbett, die Gesamtbetonhöhe $h_{F,1}$ und $h_{F,2}$, der in den Partikelbetthohlräumen aufstehende Feinkornbeton $a_{F,P}$ sowie die ungebundene Schicht h_U 67

Abbildung 54: (a) Aufstehende Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche und (b) Eindringtiefe e_2 des Feinkornbetons in das Partikelbett in Abhängigkeit der Spritzlayerbreite wL sowie (c) aufstehende Feinkornbeton a_F in Abhängigkeit der Eindringtiefe e_2 für das Partikelbett KS16-32, die Feinkornbetone F3 und F4, sowie unter Variation des Luft (air30; air50)- und Betonvolumenstroms (con0,8; con1,0)..... 68

Abbildung 55: (a) Gesamtbetonhöhe $h_{F,1}$ unter Berücksichtigung der Gesteinskörnung (daher Eindringtiefe e_1) sowie (b) Gesamtbetonhöhe $h_{F,2}$ ohne Berücksichtigung der Gesteinskörnung (daher

- Eindringtiefe e_2) in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms ($con0,8$ (durchgezogene Linie) und $con1,0$ (gestrichelte Linie))..... 69
- Abbildung 56: Kompaktheit K des applizierten Feinkornbetons: (a) schematische Darstellung für einen zähen, kompakt applizierten (oben) und eins fließfähigen, weniger kompakt applizierten Feinkornbeton und (b) am Beispiel von echten Proben. Kompaktheit K : beschreibt die im Querschnitt gemessene Feinkornbetonfläche (ermittelt über Spritzlayerbreite wL , aufstehende Feinkornbeton a_F , Eindringtiefe e_2 und Porosität ϵ) im Vergleich zur tatsächlich aufgetragenen Feinkornbetonfläche (berechnet durch Düsen-Verfahrgeschwindigkeit v_N und Betonvolumenstrom V_{con}) 71
- Abbildung 57: Kompaktheit K des applizierten Feinkornbetons in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms ($con0,8$ (durchgezogene Linie) und $con1,0$ (gestrichelte Linie)). kompakt, $K = 1$ und wenig kompakt, $K \geq 1$ 72
- Abbildung 58: Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie das Kalkstein-Partikelbetten KS16-32 für einen Betonvolumenstrom von $con0,8$ und Luftvolumenstrom von $air30$ 72
- Abbildung 59: Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche AS_{pez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms ($air30$ (Diamant); $air50$ (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms ($con0,8$ (schwarze durchgezogene Linien); $con1,0$ (graue gestrichelte Linien))..... 73
- Abbildung 60: Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms ($air30$ (Diamant); $air50$ (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms ($con0,8$ (schwarze durchgezogene Linien); $con1,0$ (graue gestrichelte Linien))..... 73
- Abbildung 61: Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms ($con0,8$ (durchgezogene Linie) und $con1,0$ (gestrichelte Linie))..... 74
- Abbildung 62: Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom $con1,0$ und Luftvolumenstrom $air30$ 75
- Abbildung 63: Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie das Kalkstein-Partikelbetten KS16-32 für einen Betonvolumenstrom von $con0,8$ und Luftvolumenstrom von $air30$ 76
- Abbildung 64: Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche AS_{pez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der

- Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).... 77
- Abbildung 65: Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))..... 77
- Abbildung 66: Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die zwei Partikelbetten (Kalkstein: KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie))..... 78
- Abbildung 67: Eindringtiefe e_2 in das Partikelbett in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30. 79
- Abbildung 68: Ansicht eines realen LP3DCP-Querschnitts für den (a) schlechtesten erzielten Verbund (F3; KS8-32; con0,8; air30) und für den (b) besten erzielten Verbund (F4; Rez16-32; con0,8; air30)..... 79
- Abbildung 69: Übersicht über die gebundenen und ungebundenen Partikelbettbereiche über die mittleren 4 Layer (Layerhöhe $^{\circ}$ = $^{\circ}$ 32 $^{\circ}$ mm; Layer 2 bis Layer 5) in Abhängigkeit der drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) der beiden Feinkornbetone F3 und F4 sowie in Abhängigkeit der Prozessparameter (Luftvolumenstrom (air30; air50) und Betonvolumenstroms (con0,8; con1,0)) 80
- Abbildung 70: Querschnittsbezogener Verbund QV in Abhängigkeit der (a) Kompaktheit K , des (b) aufstehenden Feinkornbetons a_F auf der Partikelbettoberfläche und der (c) Eindringtiefe e_2 des Feinkornbetons in das Partikelbett für die beiden Partikelbetten KS16-32 und Rez16-32 (KS8-32 nicht darstellbar, da alle drei Parameter (a) bis (c) nicht berechenbar). In Abbildung nicht angegeben aber in den Werten enthalten: Variation zwischen den Feinkornbetonen F3 und F4 sowie Variation des Luft- (air30; air50) und Betonvolumenstroms (con0,8; con1,0)..... 81
- Abbildung 71: Querschnittsbezogener Verbund QV in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie die beiden Kalkstein-Partikelbetten (KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant)) für einen Betonvolumenstrom con0,8 und Luftvolumenstrom air30..... 82
- Abbildung 72: Verteilung des Feinkornbetons auf Partikeloberfläche (Spritzlayerbreite w_L) und innerhalb des Partikelbetts (Spritzlayerbreite w_L, i) für den (links) fließfähigen Feinkornbeton F4 und den (rechts) zäheren Feinkornbeton F3..... 82
- Abbildung 73: Querschnittsbezogener Verbund QV in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche AS_{pez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))..... 83
- Abbildung 74: Querschnittsbezogener Verbund QV in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der

kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).....	83
Abbildung 75: Querschnittsbezogener Verbund QV in das Partikelbett in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)).	84
Abbildung 76: Querschnittsbezogener Verbund QV in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30.	85
Abbildung 77: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit der (a) Kompaktheit K , des (b) aufstehenden Feinkornbetons a_F auf der Partikelbettoberfläche, der (c) Eindringtiefe e_2 des Feinkornbetons in das Partikelbett sowie des (d) querschnittsbezogenen Verbunds QV für die drei Partikelbetten (KS8-32, KS16-32 & Rez16-32). (KS8-32 nicht darstellbar, da die Parameter in (a) bis (c) nicht berechenbar sind. In Abbildung nicht angegeben aber in den Werten enthalten: Variation zwischen den Feinkornbetonen F3 und F4 sowie Variation des Luft- (air30; air50) und Betonvolumenstroms (con0,8; con1,0). Regressionslinien jeweils über alle drei Partikelbetten.....	86
Abbildung 78: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie die beiden Kalkstein-Partikelbetten (KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant)) für einen Betonvolumenstrom von con0,8 und Luftvolumenstrom von air30.	86
Abbildung 79: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und (d) des äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).	87
Abbildung 80: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien))......	87
Abbildung 81: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie))......	88
Abbildung 82: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30.	89
Abbildung 83: Konventionell hergestellte Referenz-Würfeldruckfestigkeit für (a) Proben, bestehend nur aus Feinkornbetonen für die beiden Feinkornbetonvarianten (F3; F4) sowie (b) Proben, bestehend aus Feinkornbeton und Partikelbett für die beiden Feinkornbetonvarianten (F3; F4) sowie den drei Partikelbetten (KS8-32; KS16-32; Rez16-32).....	90

