

An die
Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV)
Karlgasse 5
A-1040 Wien

Trumau, am 29.06.2023

PRÜFBERICHT

VERGLEICH VON DRUCKFESTIGKEITEN

VERSCHIEDENER DRAINAGEBETON-REZEPTUREN

1 Fragestellung

Im Zuge der Bearbeitung der RVS 08.18.01 (Pflasterstein- und Pflasterplattendecken, Randeinfassungen) seitens des Arbeitsausschusses Stei06 der FSV wurde u.a. das Thema Drainagebeton diskutiert. Anlass für das gegenständliche Projekt war primär die Frage, welche der vorgeschlagenen Rezepturen (vgl. Überblick in Tab. 1) geeignete Druckfestigkeiten (UCS) aufweisen würden.

Zu diesem Zweck sollten vergleichende Laborversuche an praxisnahe eingebauten Drainagebetonen durchgeführt werden.

Darüber hinaus wurde die Frage nach der Art der Probenahme gestellt, nachdem nicht weiter bekannte Vergleichsuntersuchungen aus der Schweiz vor über 10 Jahren Hinweise lieferten, dass eine Probenahme mittels Bohranhänger signifikant schlechtere UCS lieferte als händisch erbohrte Prüfkörper. Daher sollten auch die Probenahmeverfahren miteinander verglichen werden.

2 Methodik

Für die Vergleiche unterschiedlicher Drainagebetone sowie Probenahmeverfahren wurde eine Versuchsfläche am Gelände der BMTI in Trumau bereitgestellt. Die Fa. STRABAG hat Planung und Ausführung der Schalung für die einzelnen nebeneinander liegenden Versuchsfelder übernommen, die schließlich seitens der Fa. ASAMER mit werkseitig gemischten Betonmischgütern am 11. April 2023 befüllt und verdichtet wurden. Die für das gegenständliche Projekt relevante Beprobung fand ab dem 7. Tag nach Einbau statt (18. April) und dauerte bis zum 19. April. Eine ergänzende (eingeschränkte) Probenahme erfolgte am 2. Mai (3 Wochen nach Einbau). Die Prüfung der Druckfestigkeiten fand 28 Tage nach Einbau statt.

2.1 Rezepturen

Tab. 1 gibt einen Überblick zu den einzelnen vorgesehenen Drainagebeton-Rezepturen und den zugeordneten Versuchsfeldern.

Tab. 1: Überblick zu den einzelnen Drainagebeton-Rezepturen und den zugeordneten Versuchsfeldern.

Code	Bezeichnung Testfeld	Größtkorn [mm]	RK/KK 4/8 in [M.-%]	RK/KK 8/16 in [M.-%]	RK/KK 16/22 in [M.-%]	Menge Zement [kg]	W/B-Wert
1	PDB 16 V1	16	33	67		200	0,29
2	PDB 16 V2	16		100		200	0,29
3	PDB 22V1	22	11	22	67	150	0,31
4	PDB 22V2	22		33	67	150	0,31
5	PDB 22V3	22			100	150	0,27
6	PDB 22V1	22	11	22	67	180	0,32
7	PDB 22V2	22		33	67	180	0,32
8	PDB 22V3	22			100	180	0,32
9	PDB 22V1	22	11	22	67	200	0,29
10	PDB 22V2	22		33	67	200	0,29
11	PDB 22V3	22			100	200	0,29

2.2 Versuchsfläche

Als Unterlage wurde eine ungebundene Tragschicht verdichtet und geebnet und anschließend mit Schalhölzern eine mindestens 20 cm hohe Schalung für 11 nebeneinander liegende Versuchsfelder (1 x 2,5 m²) montiert (Abb. 1). Die Versuchsfelder wurden am 11. April 2023 mit Transportbeton befüllt und mittels Rüttelplatte verdichtet. Nach augenscheinlich zu mageren bzw. trockenen Verhältnissen der Versuchsfelder 1 und 2 wurden diese wieder ausgebaut und mit neu hergestellten Mischgütern abermals befüllt. Der gesamte Einbau konnte bis zu Nachmittag desselben Tages abgeschlossen werden. Die gesamte betonierte Versuchsfläche (Abb. 2) wurde anschließend sofort abgedeckt, um diese vor Verdunstung und Starkregen zu schützen. Nach 7 Tagen wurde mit den Probenahmen begonnen.



Abb. 1: Schalungen der 11 nebeneinander liegenden Versuchsfelder nach (erstmaligem) Einbau der Felder 1 und 2.



Abb. 2: Zustand der Versuchsfläche vor Beginn der Bohrungen.

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchte Probe.

Die Vervielfältigung oder Veröffentlichung von Prüfberichten oder Teile davon bedarf einer schriftlichen Zustimmung der TPA GmbH. Es gelten die Geschäftsbedingungen der TPA GmbH. Untersuchte Proben werden nach Berichtslegung grundsätzlich entsorgt, so keine rechtlichen Bestimmungen über Lagerungsfristen zum Zeitpunkt der Prüfung hinsichtlich gegenständlicher Probe existieren. Eine Lagerung gegen Gebühr ist vom Auftraggeber gesondert zu beauftragen.

2.3 Probenahme und Bohrkern (BK)-Serien

Nach Vorversuchen auf einer eigenen kleinen Versuchsfläche mit Handbohrgerät (Hilti DD 110-W) und Bohranhänger (2 Zyl.-Viertakt-Benzinmotor 20 HP bei 3000 U/Min, Fa. Infratest) war schnell klar, dass eine manuelle Bohrung bereits durch geringfügige vertikale Schiefstellung zu oftmaligem Verkanten (z.T. bis zu 20 x je 20 cm BK-Tiefe) und damit einhergehend zu einer Aktivierung der Rutschkupplung führt. Dies wiederum erfordert ein vollständiges Herausziehen der Bohrkronen und ein neuerliches Ansetzen sowie Absenken der Krone in rotierendem Zustand bis die zuvor erbohrte Tiefe wieder erreicht wird.

Hintergrund der Überlegungen, warum überhaupt der Aufwand einer manuellen Bohrung betrieben wurde, war der Verdacht (auf Basis der genannten schweizerischen Erfahrungen), dass sich im Zuge des Bohrprozesses ausbrechende Körner in den Zähnen der Bohrkronen verfangen und mitgeschleift werden könnten. Die Rutschkupplung könnte ggf. dieses Mitschleifen und damit einhergehende potenzielle Gefügestörungen des zu ziehenden BK im Gegensatz zu Bohrungen mit dem Anhänger vermeiden helfen. Ein oftmaliges Abbrechen und Wiederansetzen des Bohrvorganges wiederum könnte ebenso zu unerwünschten Störungen führen, verlängert die Dauer der Probenahme und ist physisch deutlich anstrengender. Um dem entgegenzuwirken, wurde eine Bohrhilfe konstruiert, mit deren Hilfe die vertikale Position signifikant besser eingehalten werden konnte, was dazu führte, dass je Bohrung die Rutschkupplung kaum bis gar nicht mehr aktiviert wurde.



Abb. 3: Manuelles Bohren mit der eigens konstruierten Bohrhilfe.

Der ursprüngliche Plan sah vor, je Versuchsfläche 10 Bohrkerne (BK) mit einer Handbohrmaschine und 10 BK mit einem Bohranhänger zu gewinnen und anschließend hinsichtlich UCS zu vergleichen. Auf Grund der erkannten Schwierigkeiten beim manuellen Bohren musste trotz Verwendung einer eigens konstruierten Bohrhilfe die Anzahl der manuell erbohrten BK je Versuchsfeld auf 4 reduziert werden, um die manuell erbohrten BK in max. 2 Tagen gewinnen zu können. Eine Bohrdauer von bis zu 30-45 Min je BK bei manueller Bohrung (im Vgl. zu 2-3 Min bei Bohrung mittels Anhänger) überstiegen die personellen Kapazitäten (mit 2 – 3 Mann im Rotationsprinzip gearbeitet). Kompensatorisch wurden dafür entsprechend mehr BK mit dem Bohranhänger gezogen (vgl. Tab. 2). Angesichts der Annahme, dass Bohrungen mit dem Bohranhänger wegen der größeren Kraft zu Gefügestörungen auch im umliegenden Bereich der Bohrung führen könnten, wurden diese erst durchgeführt, als die 4 manuellen Bohrungen auf dem jeweiligen Versuchsfeld bereits abgeschlossen waren.

Letztlich wurde entschieden, die 4 manuellen BK mit 4 mit dem Anhänger erbohrten BK in vergleichbarer Position innerhalb eines Versuchsfeldes zu vergleichen und die restlichen mit dem Bohranhänger gewonnenen BK zur Beantwortung anderer nicht minder spannender Fragen heranzuziehen. Diese Fragen umfassten:

- Den Einfluss des Abgleichs unebener Prüfflächen mit Zementmörtel zur Erreichung ebener und glatter Prüfflächen
- Den Einfluss des Schneidens zur Erreichung ebener und glatter Prüfflächen
- Den Einfluss der Prüfkörper (PK)-Höhe
- Den Einfluss späterer BK-Entnahme (drei Wochen statt einer)

Einen Überblick zu den BK-Serien bzw. den entsprechend vorgesehenen Behandlungen der PK gibt Tab. 3, die Beschreibung erfolgt in Kap. 2.4.

