

Jürgen Baumgärtner



Faserorientierung im selbstverdichtenden Beton mit der Produktionsoptimierung für den Tübbingbau mit Schnellzement



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Faserorientierung im selbstverdichtenden Beton mit der Produktionsoptimierung für den Tübbingbau mit Schnellzement





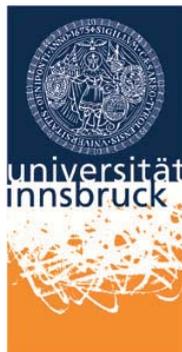
Dipl.-Ing. Jürgen Ulrich BAUMGÄRTNER

Faserorientierung im selbstverdichtenden Beton mit der Produktionsoptimierung für den Tübbingbau mit Schnellzement

DISSERTATION

eingereicht an der

LEOPOLD-FRANZENS-UNIVERSITÄT INNSBRUCK
FAKULTÄT FÜR TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN



Zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR DER TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

Innsbruck, Juli 2014



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2014

Zugl.: Innsbruck, Univ., Diss., 2014

Erst Beurteiler: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Lackner,
Universität Innsbruck,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften,
Arbeitsbereich Materialtechnologie

Zweit Beurteiler: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher,
Ruhr Universität Bochum,
Lehrstuhl für Baustofftechnik

Hauptbetreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Lackner,
Universität Innsbruck,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften,
Arbeitsbereich Materialtechnologie

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2014

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-882-3

eISBN 978-3-7369-4882-2



Gewidmet
meiner Tochter
Julia Sophie
★18. September 2013

„Iucundi acti labores“

Arbeiten sind angenehm, wenn sie getan sind

Marcus Tullius Cicero
(106 v.Chr. - 43 v.Chr.)



VORWORT

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Christian-Doppler Labor für Zement- und Betontechnologie an der Universität Innsbruck von 2010 bis 2014. Finanziell unterstützt wurde die Forschung durch das Bundesministerium für Familie und Jugend bzw. die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung und dem Modulpartner Schretter & Cie GmbH & Co KG aus Vils/Tirol. Hier gilt mein Dank insbesondere der Geschäftsleitung KR Dr. oec Reinhard Schretter und Herrn Ing. Robert Schretter.

Besonderer Dank gilt dem Leiter des CD-Labors Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roman Lackner für die Unterstützung und Betreuung der Dissertation. Seine konstruktive Kritik und Anregungen haben zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Mein Dank gebührt selbstverständlich auch Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher für die freundliche Übernahme des Koreferates. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Herren Ass.-Prof. Dr. Andreas Saxer und Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Paulini bedanken. Sie hatte jederzeit ein offenes Ohr für technische und persönliche Fragen und haben mich während der gesamten Projektphase begleitet und aktiv betreut. Besonderer Dank gilt Dr. Rudolf Röck der mich als Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung von Schretter & Cie für die Betreuung dieses Moduls vorgeschlagen und auch nach seinem Ausscheiden bei Schretter & Cie weiterhin betreut und unterstützt hat.

Selbstverständlich möchte ich mich auch bei den Wirtschaftspartner bedanken, die mir durch das Bereitstellen von Material zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Stellvertretend möchte ich mich persönlich bei folgenden Personen bedanken: Herrn Bmst. Wolfgang Lenz (Hilti & Jehle), Herrn Mario Eisschiel (KrampeHarex FIBRIN GmbH), Herrn Andreas Schuchter (BASF) und besonders Herrn Paul Tschol (TBA Zams) der sich persönlich dafür eingesetzt hat, dass die Großübungsversuche möglich gemacht wurden.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei meinen Arbeitskollegen bedanken. Insbesondere möchte ich hier den Herren Dr.-Ing. Sandro Weisheit, Dipl.-Ing. Gregor Metzler und Mag. Seraphin Unterberger meinem Dank für die stets gute und harmonische Zusammenarbeit Ausdruck verleihen.

Selbstverständlich gilt mein Dank auch dem technischen Personal des MTI's und den Laboranten der TVFA. Insbesondere möchte ich hier den Herren Matthias Rainer und Daniel Dix für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Laborversuche danken.



Auch möchte ich mich bei meinem Paten Herr Dr.-Ing. Ulrich Kirchner für das Korrekturlesen und seine Anregungen zur besseren Verständlichkeit bedanken.

Meinen Eltern möchte ich für das Ermöglichen meines Studiums der Werkstoffwissenschaften / Baustoffe an der Bauhaus-Universität Weimar danken ohne das diese Arbeit nie möglich gewesen wäre.

Nicht zuletzt will ich mich vor allem bei meiner Frau Martina bedanken, die mir stets beigestanden ist, mich unterstützt hat und stets Verständnis dafür hatte, mir den Freiraum zu lassen, den eine solche Arbeit braucht.

Vils, im Juni 2014

Jürgen Baumgärtner

KURZFASSUNG

Bei rein faserbewehrten Bauteilen wird immer wieder angeführt, dass es keine Faserorientierung gibt und Faserbeton ein isotroper Baustoff sei. Bei Betonen mit niedriger Viskosität und somit hohem Fließvermögen, wie es beim selbstverdichtenden Beton der Fall ist, wurde schon häufig eine Faserorientierung vermutet und auch teilweise beobachtet.

In dieser Arbeit wurde die Faserorientierung im selbstverdichteten Beton untersucht. Hierfür wurde zuerst eine transparente Ersatzflüssigkeit entwickelt, die vergleichbare rheologische Eigenschaften besaß wie der später zum Einsatz kommende Beton. Mit dieser Flüssigkeit war es möglich, die Faserbewegung während des Einfüllvorgangs und des Fließens zu dokumentieren, sowie die Faserbewegung in einer laminaren Strömung zu untersuchen. Die hier gewonnenen Erkenntnisse wurden durch die Versuche mit selbstverdichtendem Beton auf Schnellzementbasis validiert. Der selbstverdichtende Beton wurde zuvor durch den Einsatz bedingten Untersuchungen unterzogen, die über das Maß einer üblichen Erstprüfung hinausgingen.

Bei diesen Betonversuchen wurden neben unterschiedlichen Einfüllverfahren auch der Einfluss der Stahlfaserdimension auf die Faserorientierung und die Bauteilfestigkeit untersucht. Zum Abschluss dieses Abschnitts wurde für die weiteren Versuche Faserdimension und -gehalt festgelegt.