- Abbildung 84: (a) LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit parallel zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des aufstehenden Feinkornbeton a_f für das Partikelbett KS16-32 sowie LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des (b) querschnittsbezogenen Verbunds QV sowie (c) Betondichte ρ_B für die beiden Partikelbetten KS8-32 und KS16-32. 91
- Abbildung 85: Modell zur Ableitung von Kräften in einem LP3DCP-Gefüge: (a) Entnahme der Würfeldruckfestigkeitsproben aus dem LP3DCP-Querschnitt, (b) Würfeldruckprüfung parallel zur Layerausrichtung und (b) Würfeldruckprüfung rechtwinklig zur Layerausrichtung. 92
- Abbildung 86: Ausschöpfung A_p parallel (durchgezogene Linie) und rechtwinklig (gestrichelte Linie) zur Layerausrichtung in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie die beiden Kalkstein-Partikelbetten (KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant)) für einen Betonvolumenstrom von con0,8 und Luftvolumenstrom von air30. 93
- Abbildung 87: Ausschöpfung A_p parallel zur Layerausrichtung in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)). Ausschöpfung A_r rechtwinklig zur Layerausrichtung kann dem Anhang Abbildung 121 entnommen werden. 94
- Abbildung 88: Ausschöpfung A_p rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)). Ausschöpfung A_r rechtwinklig zur Layerausrichtung kann dem Anhang Abbildung 121 und Abbildung 122 entnommen werden. 94
- Abbildung 89: LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit (a) parallel und (b) rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)). 95
- Abbildung 90: Schematische Darstellung der (a) Bereiche mit einer erhöhten Verdichtung des Feinkornbetons in Abhängigkeit der Prozessparameter bei plattiger, wenig runder Partikelform und (b) Richtung der kinetischen Energie nach Auftreffen auf unterschiedlichen Partikelformen. 96
- Abbildung 91: LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit parallel (schwarz) und rechtwinklig (grau) zur Layerausrichtung in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30. 97
- Abbildung 92: Isotropie I in Abhängigkeit (a) der Fließgrenze τ_0 und (b) der Viskosität μ für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (schwarz) sowie die beiden Kalkstein-Partikelbetten (KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant)) für einen Betonvolumenstrom von con0,8 und Luftvolumenstrom von air30. 98
- Abbildung 93: Isotropie I in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch

Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).	99
Abbildung 94: Isotropie I in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien)).	99
Abbildung 95: Isotropie I in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis), KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Vierteck)) unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)).	100
Abbildung 96: Isotropie I in Abhängigkeit des Partikelbettzustands (nicht angefeuchtet (normal) und angefeuchtet (feucht)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air30.	101
Abbildung 97: Applizierte Spritzlayerbreite wL auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air50.	104
Abbildung 98: (a) Aufstehender Feinkornbeton a_F auf der Partikelbettoberfläche und (b) Eindringtiefe e_2 in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air50.	105
Abbildung 99: Verteilung der Gesteinskörnung über Spritzlayerbreite wL bei einer Probe mit erhöhter applizierter Feinkornbetonmenge: Anreicherung der Gesteinskörnung in der Mitte und zunehmende Anreicherung von Zementleim in Richtung des Randes.	106
Abbildung 100: (a) Querschnittsbezogener Verbund QV und (b) gebundene und ungebundene Partikelbettbereiche über die mittleren 4 Layer (Layerhöhe $= 32 \text{ mm}$; Layer 2 bis Layer 5) in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) für das Partikelbett KS16-32 und einem Betonvolumenstrom con1,0 sowie Luftvolumenstrom air50.	106
Abbildung 101: Betondichte ρ_B in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air50.	107
Abbildung 102: (a) LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit (parallel und rechtwinklig zur Layerausrichtung) und (b) Isotropie I in Abhängigkeit der applizierten Betonmenge (normal (berechnet nach GL 3) und erhöht (berechnet nach GL 3 x 70 %)) für das Partikelbett KS16-32 für einen Betonvolumenstrom con1,0 und Luftvolumenstrom air50.	107
Abbildung 103: Biegezugfestigkeit f_{ct}, f_l unbewehrter Biegebalken für konventionell (REF – schwarz) sowie mittels des LP3DCP-Verfahrens hergestellten (dunkelgrau) Proben und für die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32). Angabe des Ausnutzungsgrad A, Verhältnis der LP3DCP- zur konventionell hergestellten REF-Biegezugfestigkeit. LP3DCP-Proben hergestellt unter konstanten Prozessparametern (Betonvolumenstrom con0,8 und Luftvolumenstrom air30).	110
Abbildung 104: REF-Biegezugfestigkeit konventionell hergestellter Proben ohne (links) sowie mit Stahl- (mitte) und Carbonfaserbewehrung CFK (rechts) für die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32).	111