Tab. 2: Überblick zu den BK-Serien je Feld sowie Anzahl der jeweiligen PK. M = Manuell gebohrt (blau), A = mit Anhängerbohrgerät gebohrt (grüne Farben) und unterschiedlich hinsichtlich Prüfflächen geglättet. Zur Glättung der Prüfflächen s. Tab. 3.

Testfeld	Manuell gebohrt				mit Anhänger gebohrt															
	1	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3
2	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3	A_HZ3
3	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3	A_HZ3
4	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3	A_HZ3
5	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3	A_HZ3
6	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3	A_HZ3
7	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3	A_HZ3
8	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3	A_HZ3

9	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3	A_HZ3
10	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3	A_HZ3
11	M	M	M	M	A	A	A	A	A2	A_H	A_H	A_H	A_H	A_H	A_HZ	A_HZ	A_HZ	A_HZ3	A_HZ3	A_HZ3

Tab. 3: Überblick zur BK-Serien in Abhängigkeit von der weiteren Behandlung, der anschließenden Glättung der Prüfflächen sowie den resultierenden PK-Höhen. M = Manuell gebohrt (blau), A = mit Anhängerbohrgerät gebohrt (grüne Farben)

Kürzel der Serie	Art der Bohrung		Glättung der Prüfflächen		PK_Höhe [mm] nach Glättung_ Spanne ohne Felder 1 und 2	PK_Höhe [mm] nach Glättung_ Mittel ohne Felder 1 und 2
	Manuell mit Bohrhilfe	Anhänger mit Bohrgerät	Schneiden	Zementmörtel		
M	X			X	228-247	236
A und A2		X		X	220-235	229
A_H		X	X		110-190	151
A_HZ		X	X	X		162
A_HZ3		X	X	X		152

Zur größtmöglichen Vergleichbarkeit der Versuchsfelder untereinander (Annahme von möglichen Randeffekten beim Einbau) wurden die Positionen der BK-Entnahme von vergleichbarer Stelle je Versuchsfeld entnommen. Dazu wurde vor Probenahmebeginn ein Bohrraster festgelegt (Abb. 4), eine entsprechende Bohrschablone angefertigt und die Bohrpunkte auf den Versuchsfeldern farblich differenziert in manuell und mit Bohranhänger zu erbohrende BK gekennzeichnet (Abb. 5).

Besonders auf die gleiche Verteilung der manuell und mit Bohranhänger zu erbohrenden BK M und A wurde Wert gelegt. Diese wurden in den mittleren beiden Streifen (B und C in Abb. 4) eines jeden Versuchsfeldes positioniert.

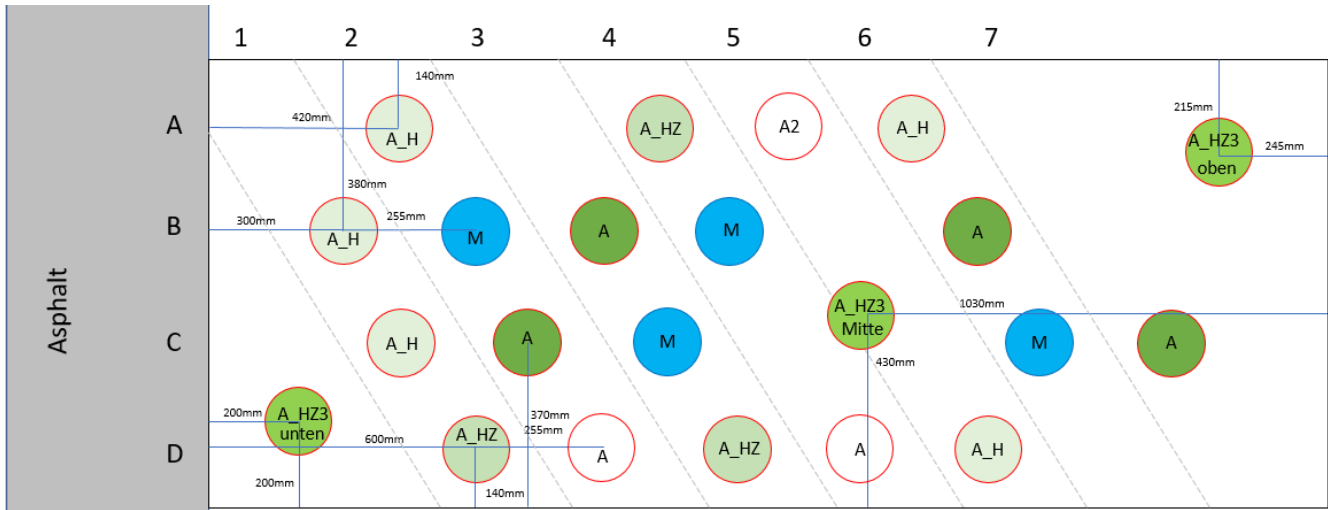


Abb. 4: Schematische Verteilung der Bohrpunkte der verschiedenen BK-Serien in einem Versuchsfeld. Die beiden BK A in weißem Feld wurden als Reserve gezogen.



Abb. 5: Kennzeichnung der Bohrpunkte mittels Bohrschablone (links), Zustand gegen Ende der manuellen Bohrungen (rechts).

2.4 Probenvorbereitung

2.4.1 Zementmörtelausgleich der Prüfflächen

Eine ebene bzw. glatte Prüffläche ist von großer Bedeutung für den Messwert der UCS. Die BK-Entnahme führte im Kontaktbereich zur unterlagernden Tragschicht zu unregelmäßigen Kornausbrüchen, sowohl bei manueller Bohrung als auch bei Verwendung des Bohranhängers. Dies führte zu sehr unebenen Flächen mit z.T. mehreren cm Höhenunterschieden innerhalb der Unterseite eines PK.

Als zwangsläufige Konsequenz erforderte dieser Umstand eine große Menge an schnellhärtendem Zementmörtel (Cement All, Fa. Korodur; > 31 MPa nach 180 Min.) in pastöser Konsistenz zum Ausgleich der Fehlstellen und zur Glättung der Prüffläche bei den Serien M und A. Durch Differenzwägung und Berücksichtigung der Rohdichte des Zementmörtels konnte die durchschnittliche Höhe der ausgleichenden Zementmörtelschichte je Prüffläche mit rund 1-1,3 cm ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der groben Textur kann lokal von bis zu mehreren cm Zementmörtel-Höhen ausgegangen werden (vgl. Abb. 6 und Abb. 7).

Der Zementmörtelausgleich bei geschnittenen Flächen (Serie A_HZ) war entsprechend einfacher und konnte in deutlich geringerer Höhe aufgebracht werden.

Der Vorgang der Zementmörtelausgleiches war wie folgt (vgl. Abb. 6):

- Anbringen einer speziellen Stahlmanschette, deren Oberkante eine Kreisfläche aufspannt, die normal zur Bohrkernachse liegt.
- Aufbringen von Zementmörtel (Cement All der Fa. Korodur) in zähplastischer Konsistenz
- Aufdrücken einer mit Schalöl bestrichenen Plexiglasplatte zur Erzeugung einer ebenen und glatten Prüffläche
- Sofortiges Umdrehen und Abstellen des PK auf der Plexiglasplatte zur Erhärtung für mindestens 30 Min.
- Bearbeitung der anderen Seite in gleicher Weise



Abb. 6: Vorgang des Zementabgleiches einer künftigen Prüffläche eines PK des Versuchsfeldes 5: Anbringen der Stahlmanschette (links oben), Aufbringen des Zementmörtels (rechts oben), Glättung durch Aufdrücken der Plexiglasplatte (links unten), Stürzen des PK samt Plexiglasplatte und Erhärten des Zementmörtels (rechts unten).



Abb. 7: Mit Zementmörtel abgegliche Prüffläche eines nicht geschnittenen PK (Serie M oder A).

2.4.2 Schneiden der Prüfflächen

Das Schneiden erfolgte mit einer üblichen Gesteinssäge normal zur Bohrkernachse (Abb. 9) in 5 unterschiedlichen Höhen je Versuchsfeld in einer Spanne von etwa 110 -190 mm bei Serie A_H (Abb. 8) sowie in etwa 150 mm Höhe bei Serie A_HZ (nach Zementmörtelabgleich).