In den Tübbingversuchen wurden Bauteile hergestellt, die in ihrer Dimension etwa einem Drittel jener Tübbinge entsprachen, die in der Unterrinntaltrasse verbaut worden sind. Bei der Produktion dieser Fertigteile wurden zwei unterschiedliche Befüllungsmethoden angewendet. Die Probekörper wurden anschließend im adaptierten 4-Punkt-Biegezugprüfverfahren im Einbauzustand auf ihr Trag- und Nachrissverhalten untersucht.

Abschließend wurden zwei Tübbinge in der Feldfabrik für das Kaunertalkraftwerk hergestellt. Durch diesen Versuch konnte gezeigt werden, dass eine Produktion mit auf Schnellzement basierendem selbstverdichtendem Beton problemlos möglich ist. Die Untersuchung der Faserorientierung an diesen Tübbingungen bestätigte die in den vorangegangenen Laborversuchen festgestellten Ergebnisse.

Aus den durchgeführten Untersuchungen konnten Regeln für die Produktion von Tübbingungen mit faserhaltigem selbstverdichtendem Beton erarbeitet werden um eine für das Bauteil optimale Faserorientierung erreichen zu können.

Stichwörter:

Selbstverdichtender Beton, Stahlfaser, Faserorientierung, Schnellzement, Tübbinge



ABSTRACT

Up to now the common understanding is that purely fiber-reinforced components have no fiber orientation and fiber-reinforced concrete is an isotropic building material. For concretes with low viscosity and consequently high-flow ability, like for example self-compacting concrete, fiber orientation has often been assumed and sometimes even been observed.

In this thesis fiber orientation in self-compacting concrete was investigated. For this purpose a transparent liquid with similar rheological properties as the concrete, which has been used in the experiments, has been developed. With this liquid, it was possible to document the fiber movement during filling and flow, as well as to investigate the movement of the fibers in a laminar flow. Insights gained from these tests have been validated by the experiments with self-compacting concrete based on rapid-setting cement. The self-compacting concrete was previously been subject of conditional tests, which went beyond the standard initial assessment procedure for concrete.

In these concrete experiments various method of filling, the influence of the steel fiber dimension, the fiber orientation and the component strength were examined. At the end of this section the dimension and content of the fibers for further experiments have been defined.

In the following experiments, tubbings have been produced which correspond to approximately one-third of the dimensions of the lining segments installed in the Unterinntaltrasse. Two different filling methods have been applied at the production of these precast. Then the specimens were tested in an adapted 4-point flexural tension test in installed condition to check support and performance after the crack.

Finally two precast segments have produced at the casting yard at Kaunertal power plant construction site. With these experiments it could be shown that production with self-compacting concrete based on rapid-setting cement is feasible. The examination of fiber orientation in these tubbings confirmed the variations observed in the proceeding laboratory tests.

Based on these elaborated studies rules could be developed for the production of fiber reinforced concrete segments with self-compacting concrete in order to achieve components with optimum fiber orientation.

Tags:

Self-compacting concrete, steel fiber, fiber orientation, rapid-setting cement, tubing

INHALT

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung und Motivation	2
2	Grundlagen	7
2.1	Allgemeines zu (Stahl-)Faserbeton	7
2.2	Anwendungen und Normen	10
2.3	Wirkungsweise der Stahlfasern in Beton	14
2.3.1	Fasertypen	14
2.3.2	Verbund zwischen zementgebundener Matrix und Stahldrahtfaser	16
2.3.3	Einfluss des Fasergehalts	24
2.4	Herstellung von Stahlfaserbeton	25
3	Untersuchungen zur Faserorientierung	29
3.1	Grundlagen der Rheologie	29
3.2	Entwicklung einer transparenten Versuchsflüssigkeit	33
3.3	Versuche zur Faserorientierung	38
3.3.1	Balkenform	38
3.3.2	Rohr	44
3.3.3	L- Box	57
3.3.4	Ergebnisse der Versuche	58
3.3.5	Schlussfolgerung	59
4	Selbstverdichtender Beton (SCC) mit Schnellzement SupraCem 45	61
4.1	Einführung zum SCC	61
4.2	Bindemittel SupraCem 45	63
4.3	Rezeptur des SC45-SCC	70
4.3.1	Frischbetoneigenschaften	73
4.3.2	Festbetoneigenschaften	76
4.4	Bewertungsverfahren zur Vergleichbarkeit	79
5	Balkenversuche	87
5.1	Übersicht über die Balkenversuche	88
5.2	Befüllen des Balkens über eine Rinne am Ende	89
5.2.1	Faserorientierung	90
5.2.2	Äquivalente Biegezugfestigkeit	92
5.3	Befüllen des Balkens über eine Rinne in der Mitte	98
5.3.1	Faserorientierung	98
5.3.2	Äquivalente Biegezugfestigkeit	100
5.4	Befüllen des Balkens über eine Rinne in die Schalung	106



5.4.1	Faserorientierung.....	106
5.4.2	Äquivalente Biegezugfestigkeit.....	107
5.5	Befüllen eines doppelt so langen Balken.....	110
5.5.1	Faserorientierung.....	110
5.5.2	Äquivalente Biegezugfestigkeit.....	111
5.6	Befüllen des Balkens über einen Trichter am Ende.....	114
5.6.1	Faserorientierung.....	115
5.6.2	Äquivalente Biegezugfestigkeit.....	115
5.7	Befüllen des Balkens über einen Trichter in der Mitte.....	116
5.7.1	Faserorientierung.....	116
5.7.2	Äquivalente Biegezugfestigkeit.....	117
5.8	Ergebnisse und Schlussfolgerung.....	118
6	Kleintübbingserie.....	121
6.1	Tübbingschalung 1.....	123
6.2	Tübbingschalung 2.....	131
6.3	Zusammenfassung und Resümee.....	146
7	Großtübbinge.....	149
7.1	Betonage.....	151
7.2	Prüfung.....	153
8	Resümee und Ausblick.....	157
9	Literaturverzeichnis.....	161
10	Anhang.....	165

1 Einleitung

Beton ist weltweit ein etablierter Baustoff geworden und hat das Bauen im 20. Jahrhundert eindeutig geprägt. Durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Baustoffes Beton ist es möglich geworden, auch Bereiche für den Massivbau zu erobern die vor Jahrzehnten noch dem Stahlbau vorbehalten waren. Der momentan hohe Stand der Technik im Bereich der Betontechnologie ist unter anderem am Burj Khalifa in Dubai zu erkennen. Für den Turm und die Flügel wurden 180.000 Kubikmeter Beton verbaut. 165.000 Kubikmeter davon wurden hochgepumpt, zuletzt bis in eine Höhe von 606 Metern [1].