Abbildung 105: Qualitative Beurteilung des Ankopplungsgrads der Bewehrungseinbindung (Stahl (S)- und Carbonfaserbewehrung (CFK)) in den LP3DCP-Beton in Abhängigkeit der Einbaureihenfolge PBF (Partikel – Bewehrung – Feinkornbeton) oder PFB (Partikel – Feinkornbeton – Bewehrung). Alle Proben mit dem Kalkstein-Partikelbett KS16-32, dem Feinkornbeton F4 sowie unter konstanten Prozessparametern (Betonvolumenstrom $con_{0,8}$ und Luftvolumenstrom air_{30}) hergestellt.	112
Abbildung 106: Einbindung der (a) Stahl- und (b) Carbonfaserbewehrung in den LP3DCP-Beton in Abhängigkeit der Einbaureihenfolge PBF (links: Partikel – Bewehrung – Feinkornbeton) oder PFB (rechts: Partikel – Feinkornbeton – Bewehrung). Alle Proben mit dem Kalkstein-Partikelbett KS16-32, dem Feinkornbeton F4 sowie unter konstanten Prozessparametern (Betonvolumenstrom $con_{0,8}$ und Luftvolumenstrom air_{30}) hergestellt. Gesamtansicht (1 – 4) und vergrößerte Ansicht der Bewehrung (1.1; 1.2; 2.1; 2.2; 3.1; 3.2; 4.1; 4.2).....	112
Abbildung 107: Biegezugfestigkeit unbewehrter und bewehrter (Stahl- oder Carbonfaser (CFK)) Biegebalken für konventionell (REF – schwarz) sowie mittels des LP3DCP-Verfahrens hergestellte (dunkelgrau) Proben für das Kalkstein-Partikelbett KS16-32. Zusätzlich bei den LP3DCP-Proben - Unterscheidung der Einbaureihenfolge: (PBF) Partikel – Bewehrung – Feinkornbeton (durchgezogene schwarze Umrandungslinie) oder (PFB) Partikel – Feinkornbeton – Bewehrung (gestrichelte schwarze Umrandungslinie). LP3DCP-Proben hergestellt unter konstanten Prozessparametern (Betonvolumenstrom $con_{0,8}$ und Luftvolumenstrom air_{30}).	113
Abbildung 108: Verlauf der Biegerisse über Biegebalken für eine (a) REF- und (b) LP3DCP-Probe. Verlauf der Risse rot markiert.	114
Abbildung 109: Verteilungstool am Portal 1 – DBFL	116
Abbildung 110: Verteilung der Partikel innerhalb der Schalung mit Verteilungstool am Portal 1; in rot markiert, die jeweiligen Leerstellen ohne abgelegte Partikel.....	118
Abbildung 111: Beschickungskorb am Portal 1 des DBFL.....	118
Abbildung 112: Verteilungsbild der Partikel	120
Abbildung 113: Design Demonstrator LP3DCP - Seminar	122
Abbildung 114: Aufteilung der 3D-Körper in Pfade.....	122
Abbildung 115: Links - Schalung mit beschichteten Schalungssteinen; rechts Anschlüsse für Leerrohre in Schalung	123
Abbildung 116: VR Integration während des LP3DCP Drucks	124
Abbildung 117: Schrittweise Oberflächenbearbeitung durch Fräsen; 1-3 Anschlussfläche eines Moduls; 4-9 Schrittweiser Abtrag einer Fläche.....	125
Abbildung 118: Stadtmöbel - Demonstrator des LP3DCP	126
Abbildung 119: Linearer Anstieg der geschnittenen Proben; in rot markiert die zuvor angenommene Form.....	127
Abbildung 120: Gedrucktes Bogenmotiv; in rot markiert die zuvor angenommene Form.....	128
Abbildung 121: Charakterisierung der Penetrometer-Fließgrenze in Abhängigkeit der Feinkornbetone F3 & F4 für den gesamten Auswertungszeitraum (links) und für die ersten 20 Minuten (rechts) bei gleichen Prozessparametern ($V_{con} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$; $V_{air} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$).....	155
Abbildung 122: LP3DCP-Probenbreite in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32	

(Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)).156

Abbildung 123: LP3DCP-Probenbreite in Abhängigkeit des (links) Partikelbettzustands (PB nicht angefeuchtet und angefeuchtet) oder der (rechts) Düsen-Verfahrgeschwindigkeit (normal nach GL 3 berechnet und eine nach GL 3 berechnete, aber auf 70 % reduzierte Düsen-Verfahrgeschwindigkeit) für das Partikelbett KS16-32.....156