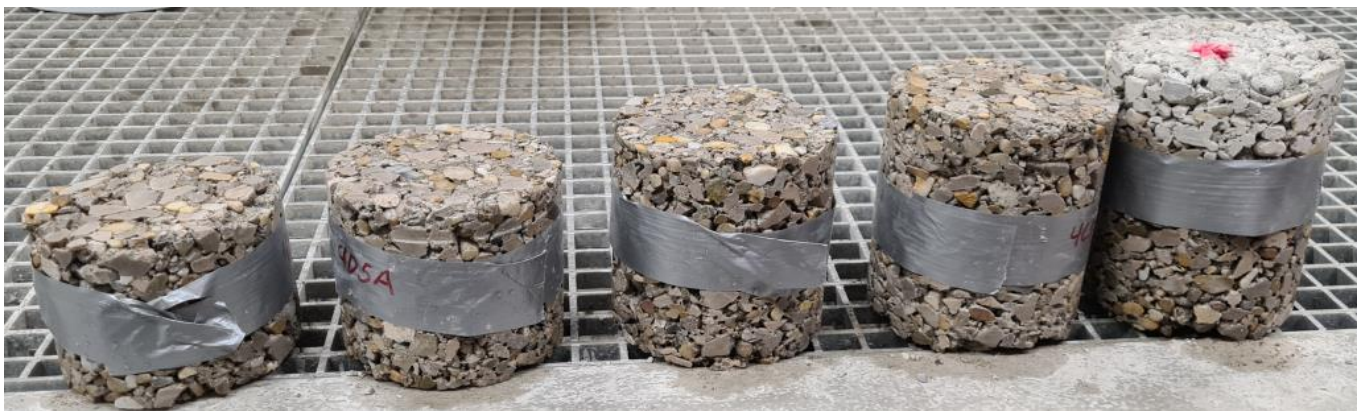


Abb. 8: PK der A-H-Serie aus Versuchsfeld 4 (der BK ganz rechts wurde noch nicht geschnitten).



Abb. 9: PK während des Schneidvorganges (links) und Schnittfläche eines PK aus Versuchsfeld 10 (rechts: es sind kaum Kornausbrüche erfolgt).

2.5 Druckversuch

Der Druckversuch wurde mit einer hydraulischen Presse (BFI Fochler GmbH, El.Hydr. Prüfmaschine 3000 kN, kraftgesteuerter Vorschub von 2 kN/s) 28 Tage nach BK-Entnahme durchgeführt und bis zum Bruch (eindeutig erkennbar durch nicht nachregelbaren Kraftabfall) aufgezeichnet. Der Bruch war optisch z.T. kaum erkennbar, z.T. konnten seitliche Aufwölbungen, Abplatzungen oder Kornbrüche wahrgenommen werden (Abb. 10).

Die UCS ergibt sich aus erreichter Maximalkraft bezogen auf die Prüffläche (PK mit Kreisfläche von 15 cm Durchmesser), unabhängig von der PK-Höhe.

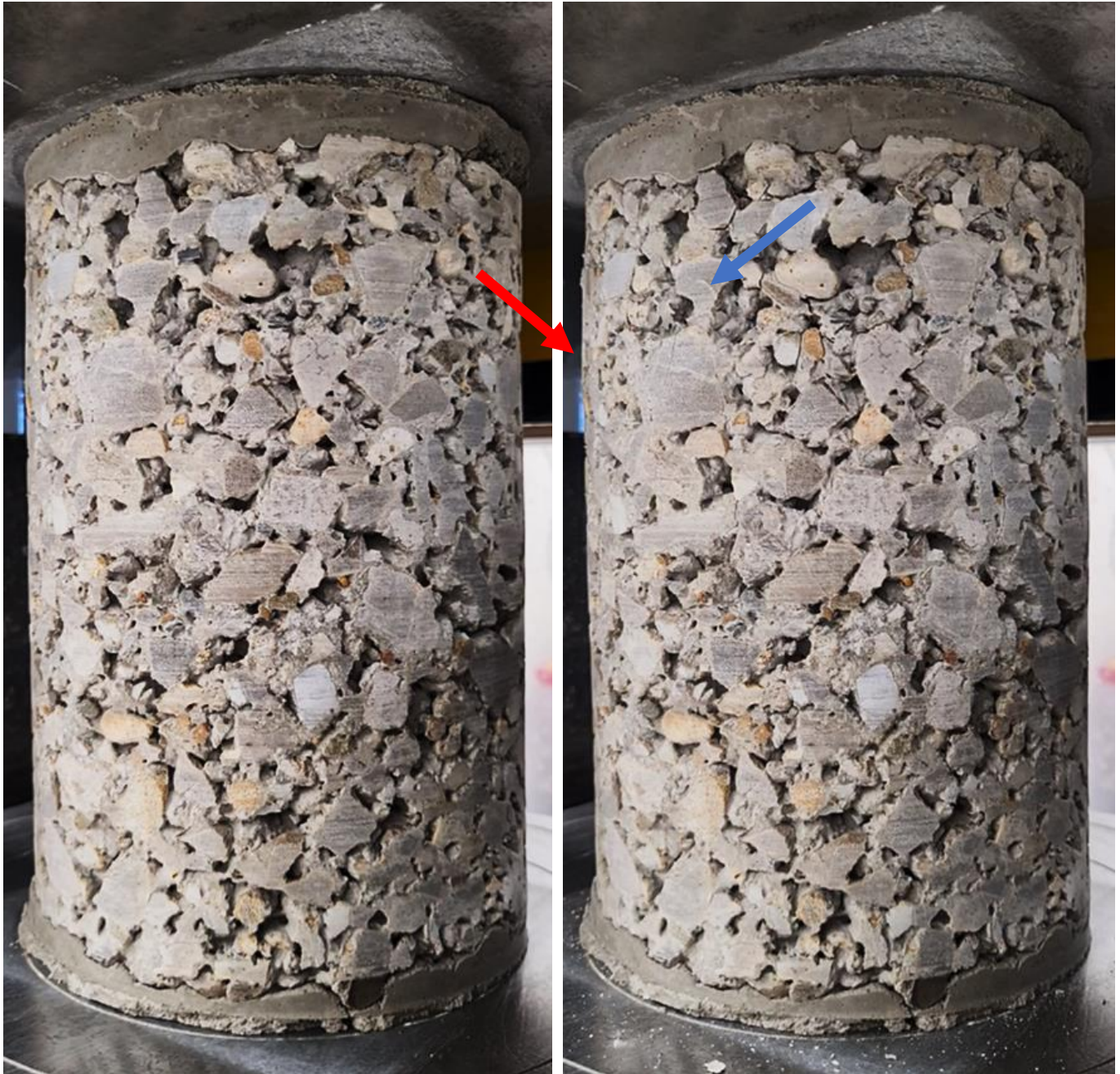


Abb. 10: PK vor Beginn des Druckversuches (links) und nach Beendigung des Druckversuches (rechts). Der rote Pfeil weist auf eine geringe Aufwölbung infolge der Stauchung des PK hin, der blaue Pfeil auf einen entstandenen Riss in einem Gesteinskorn.

3 Prüfergebnisse und Interpretation

3.1 Überblick zu UCS und Wiederholbarkeiten im Vergleich der Versuchsfelder

Die Einzel-Prüfergebnisse in Abhängigkeit von Art der Probenahme und Probenvorbereitung wurden je Versuchsfeld gemittelt. Zuvor wurden einfache Ausreißertests nach Dean-Dixon auf einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,1$ durchgeführt. Eine Gegenüberstellung der Mittelwerte sowie der relativen Standardabweichungen (bezogen auf den jeweiligen Mittelwert) sind mit und ohne Ausreißer in Tab. 4 angeführt.

Tab. 4: Überblick zu den wesentlichen mittleren Prüfwerten UCS (links) sowie relativen Standardabweichungen (rel. Stabw, rechts) in Abh. v. Feld, Probenahme und Probenvorbereitung.

Feld	Mittel M	Mittel M ohne Ausreißer	Mittel A	Mittel A ohne Ausreißer	Mittel A_H	Mittel A_HZ	Mittel A_HZ ohne Ausreißer	Mittel A_HZ3	Mittel A_HZ3 ohne Ausreißer	A2	rel. Stabw M	rel. Stabw M ohne Ausreißer	rel. Stabw A	rel. Stabw A ohne Ausreißer	rel. Stabw A_HZ	rel. Stabw A_HZ ohne Ausreißer
1	10,1	10,8	9,0	7,2	4,4	7,6	7,6	2,1	2,7	7,2	13	3	42	19	20	20
2	10,6	10,6	8,1	8,1	2,7	7,6	7,6	1,2	1,2	6,6	10	10	35	35	14	14
3	7,2	6,0	8,2	8,2	4,1	7,1	7,1	6,5	6,5		37	17	28	28		
4	8,0	8,0	6,5	6,5	3,5	8,2	6,5	6,6	6,6	7,6	35	35	25	25	37	16
5	9,5	9,5	11,1	11,1	6,8	8,0	8,0	6,9	3,4	7,1	26	26	24	24	26	26
6	17,3	18,7	14,1	16,8	12,1	18,3	21,0	14,3	12,7	12,2	21	12	39	13	25	2
7	10,9	9,7	10,2	12,1	4,1	9,0	9,0	5,5	4,1	8,4	22	5	41	19	27	27
8	12,5	12,5	14,0	14,0	6,7	11,5	14,9	4,1	4,1	7,1	29	29	15	15	69	51
9	14,5	14,5	14,4	14,4	6,8	12,1	12,1	9,8	8,1	9,1	23	23	34	34	7	7
10	14,7	14,7	11,6	11,6	4,4	11,2	11,2	10,0	11,8	7,6	12	12	27	27	9	9
11	10,3	10,3	5,8	5,8	4,0	11,3	11,3	8,1	6,5	5,8	38	38	53	53	9	9
Mittel	11,4	11,4	10,3	10,5	5,4	10,2	10,6	6,8	6,2	7,9	24	19	33	26	24	18

Die über alle Felder gemittelten Messwerte in Abhängigkeit von Art der Probenahme sowie Probenvorbereitung sind in Abb. 11 graphisch dargestellt.