Neben Spannbetonbauweise und konventionellem Stahlbeton wurde auch schon immer versucht, die Bewehrung durch zusätzlich eingebrachte Stahlfasern zu reduzieren (Kombibewehrung) oder gar zu ersetzen. Allerdings scheiterte die Einführung von rein faserbewehrtem Beton im konstruktiven Bereich an den fehlenden mechanischen Grundlagen. Somit blieb nur der Weg einer Zulassung im Einzelfall. Regularien und Prüfmethode für eine Anwendung im Bauwesen wurden erstmals in den 1990er Jahren von Organisationen wie zum Beispiel dem Verband deutscher Stahlfaserhersteller e.V. geschaffen [2] [3]. Die Anwendung dieser Merkblätter beschränkte sich jedoch lediglich auf Bauteile mit niedrigem Gefährdungspotential wie z.B. Fundamente, Industrieböden und Verkehrsflächen.

Eine weitere Entwicklung in der Betontechnologie ist der sog. Selbstverdichtende Beton (SVB) bzw. nach heute üblicher englischer Diktion Self-Compacting-Concrete (SCC). Dieser geht aus der Forschung von Professor Okamura und seinem Dissertanten Kazamasa Ozawa in Japan Ende der 1980er Jahre hervor. [4] Ermöglicht wurde dieser Beton durch neue Betonverflüssiger auf Polycarboxylatester (PCE) – Basis. Ein SCC ist in der Lage sich ohne äußere Einwirkung selbst zu entlüften. Somit ist eine optimale Befüllung der Schalung ohne Rüttlereinsatz möglich. Gleichzeitig ermöglicht dieser Beton sowohl das Ausfüllen von schwer zugänglichen Bereichen, als auch komplexen Geometrien.

Um neben dem leichteren Befüllen der Schalung durch SCC auch noch eine Zeiterparnis hinsichtlich der Ausschulfristen zu erreichen, kam bei der vorliegenden Forschungsarbeit der Schnellzement SupraCem 45 (SC 45) des Industriepartners Schretter & Cie zum Einsatz. Dieser Mayenite-haltige Schnellzement besitzt eine Europäische technische Zulassung (Nr. 08/0027). Er ist mit Fruchtsäuren verzögerbar und kann somit für Fertigteilproduktionen eingesetzt werden. Durch das schnellere Erhärten des Betons ergeben sich kürzere Verweilzeiten in der Schalung und damit höhere Taktfrequenzen. Ebenso ist kein zusätzlicher Energieaufwand sowohl für die Wärmebe-



handlung des Betons in der Schalung, als auch zur Erhöhung der Frischbetontemperatur durch Erwärmen des Anmachwassers oder der Gesteinskörnung notwendig. Zudem kann man die Reifezeit der Betonfertigteile von 28 auf 7 Tage reduzieren und benötigt einen geringeren Lagerplatz als bisher.

Gegenwärtig wird in der Fertigteilindustrie bereits SCC oder rein stahlfaserbewehrter Beton eingesetzt. Besonders im Tunnelbau und der Tübbingproduktion gibt es vereinzelte Beispiele, in denen diese Techniken erfolgreich angewandt wurden. Allerdings ist kein Bericht über den Einsatz von rein stahlfaserbewehrten Tübbingungen auf schnellzementbasiertem SCC in der Literatur gefunden worden. Neben den oben beschriebenen Vorteilen, die sich aus der Verwendung dieses Zementes ergeben, würden durch die Verwendung von Stahlfasern sowohl eine flächenmäßige Reduzierung der notwendigen Produktionshalle einhergehen als auch die Arbeitsschritte, die sich durch die Herstellung und Verarbeitung der Armierungskörbe ergeben, wegfallen.

In der vorliegenden Arbeit soll gezeigt werden, in wie weit die fließfähige Konsistenz des SCC auf die Faserorientierung Einfluss nimmt. Aus diesen Erkenntnissen soll eine Produktionsoptimierung für die Tübbingproduktion vorgenommen werden, um einen möglichst hohen Anteil von „gerichteten“ Fasern zu erhalten.

Diese Untersuchungen wurden während der Anstellung im Modul 1 des Christian-Doppler Labors für Zement- und Betontechnologie in Innsbruck vorgenommen.

1.1 Zielsetzung und Motivation

Ziel dieser Arbeit ist es, die Einflussfaktoren für eine zielgerichtete Faserorientierung im selbstverdichtenden Beton zu untersuchen. Zusätzlich sollen die Erkenntnisse dieser Forschungstätigkeit für eine Optimierung der Produktion von rein faserbewehrten Tübbingungen mit SCC auf Basis von Schnellzement SupraCem 45 (SC 45) nutzbar gemacht werden. Damit wäre die Möglichkeit gegeben, Tübbinge produktiver und auf kleinerer Produktionsfläche zu produzieren. Letztendlich soll gezeigt werden, wie man eine optimale Faserverteilung und Faserorientierung in Tübbingungen erreicht.

Die Motivation zu diesem Thema entstand zum einen durch das FFG-Projekt „Tübbingbauweise – Neu“ Nr. 813678 unter der Leitung von Prof. Walter Lukas, an dem der Autor bereits beteiligt war, zum anderen durch Entwicklungsprojekte, die der Autor im Forschungs- und Entwicklungslabor der Firma Schretter & Cie GmbH & Co KG in Vils betreuen durfte.

In dem FFG- Projekt Nr. 813678 wurde versucht, das Betonieren der Fertigteile durch Einpumpen von SCC zu ermöglichen und den Bewehrungsgrad durch das Zuführen der Fasern zu minimieren. Im Laufe des Forschungsprojektes wurde dann auch dazu übergegangen, rein faserbewehrte Bauteile zu produzieren. Durch Anheben der Betonfestigkeiten wurde auch gleichzeitig nachgewiesen, dass trotz einer Reduzierung des

Querschnittes die gleichen Bauteilfestigkeiten erreicht wurden wie mit einem herkömmlich produzierten Tübbing. Nach den Druckversuchen an der Universität Innsbruck war an den Bruchflächen eine Vorzugsrichtung der Fasern visuell wahrnehmbar.

Um herauszufinden, ob die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, die nur durch einzelne geprüfte Tübbinge erhalten worden waren, hinsichtlich der Faserorientierung und Festigkeiten gegeben ist, wurde eine Versuchsserie von sieben Tübbingen im kleineren Maßstab in Vils produziert und geprüft. Die Ergebnisse bestätigten die Annahmen, dass die Fasern eine Orientierung aufwiesen und die Festigkeiten in einer für Beton üblichen Spannweite lagen.