Abbildung 124: Ausschöpfung A_r rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und (d) dem äquivalenter Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).....157

Abbildung 125: Ausschöpfung A_r rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).....157

20 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Eigenschaften der Partikelbetten (PB) A bis G. n.b. = nicht bestimmt	15
Tabelle 2	Zusammensetzung der Feinkornbetone (F) F0 – F4	16
Tabelle 3	Kennwerte der Stahlbewehrung (S) und der Carbonfaserbewehrung (CFK) – eingesetzt in der Untersuchungsreihe 5.	17
Tabelle 4	Übersicht der wichtigsten Variation der Prozess- & Materialparameter (Feinkornbeton (FKB), Partikelbett (PB)) in Abhängigkeit der Untersuchungsreihen 1 – 5 (maßgebliche Variationen in der Untersuchungsreihe ist fettgedruckt)	22
Tabelle 5	Übersicht der durchgeführten Untersuchungen in den Untersuchungsreihen 1 – 5	23
Tabelle 6	Kennwerte der Basalt-Partikelbetten Bas16-32 und Bas32-64: mittlere längste Partikellänge L, Packungsdichte φ_s , Porosität ϵ , Sphärizität S und Formbeiwert ψ_c	48
Tabelle 7	Kennwerte der Kalkstein-Partikelbetten KS8-32 und KS16-32 sowie dem Rezyklat-Partikelbett Rez16-32: mittlere Korndurchmesser d_{50} , mittlere längste Partikellänge L, Sphärizität S, Formbeiwert ψ_c , Packungsdichte φ_s , Porosität ϵ , spezifische Partikeloberfläche und äquivalenter Porenradius R_{pore}	55
Tabelle 8	Ungebundene Schicht h_{U1} und h_{U2} in Abhängigkeit der drei Partikelbetten (KS8-32; KS16-32 und Rez16-32) für die beiden Feinkornbetone (F3; F4) sowie unter Variation der Prozessparameter (Betonvolumenstrom: con0,8; con1,0 sowie Luftvolumenstrom: air30; air50). Rot markiert: Wenn die ungebundene Schicht größer als die minimale Korngröße d_{min} des Partikelbetts ist. Die Betrachtung h_{U2} beschreibt dabei die strengste Betrachtung, daher der Feinkornbeton würde sich bei Aufbringung einer neuen Partikelbettschicht nur seitlich ausbreiten und die Gesteinskörnung führt nicht zu einem Überbrückungseffekt.	70
Tabelle 9	Übersicht der LP3DCP- sowie konventionell hergestellten Referenz-Würfeldruckfestigkeit sowie der Standardabweichung in Abhängigkeit der Materialparameter (Feinkornbeton (F3; F4); Partikelbett (KS8-32; KS16-32; Rez16-32)) und Prozessparameter (Betonvolumenstrom (con0,8; con1,0); Luftvolumenstrom (air30; air50). LP3DCP-Würfeldruckfestigkeit parallel und rechtwinklig zur Layerausrichtung. Konventionell hergestellten Würfeldruckfestigkeit: „nur F“ = Würfeldruckfestigkeit nur an Feinkornbeton getestet sowie Würfeldruckfestigkeit an Proben bestehend aus Feinkornbeton und Gesteinskörnung (KS8-32; KS16-32; Rez16-32).	89
Tabelle 10:	Versuchsreihe 1: Abstandswerte des Tools zum Partikelbett in D1, sowie Verfahrensgeschwindigkeit in V1	117
Tabelle 11:	Versuchsreihe 2: Abstandswerte des Tools zum Partikelbett in D ₁ , sowie Verfahrensgeschwindigkeit in V ₁	119

21 Anlagen

Anlagen zur Untersuchungsreihe U3:

Penetrometer-Fließgrenzen F3 und F4

In Abbildung 121 ist die Entwicklung der Penetrometer-Fließgrenzen in Abhängigkeit der Zeit für die beiden Feinkornbetonvarianten F3 (zäher) und F4 (fließfähiger) gezeigt. Die für das Eindringverhalten relevante initiale-0 min-Fließgrenze liegt für beide Feinkornbetonen bei 0 KPa sowie während des Einbaus relevante initiale-10 min-Fließgrenze bei 0,0 (F3) und 1,3 KPa (F4). Bei Entnahme des Feinkornbetons direkt aus dem Mischer und Charakterisierung der Fließgrenze mit dem ICAR Plus Rheometer erzielt der F3 noch eine fast 3-mal höhere Fließgrenze. Somit scheint die Applizierung des Feinkornbetons mit dem SC3DP-Verfahren durch Einfluss aus dem Pumpprozess und dem Aufreißen des Betons mittels Luftdrucks effektiv den Unterschied in der Fließgrenze zu reduzieren.

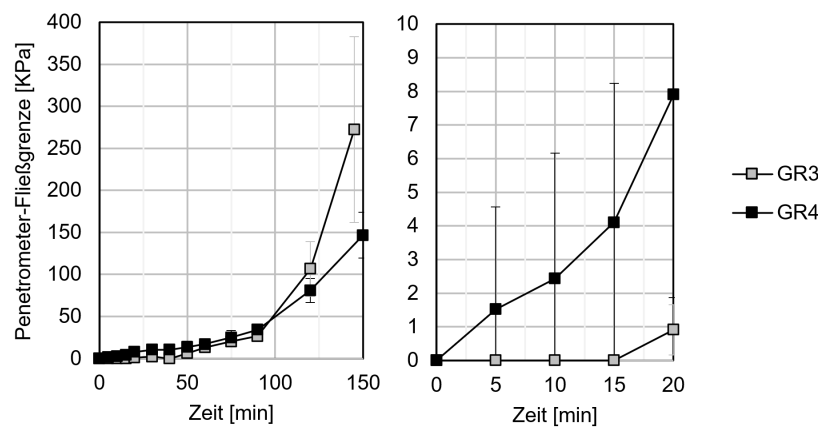


Abbildung 121: Charakterisierung der Penetrometer-Fließgrenze in Abhängigkeit der Feinkornbetone F3 & F4 für den gesamten Auswertungszeitraum (links) und für die ersten 20 Minuten (rechts) bei gleichen Prozessparametern ($\dot{V}_{con} = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$; $\dot{V}_{air} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$)

Einfluss der Prozessparameter auf die LP3DCP-Geometrie:

In Abbildung 122 sind die LP3DCP-Probenbreiten in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms ($con_{0,8}$ (durchgezogene dunkle Linie) und $con_{1,0}$ (gestrichelte helle Linie)) gezeigt. Die LP3DCP-Probenbreiten liegt im Allgemeinen über den Werten der applizierten Spritzlayerbreiten (vgl. Abbildung 51), da hierbei auch die ungebundene aber anhaftende Gesteinskörnung mitberücksichtigt ist (vgl. Abbildung 20). Grundsätzlich lassen sich die gleichen Trends wie für die applizierten Spritzlayerbreite erkennen. Die Ergebnisse werden aber noch zusätzlich durch die Kornform der herausragenden Partikel, daher der länglich Partikelform, verschmiert. Die Proben, welche eine LP3DCP-Probenbreite im Bereich von 170 bis 180 mm aufweisen, sollten zudem nicht weiterführend interpretiert werden. Hier hat der Feinkornbeton zwar nicht die Schalungsbreite von 20 cm (vgl. Abbildung 6) erreicht, dennoch die Gesteinskörnung bis zum Schalungsrand gebunden. Der Unterschied zwischen Schalungsbreite und der LP3DCP-Probenbreite kann mit den einzeln herausragenden Partikeln erklärt werden.