Es lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die Exklusion von Ausreißern verursacht nur geringfügige Unterschiede zwischen den über alle Felder gemittelten Werten mit und ohne Ausreißer, eine Differenzierung hat also kaum Relevanz
- Die manuelle BK-Entnahme (Serie M) weist im Mittel die höchsten UCS auf, wobei die UCS der mit Bohranhänger gezogenen BK (Serie A) immer noch etwa 90-92% der manuell gezogenen BK aufweisen. Ein geringfügig schonenderes manuelles Bohren könnte daraus interpretiert werden.

- Die auf 150 mm Höhe geschnittenen und anschließend noch mit Zementmörtel abgeglichenen BK (Serie A_HZ) zeigen praktisch gleiches Wertenniveau wie die ebenfalls mit Zementmörtel abgegliche Serie A (mit allerdings deutlich größeren PK-Höhen). Der Einfluss des Schneidens auf die UCS der PK dürfte demnach nur sehr geringfügig sein.
- Demgegenüber zeigen die nur in verschiedenen Höhen geschnittenen PK (ohne Zementmörtelabgleich, Serie A_H) signifikant geringere UCS. Dies wiederum weist auf einen großen Einfluss des Zementmörtelabgleichs hin.
- Die niedrigen UCS der Serie A_HZ3 (analog Serie A_HZ, aber erst nach 3 Wochen erbohrt) können nicht erklärt werden.

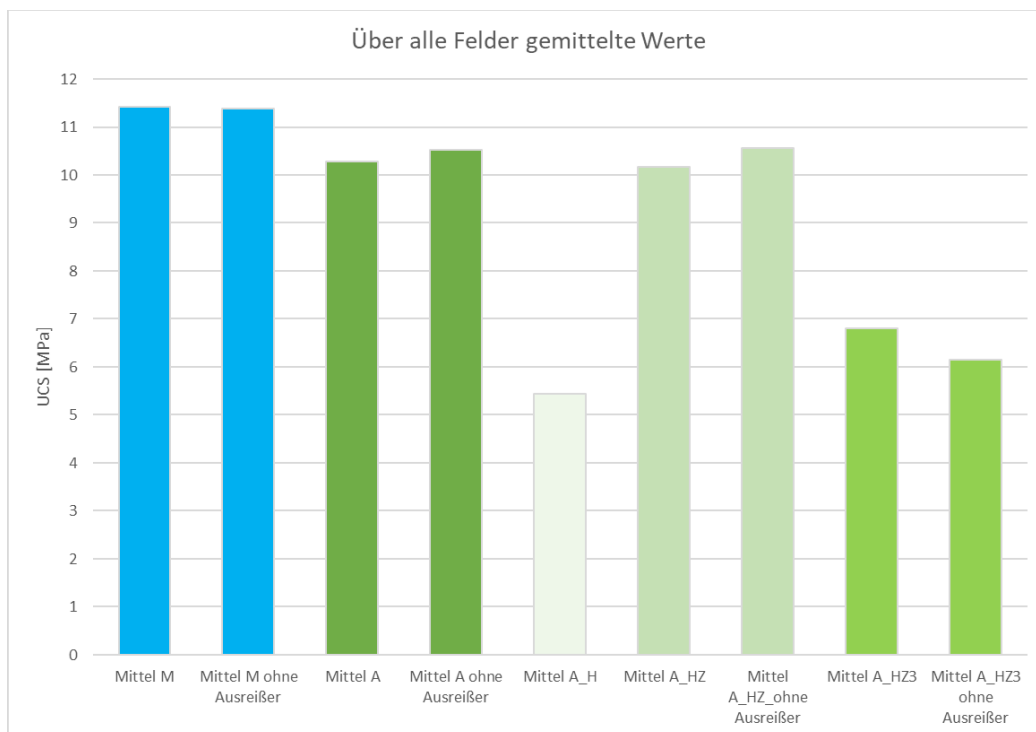


Abb. 11: Über alle Felder gemittelte Messwerte in Abhängigkeit von Art der Probenahme (blau = manuell, Grüntöne = Anhänger mit Bohrgert) sowie Probenvorbereitung.

Werden nun die BK-Serien M und A bzw. A_HZ, also jene Serien mit den höchsten und annähernd gleichen UCS-Werteniveaus herangezogen, um die Niveaus der einzelnen Versuchsfelder miteinander zu vergleichen, so zeigt sich folgendes Bild (Abb. 12):

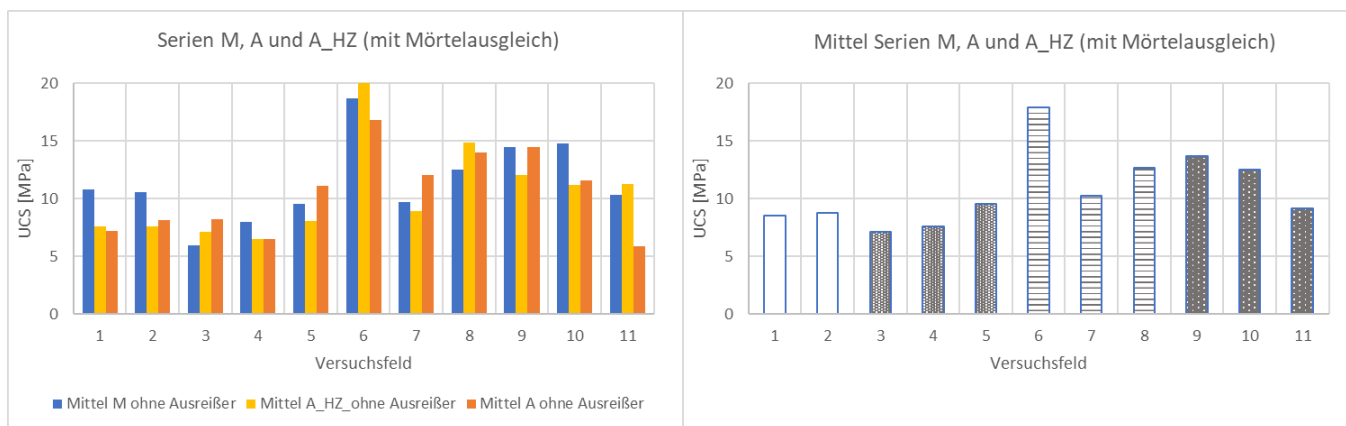


Abb. 12: Vergleich der Werteniveaus der Versuchsfelder anhand der Serien M, A und A_HZ (alle mit Zementmörtelabgleich), links in nach den Serien differenzierter Ansicht, rechts in Form der Mittelwerte aus den 3 Serien (Versuchsfelder mit gleichem Größtkorn und gleichem Zementgehalt sind in gleichen Schraffuren dargestellt).

Obwohl zwischen den Versuchsfeldern untereinander kein Zusammenhang vorliegt, kann eine Liniendarstellung sinnvoll sein, um Trends zwischen den Serien besser zu visualisieren. Dabei zeigt sich ein sehr ähnlicher Verlauf und fast gleiches Werteniveau der UCS bei den Serien M und A (und auch A_HZ), aber ein deutlicher Parallelversatz der Serie A_H in Richtung niedrigerer UCS (Abb. 13).

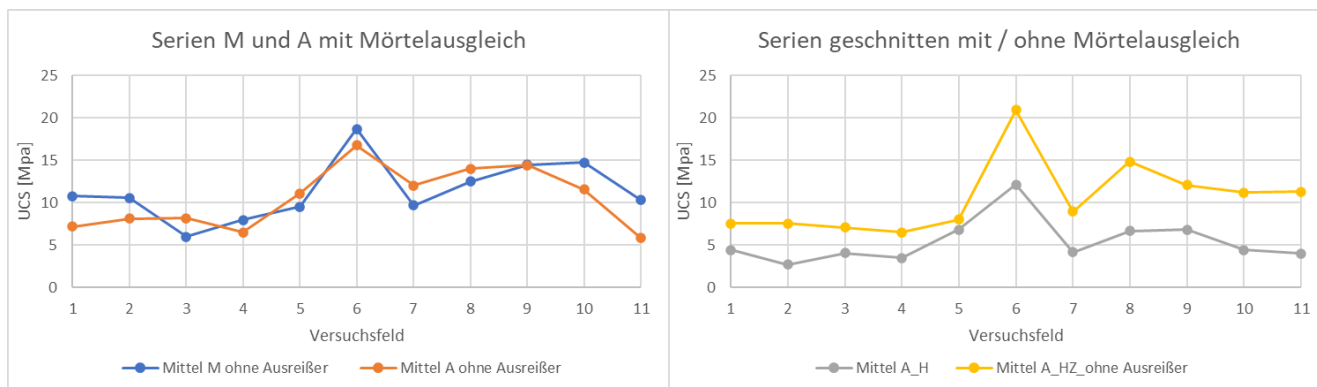


Abb. 13: Liniendarstellung der Werteniveaus über die Versuchsfelder. Links: Serien M und A, rechts: Geschnittene Serien.