Auch bei diesem FFG-Projekt kam schon der Schnellzement SC 45 zum Einsatz. Er wurde durch Weinsäure auf eine Verarbeitungszeit von 50 Minuten verzögert. Bewusst wurde derselbe Zementgehalt wie bei der Standardrezeptur der Fa. Max Bögl für den Tübbingbau in Brixlegg, nämlich 420 kg/m^3 , verwendet. Die dort angewendete Tübbingrezeptur ermöglichte durch Wärmebehandlung in der Schalung und warmes Anmachwasser eine Ausschallfrist von 8 Stunden. Mit dem SC 45 war dies ohne zusätzliche Energie bereits nach 4 Stunden möglich. Diese Zeit- und Energieersparnis, so wurde dem Autor vom damaligen kaufmännischen Leiter der Feldfabrik versichert, wäre für eine neue Produktion, vorausgesetzt es bestünde genug Erfahrung mit dem Zement, sicherlich sehr interessant.

Allerdings gibt es bereits Tunnelbauwerke die mit rein stahlfaserbewehrten Tübbingen hergestellt wurden. Da wäre zum einen der Channel Tunnel Rail Link (CTRL) in Großbritannien [5], der Oenzbergtunnel in der Schweiz [6] sowie der Tunnel für die Metro Linie 9 in Barcelona [7]. In [8] wird über den „Hobson Bay Abwassertunnel“ in Auckland/Neuseeland berichtet, bei dem eine Einsparung von 10% der Gesamtkosten durch den Einsatz dieser Technologie im Vergleich zu einer Tübbingproduktion mit konventioneller Bewehrung erzielt werden konnte. Diese Tübbinge wurden allerdings mit herkömmlichem Zement und üblichen Rüttelbetonrezepturen produziert.

Da der SCC im Bereich der Fertigteilproduktion eine zunehmende Rolle spielt, ist es von besonderem wissenschaftlichen Interesse, zielsichere Vorhersagen über die Orientierung und Verteilung der Fasern im Bauteil zu treffen. Diese ist durch die Zusammensetzung des SCC's, dem Fasergehalt, Einfüllverfahren und nicht zuletzt von der Konsistenz abhängig. Die oben genannten Einflüsse sollen an einer definierten Mischung untersucht werden.

Im Allgemeinen ist man der Auffassung, dass die Stahlfasern im Beton isotrop und homogen verteilt sind. Dies führt immer zu einem gewissen Anteil von Fasern, die bei einer bestimmten Belastung nicht statisch tragend sind. Mit dieser Arbeit soll gezeigt werden, dass man diesen Anteil von nicht wirksamen Fasern stark reduzieren kann. Um das Verhalten von Fasern während des Fließens beobachten zu können, war es not-



wendig, eine Ersatzflüssigkeit zu entwickeln, welche ein weitgehend ähnliches rheologisches Verhalten wie der Leimanteil des SCC's besaß. Mit dieser Ersatzflüssigkeit wurden verschiedene Einfüllverfahren, so wie das Verhalten von Fasern in einer laminaren Strömung untersucht. Die Untersuchungsergebnisse finden sich in Kapitel 3.

Mit dem Konzept einer Tübbingproduktion mit SCC auf Schnellzementbasis und reiner Stahlfaserbewehrung wäre somit eine Möglichkeit gegeben, eine produktivere, Platz und Energie sparende Herstellung zu verwirklichen. Dies ist besonders bei Stollenbauten im alpinen Bereich von Vorteil. Als möglicher Einsatz dieses Verfahren wurde der Kraftwerksstollenbau des Gemeinschaftskraftwerks Inn (GKI) angenommen. Das in Pfunds ansässige Betonwerk Hilti & Jehle, welches quasi vor Ort ist, wurde daher als möglicher Produktionsort gewählt. Von Vorteil ist, dass dieses Werk auch schon Lieferant des SCC's für die Innenschale des Finstermünztunnels war und daher auf Seiten des Betonproduzenten eine Fachkenntnis für diese Art von Sonderbeton vorhanden ist [9]. Gleichzeitig sind die Silokapazitäten sowie die dort verwendeten Betonzusatzstoffe bekannt. Auf Grundlage dieser Voraussetzungen und den Rezepturen des FFG-Projektes wurde eine SCC-Rezeptur entwickelt. Da es sich bei SupraCem 45 wegen der schnellen Bindezeit und dem erhöhten Sulfatgehalt nicht um einen Normzement nach EN 197-1 sondern nach Europäisch technischer Zulassung ETA 08/0027 zugelassenen Zement handelt, wurden trotzdem in Kapitel 4 neben der Erstprüfung auch weitere Untersuchungen vorgenommen um den Beton vergleichbar mit Betonen nach EN 206-1 zu machen.

Zur besseren Veranschaulichung sind die Bestandteile der Dissertation in Abbildung 1 graphisch dargestellt.