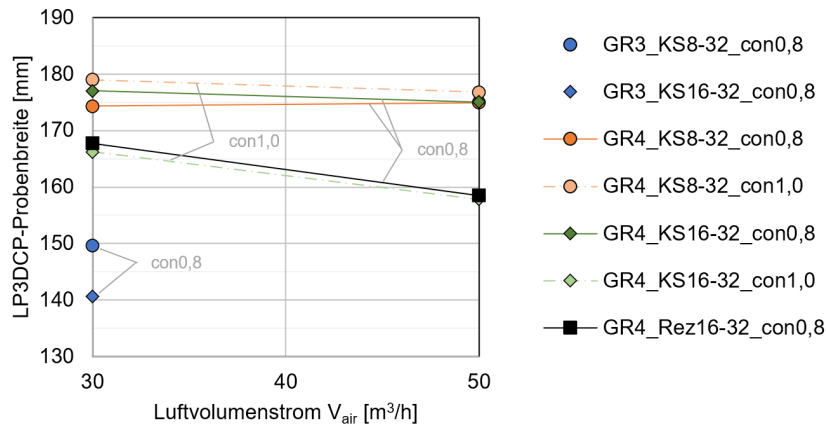


Abbildung 122: LP3DCP-Probenbreite in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms für die beiden Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (orange, grün, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32 (Kreis); KS16-32 (Diamant) sowie Rezyklat: Rez16-32 (Viereck)) sowie unter Variation des Betonvolumenstroms (con0,8 (durchgezogene dunkle Linie) und con1,0 (gestrichelte helle Linie)).

In Abbildung 123 ist die LP3DCP-Probenbreite auf der Partikelbettoberfläche in Abhängigkeit des (links) Partikelbettzustands (PB nicht angefeuchtet und angefeuchtet) oder der (rechts) Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit (normal nach GL 3 berechnet und eine nach GL 3 berechnete, aber auf 70 % reduzierte Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit) gezeigt. Ein Anfeuchten des Partikelbetts führt hiernach zu keiner Veränderung Spritzlayerbreite (Abbildung 52 (links)). Das Anfeuchten des Partikelbetts führt zu einer Zunahme der LP3DCP-Probenbreite. Wie bereits für die applizierte Spritzlayerbreite führt eine reduzierte Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit aufgrund des stärkeren seitlichen Abfließens des Feinkornbetons auch zu einer Zunahme der LP3DCP-Probenbreite.

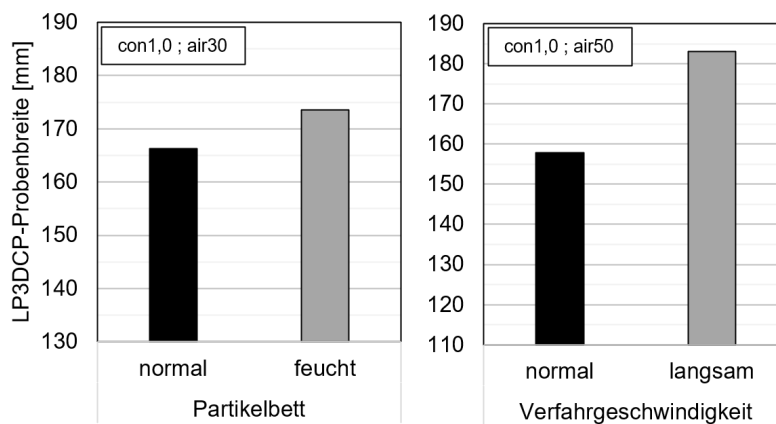


Abbildung 123: LP3DCP-Probenbreite in Abhängigkeit des (links) Partikelbettzustands (PB nicht angefeuchtet und angefeuchtet) oder der (rechts) Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit (normal nach GL 3 berechnet und eine nach GL 3 berechnete, aber auf 70 % reduzierte Düsen-Verfahrensgeschwindigkeit) für das Partikelbett KS16-32.

Ausschöpfung A, rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit der Partikelkennwerte:

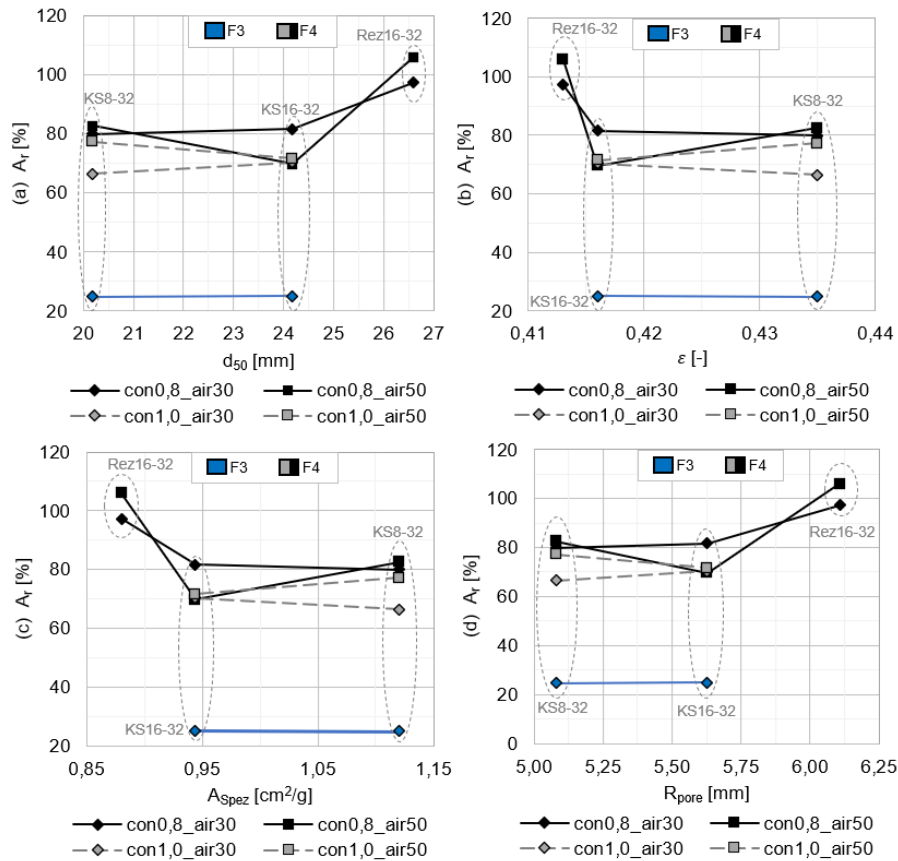


Abbildung 124: Ausschöpfung A_r rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit (a) des mittleren Korndurchmessers d_{50} , (b) der Porosität ϵ , (c) der spezifischen Partikeloberfläche A_{Spez} und (d) dem äquivalenten Porenradius R_{pore} für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).

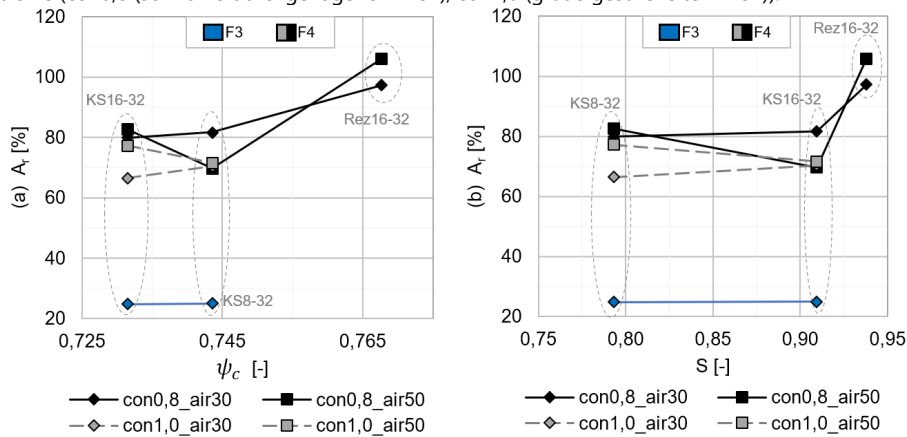


Abbildung 125: Ausschöpfung A_r rechtwinklig zur Layerausrichtung in Abhängigkeit (a) des Formbeiwertes ψ_c (Plattigkeit) und (b) der Sphärizität S (Rundheit) für die Feinkornbetone F3 (blau) und F4 (grau, schwarz), die drei Partikelbetten (Kalkstein: KS8-32, KS16-32 sowie Rezyklat: Rez16-32) sowie unter Variation der kinetischen Beschleunigung der Partikel durch Variation des Luftvolumenstroms (air30 (Diamant); air50 (Rechteck)) und des Betonvolumenstroms (con0,8 (schwarze durchgezogene Linien); con1,0 (graue gestrichelte Linien)).