Hinsichtlich der unterschiedlichen Werteniveaus der Versuchsfelder ist vergleichend Folgendes festzuhalten (vgl. Abb. 12, rechts):

- Die Felder 1 und 2 (GK 16 mm) liegen im untersten Bereich des UCS-Spektrums der Versuchsfelder (unter Berücksichtigung des höheren W/B-Wertes der Felder 3 und 4, s. u.)
- Anhand der Rezepturen (Tab. 1) ist davon auszugehen, dass jeweils drei bestimmte nebeneinander liegende Versuchsfelder mit gleichen Zementgehalten (vgl. gleiche Schraffuren in Abb. 12, rechts), aber zunehmend enger gestuften Sieblinien auch zunehmend geringere UCS aufweisen sollten.
 - o Dies ist allerdings nur bei den Feldern 9-11 der Fall.
 - o Bei den Feldern 6-8 zeigt Feld 7 unerwartet niedrige Werte, die bei allen Probenvorbereitungen gleicher Maßen auftreten und daher möglicher Weise auf Mängel beim tatsächlich eingebauten Mischgut zurückzuführen sind
 - o Die Felder 3-5 zeigen diesen Trend nicht, was aber wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass bei den Feldern 3 und 4 wegen Mängel in der Einbau-Konsistenz unmittelbar vor dem Einbau Wasser in den Betonmischer zugegeben werden musste, sodass der W/B-Gehalt stieg und letztlich klar über jenem von Feld 5 (mit höheren UCS trotz engerer Kornverteilung) lag (vgl. Tab. 1).
- Die Rezepturen mit 180 kg Zement bei GK 22 mm (Felder 6-8) zeigen (trotz unerwartet niedrigen UCS bei Feld 7) die höchsten UCS. Besonders Feld 6 (mit weitgestufter Sieblinie) weist die eindeutig höchsten UCS auf.

In gleicher Weise wie die UCS können auch die relativen Standardabweichungen der Einzelprüfwerte verschiedener Versuchsfelder in Abhängigkeit von Probenahme und Probenvorbereitung dargestellt werden (Abb. 14). Dabei zeigt sich ein generell sehr hohes Niveau im Sinne großer Unterschiede bzw. schlechter Wiederholbarkeit der UCS einzelner PK eines Versuchsfeldes. Die relative Standardabweichung liegt meist zwischen 5 und 35 %, die mittleren Niveaus, v.a. jene der Serien M und A_HZ sind praktisch gleich (s. Tab. 4, rechts). Aus diesen Berechnungen zur relativen Standardabweichung der UCS von BK aus einem Versuchsfeld lassen sich hinsichtlich Wiederholbarkeit bzw. Prüfstreuung keine Präferenzen für Bohrkerngewinnung oder Probenvorbereitung ableiten. Betrachtet man die Versuchsfelder mit weitgestuften Sieblinien (6 und 9; 3 muss hier wegen offensichtlicher Festigkeitsprobleme bereits im Zuge der Probenahme als Ausreißer erachtet werden) so zeigt sich wohl nicht ganz zufällig, dass diese Rezepturen nicht nur die höchsten UCS aufweisen, sondern gleichzeitig auch die geringsten Streuungen der Einzelwerte. Zunehmende Festigkeit auf Grund weitgestufter Sieblinie dürfte tendenziell auch zu geringeren Prüfstreuungen führen.

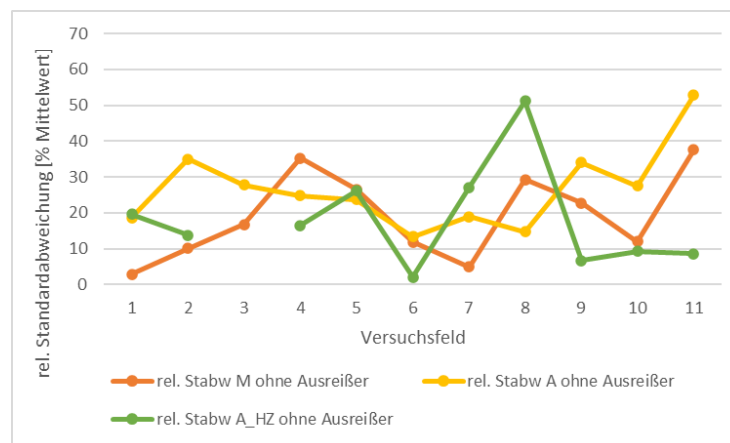


Abb. 14: Verteilung der relativen Standardabweichungen über die Versuchsfelder in Abhängigkeit von Art der Probenahme und Probenvorbereitung.

3.2 Vergleich manuelle BK / BK mit dem Bohranhänger

Wie bereits in Kap. 2.3 beschrieben konnte durch Anwendung der Bohrhilfe die vertikale Position markant besser eingehalten werden. Dies führte dazu, dass im Zuge einer manuellen Bohrung die Rutschkupplung kaum bis gar nicht aktiviert wurde. Das bedeutet gleichzeitig, dass für die Überschreitung des Drehmoments und damit für die Aktivierung der Rutschkupplung die Schiefstellung der Bohrkronen in überwiegendem Ausmaß verantwortlich zeichnet und nicht (nur) das gemutmaßte Herausbrechen einzelner Körner. (Diese Überlegung wurde durch die Erfahrung untermauert, dass bei Provozierung einer noch geringfügig möglichen Schiefstellung bei Benutzung der Bohrhilfe meist sofort zur Aktivierung der Rutschkupplung führte!)

Somit kann geschlussfolgert werden, dass herausbrechende Körner bei manueller Bohrung nicht zur Aktivierung der Rutschkupplung und zu einer Unterbrechung des Bohrvorganges führen (unter der berechtigten Annahme, dass auch bei manueller Bohrung und entsprechend nötigem Kraftaufwand Körner herausbrechen werden). Diesbezüglich dürften sich daher manuelle Bohrung und jene mit dem Bohranhänger grundsätzlich nicht unterscheiden. Letztere geht aber deutlich schneller von statten, was zwangsläufig auf höheren Anpressdruck und höheres Drehmoment zurückzuführen ist. Diese deutlich größere Energie könnte allerdings doch zu tendenziell größeren Gefügeschäden am BK selber oder sogar im näheren Bohrumfeld führen. Aus diesem Grund wurden vorsichtshalber die manuellen Bohrungen zuerst durchgeführt und erst im Anschluss daran jene mit Bohranhänger.

Unter der Annahme, dass manuelle Bohrungen mit weniger Krafteintrag zu keinen Gefügeschädigungen im Umfeld der Bohrungen (wo anschließend die Bohrungen mit Anhänger durchgeführt wurden)

geführt haben, zeigen sich geringfügige Unterschiede. Die mit Bohranhänger gewonnenen BK liegen bez. UCS etwa im Bereich von 90-92 % der manuellen BK (vgl. Tab. 4 bzw. Abb. 11).

In Abb. 13, links zeigt sich, dass die Werteniveaus zwischen den Serien M und A sehr ähnlich sind und bei den einzelnen Versuchsfeldern nicht immer die Serie M höher liegt. Werden die Felder 1 und 2 (GK 16 mm) von der Betrachtung ausgeschlossen und nur die Versuchsfelder mit gleichem Größtkorn betrachtet (Felder 3-11) so zeigt sich, dass jeweils die gleiche Anzahl an Rezepturen bei manuellem Bohren und bei Bohren mit dem Anhänger höhere Werte zeigt. Ein eindeutig schonenderes Bohrverfahren wäre somit nicht mehr zu abzuleiten.

Die gleichen Aussagen lassen sich aus den Korrelationen der beiden Bohrverfahren ableiten, die trotz erheblicher Prüfstreuung eindeutige Trends bzw. Zusammenhänge aufzeigen (Abb. 15).

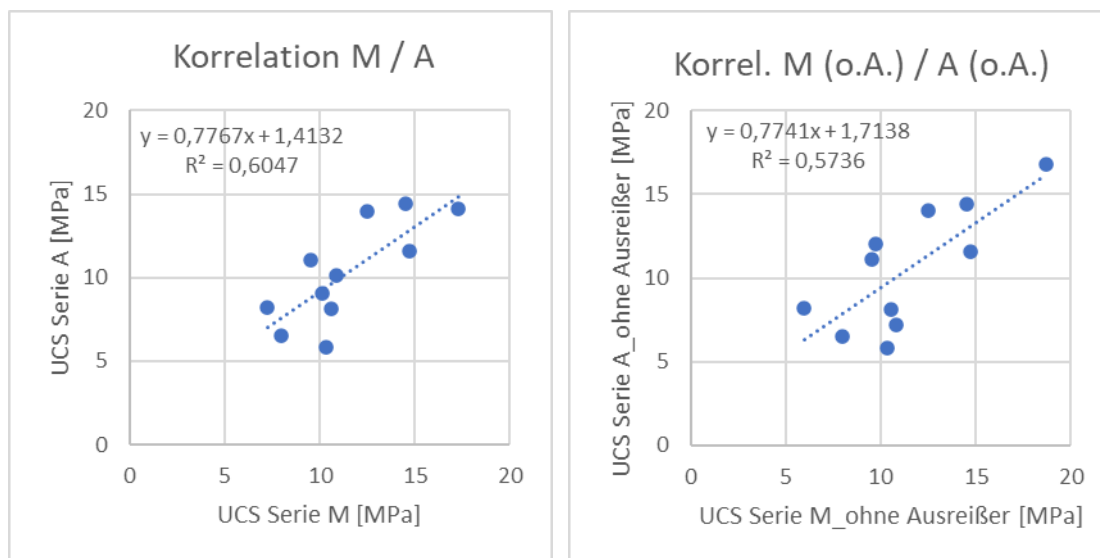


Abb. 15: Vergleich der Serien M und A ohne (links) und mit Ausreißerbereinigung („o.A.“, rechts).