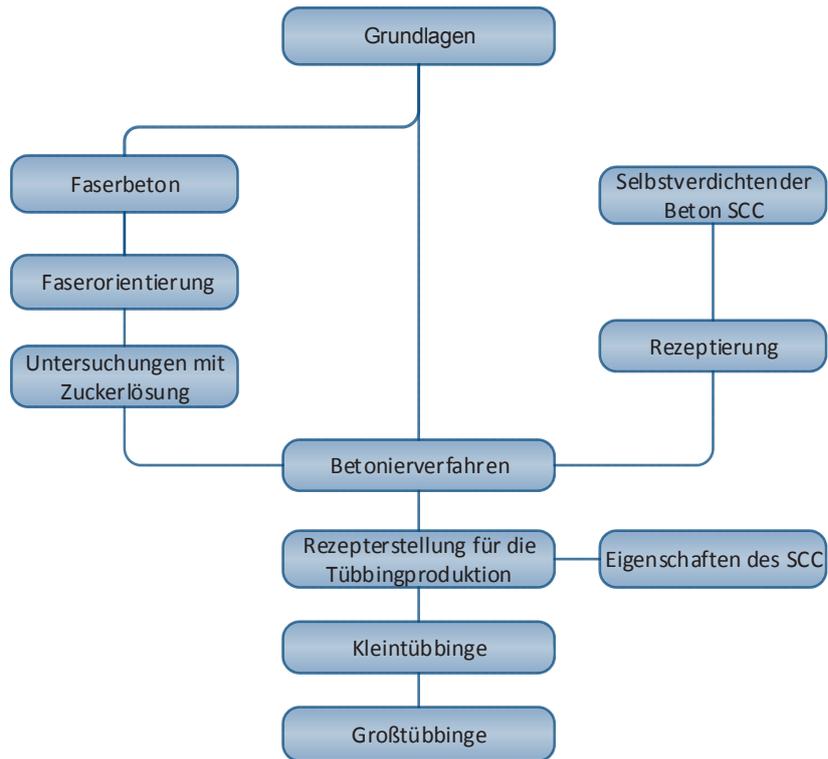


Abbildung 1 Bestandteile der Dissertation



2 Grundlagen

Schon seit jeher wurden Fasern verwendet um Baustoffe tragfähiger zu machen und Risse zu vermeiden. Allerdings handelte es sich nicht um Stahlfasern sondern um organische Naturfasern wie zum Beispiel Tierhaare und Stroh. Diese wurden in Lehm- und ungebrannten Tonziegeln verwendet um bei diesen ein duktileres Materialverhalten zu erreichen. Ein Beispiel für ein aus solchem Material errichtetem Bauwerk ist das 27 Meter hohe Minarett von Agadez welches nun bereits seit über 500 Jahren seine Dauerhaftigkeit beweist [10].

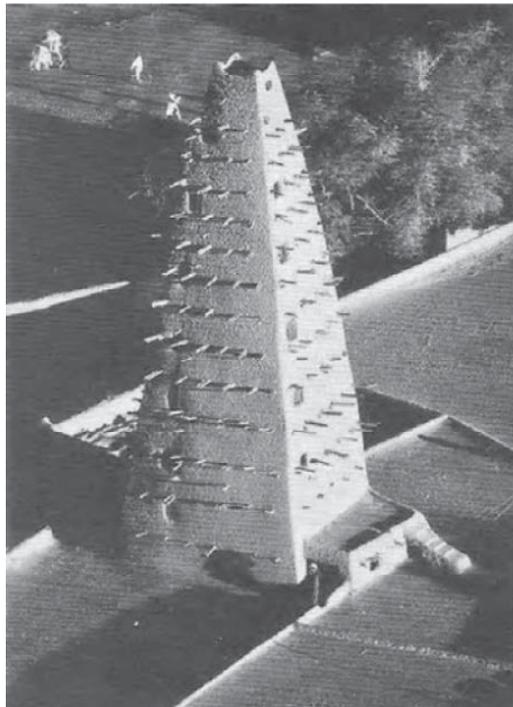


Abbildung 2 Minarett von Agadez [10]

Die Verwendung dieser Faserarten waren allerdings durch die Entwicklung höherfester Baustoffe ähnlich dem Römerbeton, dem sog. „Opus Caementitum“, nicht mehr notwendig. Zugleich war die Festigkeit dieser Fasern geringer als der „neue“ Baustoff und ein höherfestes Fasermaterial stand nicht zur Verfügung [11]. Dies hatte zur Folge, dass das Wissen über den Faserverbundbaustoff, welches von Generation zu Generation weitergegeben wurde, in Vergessenheit geriet.

2.1 Allgemeines zu (Stahl-)Faserbeton

Beton ist ein mannigfaltig einsetzbarer günstiger Baustoff, der je nach Anforderung speziell designet werden kann. Dies ist auch der Grund warum heutzutage die Ausführung der meisten Bauvorhabens ohne Beton zwar denkbar aber nicht wirtschaftlich ist. Besonders in den letzten Dekaden hat es Entwicklungen im Bereich der Betontechnologie gegeben, die das Bauen mit Beton revolutioniert haben. So ist es möglich Betone her-

zustellen die besondere Frisch- und Festbetoneigenschaften aufweisen. Diese entsprechen speziellen Anforderungen, und weisen gleichzeitig eine hohe Dauerhaftigkeit auf. Als Beispiel sollen hier Ultrahochfeste Betone (UHPC), selbstverdichtende Betone (SCC), aber auch die Faserbetone genannt werden.

Dem Vorteil der Vielseitigkeit von Beton stehen aber auch immer Nachteile des Baustoffs gegenüber. Zum einen besitzt Beton eine sehr geringe Zugfestigkeit im Vergleich zur Druckfestigkeit (ca. 10 %), zum anderen ein unvorteilhaftes Bruchverhalten.

Um die Zugfestigkeit eines Betonbauteils erhöhen zu können gibt es letztlich drei Möglichkeiten [12]:

- Baustoffliche Maßnahmen (z.B. durch Zugabe von Reaktionsharzen)
- Aktive Einflussnahme auf den Beanspruchungszustand im Beton (z.B. Vorspannung); Dies ist eher problematisch, da eine Begrenzung oder Vermeidung der Zugspannung dennoch notwendig ist.
- Verbundbauweise; Kombination mit zugfesten Baustoffen

Die gute Verarbeitbarkeit des Betons begünstigt insbesondere die Verbundbauweise und ist daher der zielführende Weg, um die Zugfestigkeit des Bauteils zu erhöhen. Bei dieser Bauweise können nach einem Versagen des Betons die auftretenden Zugkräfte durch die eingebetteten Baustoffe übernommen werden. Somit ist die Zugfestigkeit eines Betonbauteils auch nach einem Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons noch gegeben. Diese eingebetteten Baustoffe werden im Betonbau Bewehrung genannt. Prinzipiell werden drei Arten der Bewehrung unterschieden.

Die Erste ist eine sog. Stab- oder Mattenbewehrung, die vor der Betonage in die Schalung eingebracht wird und daher innerhalb des Bauteils liegt. Vereinzelt können auch an der Oberfläche Gewebegewebe aufgebracht werden die die Aufgabe der Ableitung von Zugkräften übernehmen. Letzteres Verfahren wird allerdings häufig nur in der Sanierung von Betonbauteilen zum Einsatz gebracht.

Die Zweite ist die Faserbewehrung. Die Fasern werden während des Anmischens des Betons diesem zugegeben und mit diesem gleichzeitig in die Schalung eingebracht.

Als dritte Variante der Bewehrung ist selbstverständlich eine Kombination aus beiden vorhergenannten Bewehrungstypen denkbar.

Die einfache und wenig fehleranfällige Produktion von Faserbetonbauteilen führt zwar bei ausreichender Dosierung zu einer Steigerung der Zugfestigkeit und einem Herabsetzen der Sprödigkeit des Betons, beinhaltet allerdings auch eine Reihe von Schwierigkeiten:

- Natürliche Fasern sind für den Einsatz im Beton wegen ihres geringen E-Moduls und der schlechten Hafteigenschaft eher ungeeignet.