3.3 Prüfung der Höhenabhängigkeit der UCS

Die Prüfung der Höhenabhängigkeit wurde vor Beginn der Untersuchungen als relevant erachtet, weil einerseits bekannt ist, dass PK, die höher als breit sind, tendenziell geringere Prüfwerte aufweisen und andererseits eine konstante Höhe der PK einbau- und materialbedingt nicht möglich war. Aus diesem Grund wurden BK mit dem Anhänger gewonnen, die nachträglich bewusst in unterschiedlichen abgestuften Höhen geschnitten wurden, um die Höhenabhängigkeit zu eruieren (Serie A_H). Der Einfluss des Schneidens wurde zunächst ausgeblendet, weil es lediglich um relative Unterschiede ging, wurde aber im weiteren Verlauf des Projekts ebenfalls berücksichtigt (Kap. 3.4). Aus 5 PK je Versuchsfeld sollte

es ggf. sogar möglich sein, Rezeptur-spezifische Korrekturen vornehmen zu können. Leider hat sich herausgestellt, dass keine eindeutige Höhenabhängigkeit aus den 11 Serien abzuleiten ist (vgl. Überblick in Abb. 16, Feld 3 konnte wegen schlechter Betonqualität und Zerbrechen im Zuge der Probenahme nicht erfasst werden. Lediglich das Versuchsfeld 6 mit den höchsten UCS könnte einen Trend andeuten). Dies ist offensichtlich auf die große (erwartbare) Streuung der Messwerte zurückzuführen, die Trends verschleiern. Auch die Beurteilung einer Höhenabhängigkeit den Serien M und A durch zufällig unterschiedliche PK-Höhen nach Bohrung und Zementmörtelabgleich bleibt ergebnislos. Aus diesem Grund ist es auch legitim, die Druckfestigkeiten der PK unterschiedlicher Höhe, aber gleicher Bearbeitung (Bohren mit Anhänger und Schneiden, Serie A_H) zu mitteln und anderen Probenahme- oder Bearbeitungsarten gegenüberzustellen.

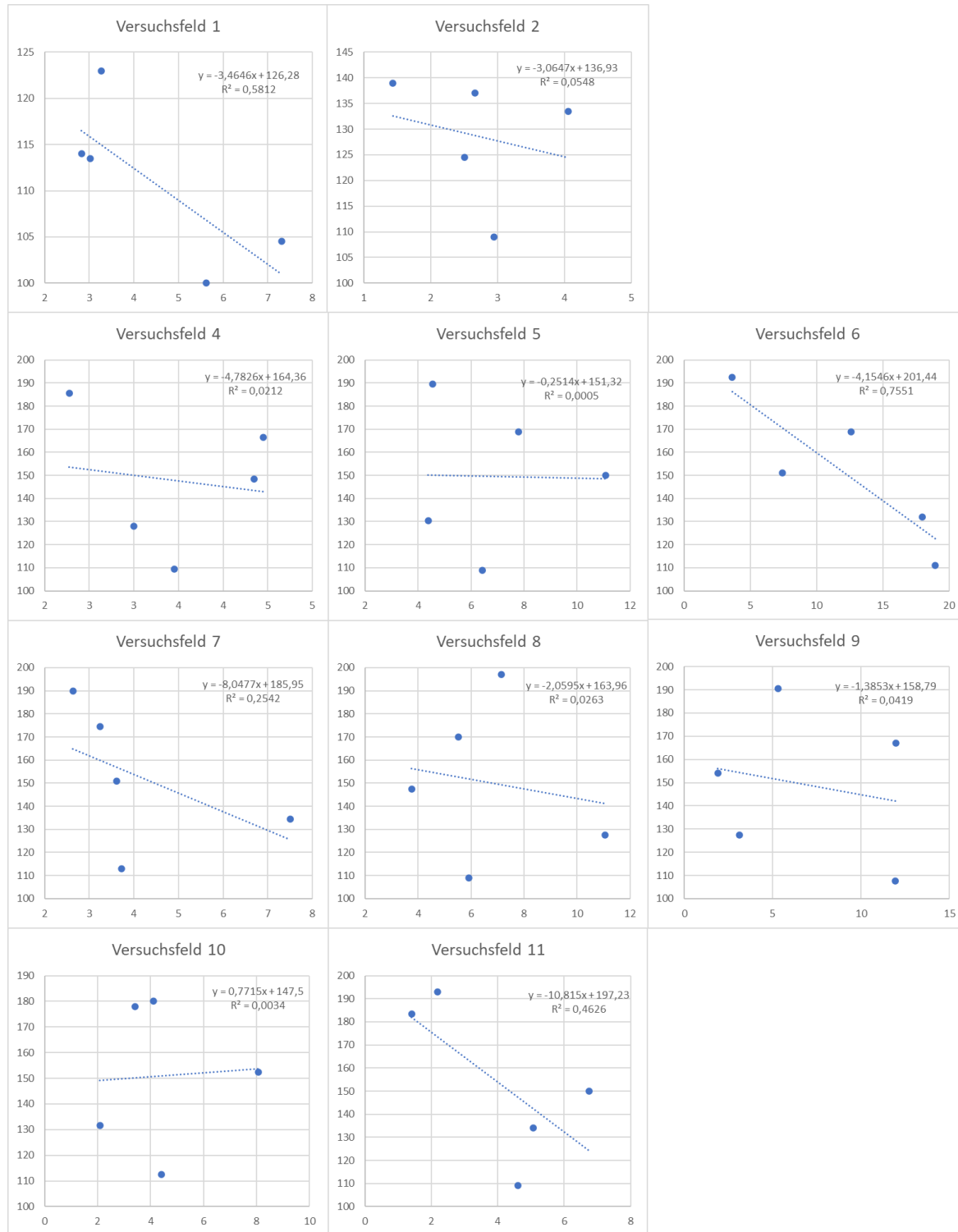


Abb. 16: Höhenabhängigkeiten der Prüfwerte innerhalb der Serie A_H. Ordinate PK-Höhe [mm], Abszisse UCS [MPa].

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchte Probe.

Die Vervielfältigung oder Veröffentlichung von Prüfberichten oder Teile davon bedarf einer schriftlichen Zustimmung der TPA GmbH. Es gelten die Geschäftsbedingungen der TPA GmbH. Untersuchte Proben werden nach Berichtslegung grundsätzlich entsorgt, so keine rechtlichen Bestimmungen über Lagerungsfristen zum Zeitpunkt der Prüfung hinsichtlich gegenständlicher Probe existieren. Eine Lagerung gegen Gebühr ist vom Auftraggeber gesondert zu beauftragen.

3.4 Einfluss des Schneidens

Nachdem die Art bzw. Intensität der Kraft des Bohrens im Verdacht steht, Einfluss auf die Druckfestigkeit des gewonnen PK zu nehmen, liegt die Vermutung nahe, dass auch das Schneiden mit einer rasch rotierenden Gesteinssäge die Integrität der PK und damit die korrespondierenden Druckfestigkeiten beeinflussen könnte.

Auf Grund der festgestellten „Höhenunabhängigkeit“ (im Sinne einer Verschleierung durch die viel größere materialbedingte Prüfstreuung) und der Legitimität der Mittelung der Prüfwerte von in unterschiedlichen Höhen geschnittenen PK der Serie A_H ist deshalb ein Vergleich der Mittelwerte je Versuchsfeld mit anderen Serien möglich. Beim Vergleich mit den nicht geschnittenen (aber notwendiger Weise mit Zementmörtel abgeglichenen) Serien M und A zeigen sich ein markant tieferes mittleres Niveau der UCS (Abb. 11), gleichzeitig aber dennoch mäßige bis gute Korrelationen (Abb. 17).

Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass nicht das Schneiden zu geringeren UCS führt, sondern der fehlende Zementmörtel-Abgleich. Eine eigene Versuchsserie (A_HZ), bei der gezielt je Versuchsfeld 3 mit Bohranhänger gewonnene PK auf 150 mm Höhe geschnitten und ergänzend mit Zementmörtel abgeglichen wurden, sollte mit Serie A_H (nur Schnitt ohne Zementmörtelabgleich) verglichen werden und stützt tatsächlich diese Überlegung (vgl. Kap. 3.5 bzw. Abb. 19).

Eine weitere wesentliche Beurteilungsgrundlage, ob das Schneiden einen relevanten Einfluss auf die UCS ausübt, ist der Vergleich der geschnittenen und mit Zementmörtel abgeglichenen Serie A_HZ mit den nicht geschnittenen, aber ebenfalls mit Zementmörtel abgeglichenen Serien M und A.