Daher wurden Fasern entwickelt, die für die Anwendung in Beton besser geeignet sind. Hierbei unterscheidet man zwischen organischen und anorganischen Fasern. In Abbildung 3 ist diese Aufteilung schematisch dargestellt.

Dass es für die Entwicklung und Optimierung der Fasern einige Zeit bedurfte, mag man daran sehen, dass das erste Patent „Zugabe von metallischen Abfällen zum Beton“ 1874 an *Bernard* verliehen wurde [12], jedoch erst in den 1960er Jahren die ersten Projekte in Stahlfaserbetonbauweise im Kraftwerksbau verwirklicht wurden.

- Auch sind aus betontechnologischer Sicht in der Herstellung und Verarbeitung von Faserbeton einige Besonderheiten zu beachten. Beispielsweise können Fasern die Konsistenz des Betons relativ stark verändern und damit die Betonförderverfahren und den Einbau beeinflussen.

Zudem liegt im Allgemeinen eine homogene Verteilung der Faserorientierung vor. Dadurch ist auch durch einen erhöhten Materialaufwand in der Regel der benötigte Bewehrungsquerschnitt für die Übernahme der Zugkräfte entsprechend einer vergleichbaren stabförmigen Bewehrungen nicht zu erreichen. Jedoch gibt es auch die Auffassung, die beispielsweise *Wietek* [13] vertritt, dass ein Faserbeton nicht als Zweikomponentensystem wie der Stahlbeton gesehen werden kann, sondern als eigener Baustoff verstanden werden muss, der daher eines eigenen Bemessungssystems bedarf.

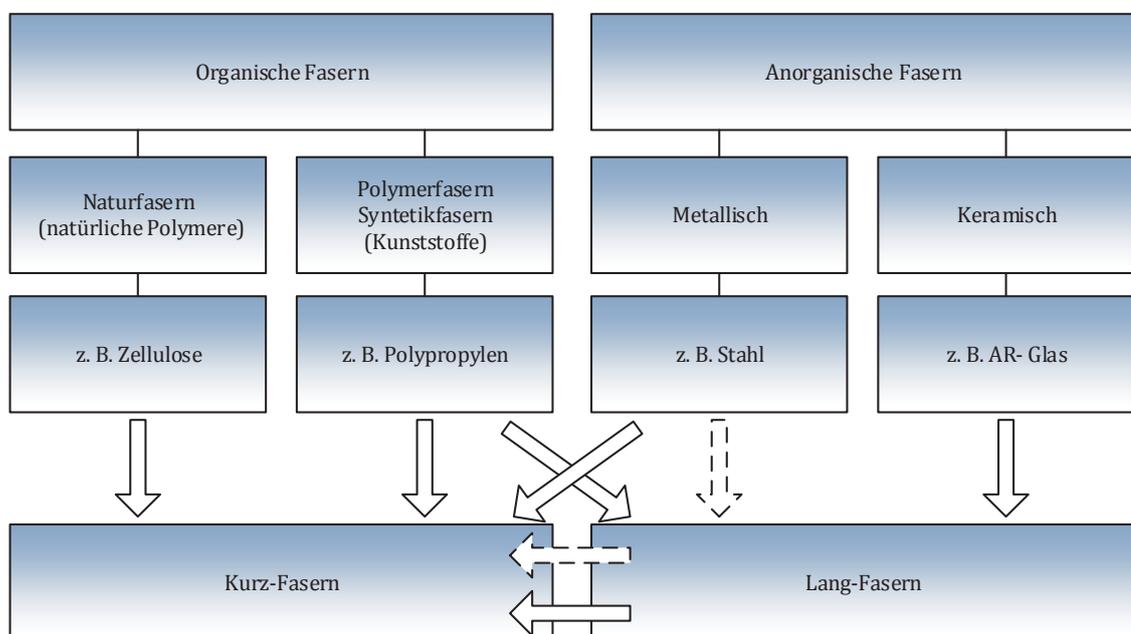


Abbildung 3 Schematische Darstellung der Gruppen unterschiedlicher Faserarten in der Bautechnik [11]



Außerdem können Fasern neben der statischen Wirkweise, auch andere Aufgaben wie Brandschutz oder bessere Verarbeitbarkeit (Reduzierung von Entmischung und „Bluten“) übernehmen. Grundsätzlich ist bei Faserbeton jedoch darauf zu achten, dass es sich hierbei um einen Beton nach Norm (ÖNORM B4710-1; DIN 1045 oder EN 206-1) handelt, der mit Fasern versetzt wird. Von diesem Baustoff wird somit verlangt, dass er mit üblichen bautechnischen Geräten und Mitteln herstellbar und verarbeitbar ist.

Anders verhält es sich mit Faserzementen, deren bekannteste Vertreter wohl Eternit sein dürfte. Hier werden üblicherweise dünne Bauteile in einem speziellen Verfahren hergestellt und nicht durch einen Betonmischer der üblichen Art.

Die signifikanten Vorteile die Stahlfaserbeton besitzt, sollen hier genannt werden:

- Vereinfachung des Bauablaufes (Entfall von Bewehrungsplanung, -einbau, -kontrolle, -abnahme und -lagerung; Vermeidung von Bewehrungsfehlern; leichteres Verdichten des Betons, da keine Rüttelgassen einzuhalten sind)
- Verbesserung des Rissverhaltens (keine tiefe Makrorissbildung, die zu Dauerhaftigkeitsproblemen führt)
- Erhöhte Duktilität sowohl im Zug- als auch im Druckbereich
- Geringere Abplatzneigung an Kanten, da die Fasern auch oberflächennah wirken und Faserbeton eine bis zu 20 % höhere Schlagfestigkeit im Vergleich zu normalen Beton besitzt [14]
- Erhöhte Abriebfestigkeit
- Verbessertes Brandverhalten beim Einsatz von Polypropylen-Fasern
- Verringerung des Schwindmaßes

2.2 Anwendungen und Normen

Der Grund für den geringen Einsatz von Faserbeton in Baukonstruktionen liegt unzweifelhaft an der lange fehlenden Normung und Regelung der Bemessung. Daher beschränkte sich die Anwendung meist auf Bauteile mit geringem Gefährdungspotential sowie an solchen, an denen der Nachweis der Tragfähigkeit im Grenzzustand ohne Berücksichtigung der Stahlfasern geführt werden konnte. Für alle anderen Einsätze von Stahlfaserbeton war in Deutschland, bis zur Einführung der DAfStb Richtlinie „Stahlfaserbeton“ im Jahre 2011, eine Zulassung im Einzelfall oder eine bauaufsichtliche Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBT) notwendig. Bei diesen erteilten Zulassungen wurde allerdings beim Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Lastaufnahme durch die Stahlfasern berücksichtigt.

Allerdings ist auch heute das Haupteinsatzgebiet von Stahlfaserbeton im Bereich von Industrieböden zu sehen. In Abbildung 4 ist eindeutig zu erkennen, dass dies nicht nur in Deutschland sondern auch weltweit der Fall ist. Eindeutig ist dagegen festzustellen,



dass in Deutschland der Anteil im Wohnungsbau von 5 % sehr gering und sicherlich auf die fehlende Normung zurückzuführen ist.

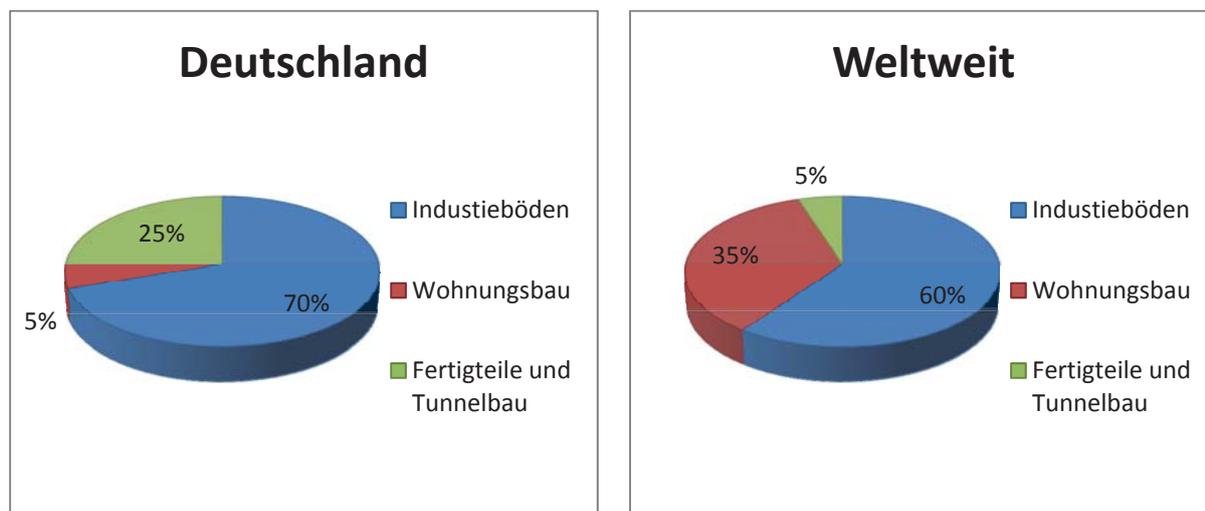


Abbildung 4 Anwendungsgebiete des Stahlfaserbetons [15]

Das Bestreben nach einer normativen Regelung ist allerdings schon relativ alt. Dies ist unter anderem an der Veröffentlichungschronik des Deutschen Beton Vereins (DBV) gut zu erkennen. Das erste DBV Merkblatt „Stahlfaserspritzbeton“ wurde bereits 1984 veröffentlicht. In der Fassung von 1992 wurde das ursprüngliche Merkblatt erweitert und befasst sich allgemein mit der Technologie von Stahlfaserbeton und Stahlfaserspritzbeton. Zudem veröffentlichte der DBV im gleichen Jahr das Merkblatt „Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau“. Bereits 1991 war vom DBV das Merkblatt „Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton“ herausgegeben worden. Diese drei Merkblätter wurden im Jahre 1996 nochmals redaktionell überarbeitet. Im Oktober 2001 wurde in Deutschland durch den DBV das Merkblatt „Stahlfaserbeton“ herausgegeben, welches zum ersten Mal allgemeine Standards für die Bemessung, Herstellung und Prüfung von Stahlfaserbeton festlegte. [14]

Im März 2010 wurde in Deutschland vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) die Richtlinie „Stahlfaserbeton“ veröffentlicht und 2011 baurechtlich eingeführt. Sie bietet nun ein Bemessungsverfahren für Tragwerke des Hoch- und Ingenieurbaus aus unter anderem reinem Stahlfaserbeton. Allerdings werden hier einige Arten von Sonderbetonen ausgeschlossen. Hier wären vor allem Hochfeste Betone (> C 50/60) und Selbstverdichtender Beton (SVB) zu nennen.

In Abbildung 5 sind die momentan nach Anforderung der Bauteile aus Faserbeton anzuwendenden Normen und Richtlinien für Deutschland gezeigt.

Anforderung an das Faserbeton – Bauteil			
↓	↓	↓	↓
Keine (Bauteile mit niedrigem Gefährdungspotential)	baurechtliche	wasserrechtliche	Bau- und wasser- rechtliche
Eingruppierung nach Norm und Regelwerken			
Kein tragendes Bauteile nach DIN 1045	Bauteil nach DIN 1045 und DAfStb –Richtlinie „Stahlfaserbeton“ bzw. Fachnorm ggf. Zustimmung im Einzelfall oder bauaufsichtliche Zulassung	Bauteil nach DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit was- sergefährdenden Stoffen“	Bauteil nach DIN 1045 und DAfStb – Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“
Nachweis			
Nutzung der Biege- zug- (ungerissen) oder Nachrissbiege- zug-festigkeit (ge- rissen)	Nachweise der Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglich- keit	Mindestbewehrung oder Dichtschicht mit Beschränkung der Rissbreiten	Nachweise der Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglich- keit sowie Nachwei- se der Dichtheit und Mindestbewehrung
Beispiele			
<ul style="list-style-type: none"> - Industriefußböden - Kellerfußböden - Verkehrsflächen - Stützmauern bis 1 m Gelände- sprung - Schächte bis 0,9 m Tiefe - Tresorbeton 	<ul style="list-style-type: none"> - Fundament- platten - Sohlplatten - Wände - Deckenplatten - Spritzbeton - Tunnelschalen - Baugruben- und Hangsicherungen - Rohre 	<ul style="list-style-type: none"> - Arbeitsflächen - Auffangwannen - Ableitkanäle - Tankstellenflä- chen 	<ul style="list-style-type: none"> - Tragende Elemente in Bauwerken mit Dichtfunktion (z.B. Sohlplatten, Wände)