Der Vergleich zeigt, dass alle Serien bez. mittlerem Gesamtniveau nahezu gleich liegen (Abb. 11) und auch die Niveaus bei den einzelnen Versuchsfeldern vergleichbare Trends zeigen (Abb. 12 und Abb. 13). Bei den Korrelationen sind ebenfalls zumindest ein Trend bzw. ein guter Zusammenhang zu erkennen (Abb. 18).

Aus den Vergleichen und Überlegungen kann gefolgert werden, dass der Vorgang des Schneidens der BK keinen maßgeblichen Einfluss auf die UCS hat.

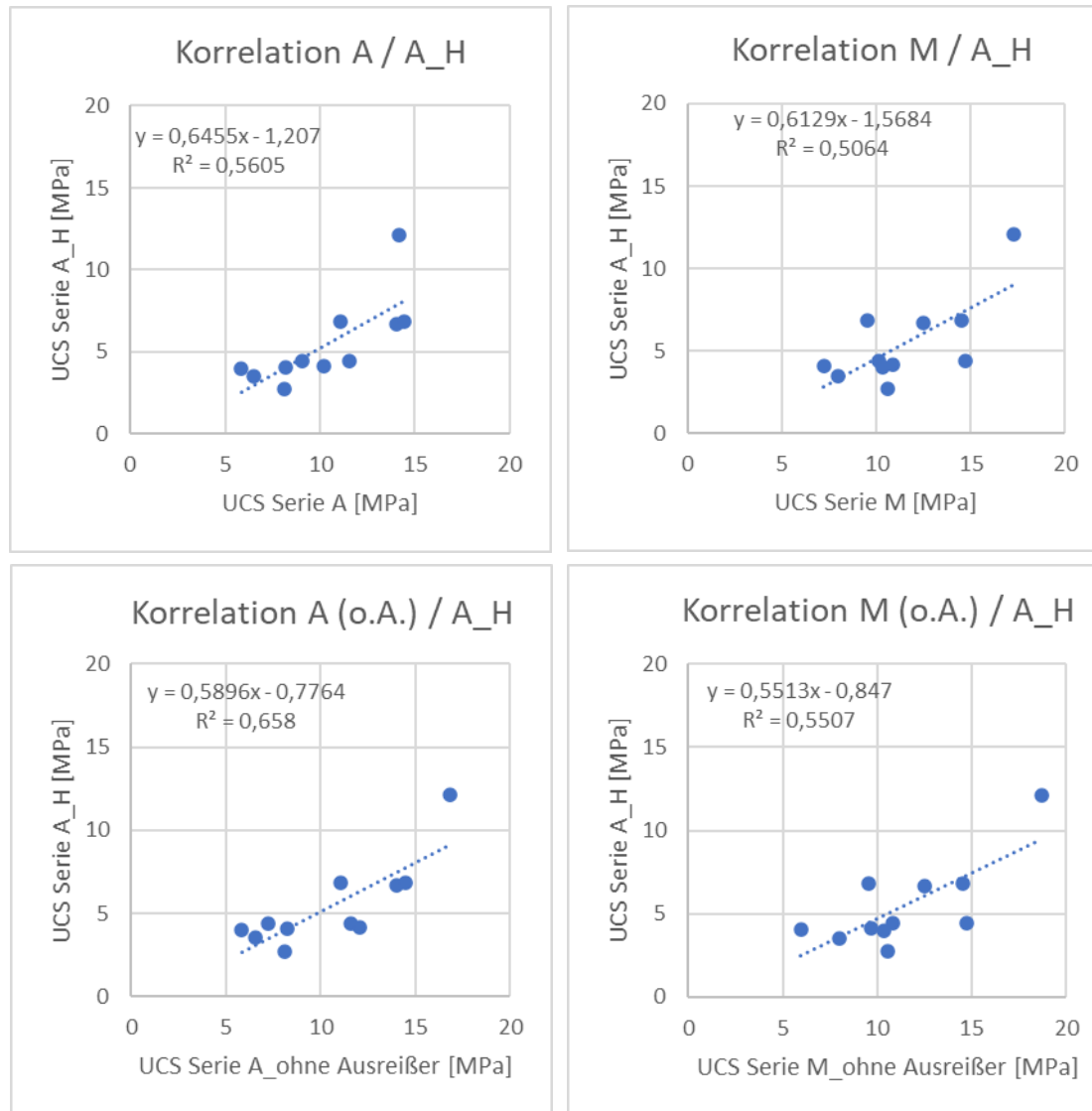


Abb. 17: Korrelationen der nur geschnittenen Serie A_H mit den Serien A (links) und M (rechts), wobei die beiden unteren Diagramme jeweils Ausreißer-bereinigte Serien („o.A.“) zeigen.

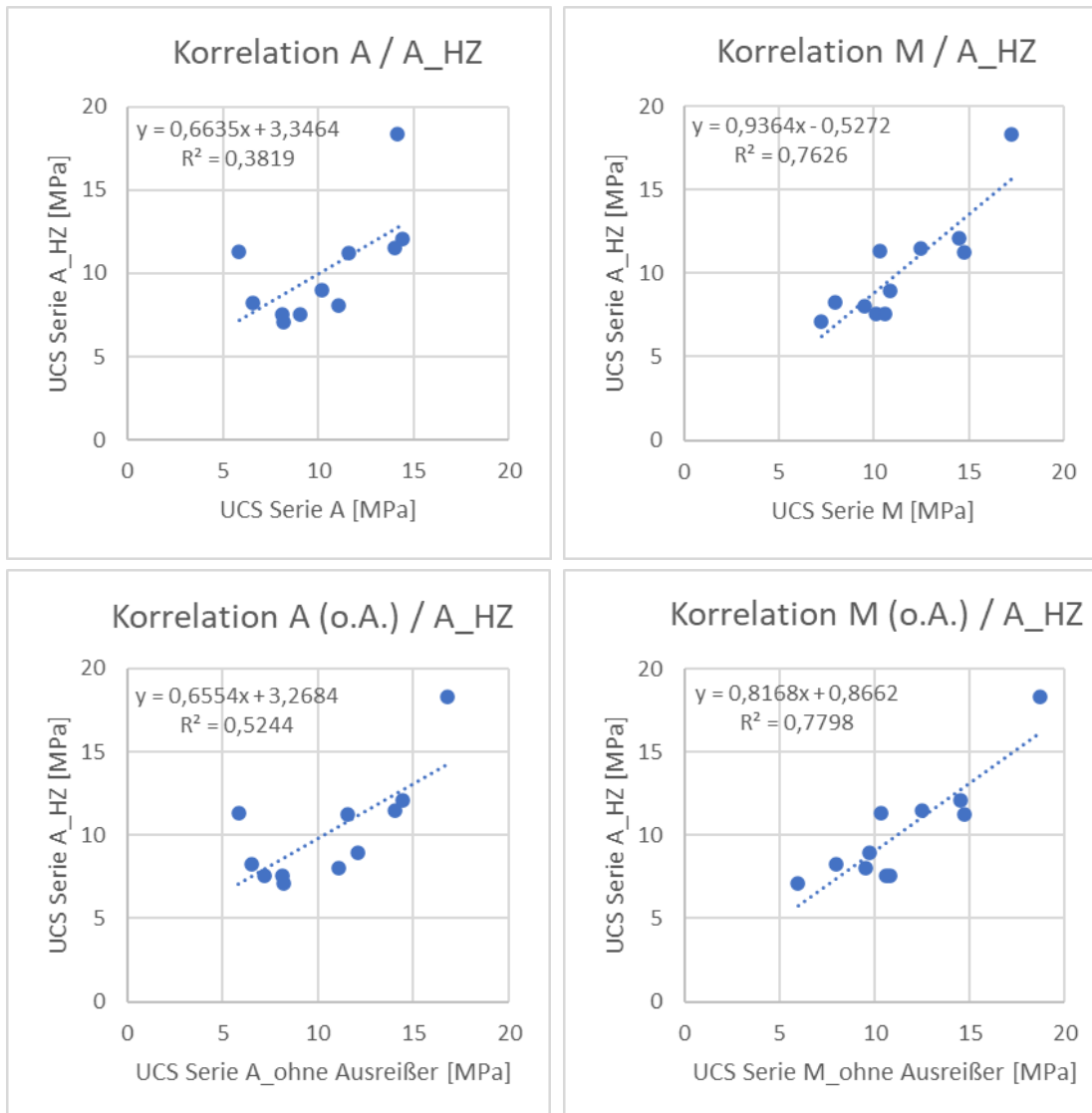


Abb. 18: Korrelationen der mit Zementmörtel abgeglichenen Serien Serie A_HZ (zuvor auch geschnitten) mit den Serien A (links) und M (rechts).

3.5 Einfluss des Zementmörtelabgleichs

Beim Vergleich der beiden Serien mit geschnittenen PK (A_H und A_HZ), die sich im Wesentlichen nur durch den Zementmörtelabgleich bei Serie A_HZ unterscheiden (Abb. 13, rechts), werden markante Unterschiede deutlich. Hier zeigt sich praktisch ein Parallelversatz der Kurven, der einen systematischen

Unterschied auf Grund des (Fehlens des) Zementmörtelabgleichs aufzeigt. Darüber hinaus kann eine gute Wiederholbarkeit des Bohrens mit Anhänger und anschließenden Schneidens abgeleitet werden.

Der Zementmörtelabgleich, respektive das Fehlen desselben ist somit maßgeblich für das Niveau der UCS verantwortlich.

Den mäßig bis guten Zusammenhang der beiden Serien A_H und A_HZ sowie den Einfluss des Zementmörtelabgleichs (mathematisch kommt dieser als Ordinatenabstand = d-Wert der linearen Regression zum Ausdruck) zeigt auch Abb. 19.

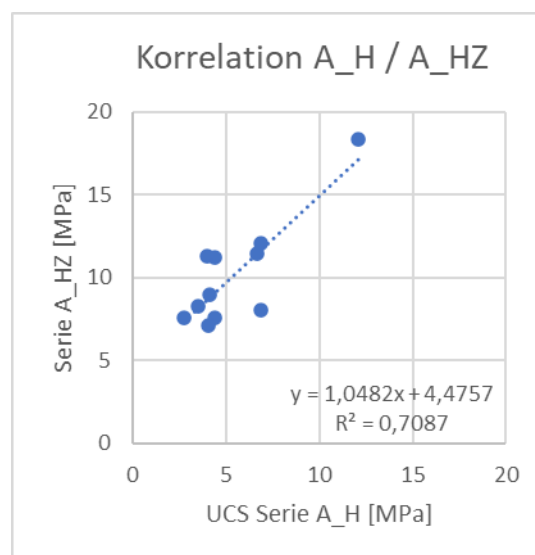


Abb. 19: Korrelation der Serien A_H mit A_HZ.

4 Zusammenfassung und Resümee

Folgende wesentliche Erkenntnisse können festgehalten werden:

- Bohraufwand im Vergleich (manuell / Anhänger)

Handbohrungen sind ungleich aufwändiger und nicht selten mit mehrmaligem, neuem Ansatz der Bohrmaschine verbunden, weil (trotz Bohrhilfe) eine minimale Schiefstellung zur Aktivierung der Rutschkupplung führen kann. Die Schiefstellung der Bohrkronen wird als alleinige Ursache dafür erachtet (und nicht ein Ausbrechen und ggf. Verkanten von Körnern).

Manuelle Bohrungen dauern bei Verwendung einer zum gegenständlichen Projekt gleichwertigen Bohrmaschine je nach Betonqualität und Zustand der Bohrkronen üblicher Weise rund 15 Min., können aber auch 30 Min (im Extremfall bis zu 45 Min) für etwa 20-22 cm Drainagebetontiefe und 150 mm Durchmesser der Bohrkronen dauern. Bohrungen mit Bohranhänger benötigen für die gleiche Leistung zwischen 2-3 Min., sind hinsichtlich des Bohrprozesses sehr wiederholbar und nahezu unabhängig von der durchführenden Person.

- Wiederholbarkeit

Handbohrungen und Bohrungen mit Anhänger weisen bez. UCS etwa die gleichen Streuungen auf, allerdings unter der Voraussetzung, dass bei manueller Bohrung eine Bohrhilfe mit möglichst geringem lateralem Spiel verwendet wird.

Aus Berechnungen zur relativen Standardabweichung der UCS von BK aus einem Versuchsfeld lassen sich hinsichtlich Wiederholbarkeit bzw. Prüfstreuung keine Präferenzen für Bohrkerngewinnung oder Probenvorbereitung ableiten. Manuell (mit Bohrhilfe!) erbohrte und mit Zementmörtel abgegliche PK (Serie M) und PK die durch Schneiden und Zementmörtelabgleich vorbereitet wurden (Serie A_HZ), weisen die gleichen Streumaße auf.

- PK-Höhen und deren Einfluss

Die PK-Höhen der Felder 3-11 bewegen sich nach Zementmörtelabgleich meist recht gleichmäßig um 230 mm, bei Felder 1 und 2 aber nur um 180 mm. Dies kann mit verstärkten Kornausbrüchen des Betons im Zuge der Bohrungen (auch der manuellen) im Kontaktbereich zur Tragschicht erklärt werden.

Die Höhe des mittleren (rechnerischen) Mörtelabgleichs liegt bei 20-27 mm je PK (bzw. bei der Hälfte der Höhe auf jeder PK-Fläche).

Weder bei den einbau- und Probenahme-bedingt unterschiedlichen PK-Höhen (Serien M und A), noch bei den explizit in unterschiedlichen Höhen geschnittenen BK (Serie A_H) zeigen sich Abhängigkeiten der UCS von der PK-Höhe. Angesichts der aus der Literatur bekannten Abhängigkeiten ist dieser Umstand daher den generell geringen Wiederholbarkeiten von Druckversuchen an v.a. grobkörnigen Drainagebeton-BK von 150 mm Durchmesser geschuldet. Daher konnten keine (ursprünglich angestrebten) Höhenkorrekturen vorgenommen werden.

- Einfluss des Schneidens und Zementausgleichs

Schneiden allein (Serie A_H) verursacht deutlich geringere UCS. Dies kann ggf. auf eine Auflockerung der randlichen Partien beim Schneiden, v.a. aber auf die anschließend fehlende Fixierung durch Zementmörtelabgleich zurückgeführt werden.

Schneiden mit Zementmörtelabgleich (Serie A_HZ) führt hingegen zu UCS auf fast gleichem Niveau wie ohne Schneiden (nur mit Zementmörtelabgleich, Serien M und A). Schneiden hat offenbar nur geringen Einfluss auf die UCS, darauf weist auch eine zumindest gleiche Wiederholbarkeit wie bei den Serien M und A hin. Gute Zusammenhänge der Serie A_HZ zu M oder A (Serien ohne Schneiden) untermauern die Einsatzmöglichkeit des Schneidens.

Angesichts der in Hinblick auf Korngröße und Porenraum ohnehin geringen PK-Dimensionen scheint es angebracht zu sein, bei der Prüfung von UCS an Drainagebeton mit Zementmörtelabgleich zu arbeiten, um nicht durch randliche Auflockerungen im Zuge von Bohren oder Schneiden eine noch größere Prüfunsicherheit herbeizuführen.

Ein Zementmörtelabgleich ist maßgeblich für das höhere Niveau der UCS verantwortlich.

- Messwerte-Niveau UCS im Vergleich (manuell / Anhänger)

Bohrungen mit Anhänger (Serie A) führen im Vergleich zu Handbohrungen (Serie M) jeweils nach Abgleich mit Zementmörtel zu geringfügig niedrigeren UCS (90-92 % von Handbohrungen), ein Zusammenhang mit mittelmäßiger Signifikanz ist gegeben ($R^2 = \text{ca. } 0,6$). PK-Höhen von Anhänger-Bohrungen sind tendenziell nur 96 % so hoch wie PK von Handbohrungen, was ggf. auf höhere mechanische Belastung durch Maschinenbohrung und damit einhergehende verstärkte Kornausbrüche an der unteren Kante der PK am Kontakt zur Tragschicht hinweist.

Trotz im Mittel leicht höherer UCS weisen nicht alle Versuchsfelder bei Serie M höhere Messwerte auf als Serie A. Werden die Felder 1 und 2 (GK 16 mm) von der Betrachtung ausgeschlossen und nur die Versuchsfelder mit gleichem Größtkorn betrachtet (Felder 3-11) so zeigt sich, dass jeweils die gleiche Anzahl an Versuchsfeldern bei manuellem Bohren oder bei Bohren mit dem Anhänger höhere Werte aufweist. Ein eindeutig schonenderes Bohrverfahren wäre somit angesichts der Prüfstreuungen nicht zweifelsfrei abzuleiten.

- Vergleich der UCS unterschiedlicher Betonrezepturen

Die Felder 1 und 2 (GK 16 mm) liegen im untersten Bereich des UCS-Spektrums der Versuchsfelder.

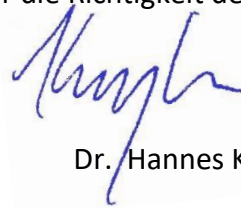
Bei den Rezepturen mit GK 22 mm zeigen die Felder 6-8 mit 180 kg Zement die höchsten UCS. Besonders Feld 6 (mit weitgestufter Sieblinie) weist bei Serien mit Zementausgleich die eindeutig höchsten UCS > 15 MPa auf. Rezepturen mit weitgestufter Kornverteilung dürften auf Basis der ermittelten Daten hinsichtlich UCS tendenziell zu bevorzugen sein.

Daraus abgeleitete empfohlene künftige Vorgangsweise:

- Bohren mit Anhänger
- Entnahme von mindestens 5 PK je Drainagebetonzezeptur (oder Einbaucharge)
- Schneiden der Unterkante des BK auf 15 cm PK-Höhe
- Beidseitiger glatter Abgleich mit schnellhärtendem Zementmörtel in pastöser Konsistenz
- UCS 28 Tage nach Einbau bei kraftgesteuertem Lastanstieg von 2 kN/s



Für die Richtigkeit der Darlegungen

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Hannes Kugler'.

Dr. Hannes Kugler