Abbildung 5 Anforderungen an Faserbeton-Bauteile, Eingruppierung, Nachweis und Beispiele [16]

Auch auf europäischer Ebene ist man bestrebt, Faserbeton zu normieren. Dies zeigt sich durch die normative Regelung der Fasern in der EN 14889-1 (Stahlfaser) und -2 (Polypropylenfaser). Mit diesen Normen ist der Grundstein für eine CE-Konformitätskennzeichnung gegeben was den Einsatz von Fasern seit 2006 erheblich erleichtert hat. Eine europäische Norm zur Anwendung und Bemessung von Faserbeton gibt es allerdings noch nicht. Dafür gibt es für verschiedene Bauteile und Bauweisen in Faserbeton bereits Anwendungsregeln. Als Beispiel sollen hier Spritzbeton, Rohre und Formstücke aus Stahlfaserbeton und Betonfertigteiltergaragen erwähnt werden.



In Österreich wurde von der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB) im März 2002 erstmals die Richtlinie „Faserbeton“ eingeführt und im Juli 2008 neu überarbeitet. Allerdings ist eine Bemessung für beispielsweise Deckenplatten, Träger, Treppen und Konsolen aus reinem Faserbeton ausgeschlossen. Ähnliche Richtlinien gibt es exemplarisch in der Schweiz (SIA 162/6), in Schweden (Betonrapport 4), in den Niederlande (CUR 35; CUR 36; CUR 42 und CUR 111 E) und in Großbritannien (TR34, Anhang F).

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle darauf verwiesen werden, dass es auch außerhalb Europas bereits Regelwerke für Faserbeton gibt. Beispielhaft sollen hier Japan (JCI-SF4) Neuseeland (NZS 3101 Part 1) und die USA (ACI 544.1R-96; ACI 544.2R-89; ACI 544.3R-08; ACI 544.4R-88; ACI 544.5R-10) genannt werden.

Trotzdem gibt es mittlerweile in Deutschland schon einige Bauvorhaben, bei denen Stahlfaserbeton zum Einsatz kam. Das wohl berühmteste Bauvorhaben ist die Unterwasserbetonsohle am Potsdamer Platz in Berlin [15]. Im Bereich des Tunnelbaus sind im Rhein –Ruhr-Gebiet seit 1988 bereits 4 Tunnelbauvorhaben in 2-schaliger Bauweise durch die Firma Hochtief verwirklicht worden. Hierbei wurden über 40.000 m³ Stahlfaserpumpbeton ohne Qualitätsmängel verbaut. Für das Los 34 in Essen erteilte das Land Nordrhein-Westfalen eine Zulassung im Einzelfall für den 1-schaligen Ausbau mit Stahlfaserbeton-Tübbing [17].

Diese Anwendungen sind jedoch Ausnahmen und können nur dazu dienen zu zeigen, was technisch möglich ist. Die häufigsten Anwendungen sind auf folgende Bereiche begrenzt [14]:

- **Industriefußböden**

Das Hauptanwendungsgebiet des Stahlfaserbetons, das in der Regel nicht in das Tragwerk einbezogen wird und daher nur das Eigengewicht und die Verkehrslasten zu tragen hat, sind die Industrieböden. Außerdem gehen von diesen Bauteilen keine Gefahr für Leib und Leben aus. Zudem wird durch den Einsatz der Stahlfasern zusätzlich zur Erhöhung der Biegezugfestigkeit der Platte auch die Erhöhung der Schlagfestigkeit erreicht.

- **Betonstraßen**

Neben der Verkürzung der Bauzeit um ca. 20 % gegenüber betonstahlbewehrten Straßen besitzt eine aus Stahlfaserbeton hergestellte Fahrbahn ein viel duktileres Verhalten, was zum besseren Ableiten von Schwellbeanspruchungen durch den Gebrauchszustand führt. Dies konnte durch mehrere Versuchsstrecken gezeigt werden. Zudem hat sich gezeigt, dass durch die Erhöhung der Durchrisslast das Tragvermögen erheblich gesteigert werden kann. Dies bedeu-

tet für die Praxis, dass bei niedriger Bauteilhöhe ein höheres Schwerlastaufkommen aufgenommen werden kann.

- **Wohnungsbau**

Hier wird Stahlfaserbeton vor allem für Bodenplatten, Fundamente und Kellerwände eingesetzt. Hier wird der Vorteil der Rissbreitenminimierung vor allem bei WU –Bauteilen ausgenutzt. Häufig wird er aber auch in Kombination mit normaler Stahlbewehrung eingesetzt.

- **Tunnelbau**

Im Tunnelbau werden vor allem Stahlfaserbetone für Spritzbeton, Stahlfaserpumpbeton und für die Tübbingproduktion eingesetzt. Durch die Verwendung von Stahlfaserbetonen kann eine Vereinfachung im Verfahrensablauf erreicht werden, was zu einem Verringern der Bauzeit und somit auch zur Reduzierung der Baukosten führen kann. Ein weiterer Vorteil bei den Fertigteilen ist, dass die erhöhte Schlagfestigkeit zu einer geringeren Ausschussrate durch Transportschäden führt.

2.3 Wirkungsweise der Stahlfasern in Beton

In diesem Abschnitt soll zuerst ein Überblick über die unterschiedlichen Stahlfasertypen gegeben werden. Danach wird der Verbund zwischen zementgebundener Matrix und Stahldrahtfaser erläutert. Für diese Arbeit ist insbesondere die Wirkungsweise von Stahldrahtfasern mit Endverankerung und auch die Abhängigkeit der Orientierung von Bedeutung. Hierbei wird zudem der Einfluss des Fasergehaltes auf das Nachrissverhalten erläutert. Abschließend soll in diesem Kapitel auch noch Grundlegendes über die Herstellung sowie Verarbeitung des Stahlfaserbetons dargelegt werden.

2.3.1 Fasertypen

Die Wirkungsweise der Stahlfaser im Betonbauteil ist vor allem vom Fasertyp abhängig. In den EN 14889-1 werden Stahlfasern nach Material oder Form charakterisiert. Das Fasermaterial wird hierbei in fünf Gruppen unterteilt:

Gruppe I:	kalt gezogener Stahldraht
Gruppe II:	aus Blech geschnittene Fasern
Gruppe III:	aus Schmelzgut extrahierte Fasern
Gruppe IV:	aus kalt gezogenem Draht gespannte Fasern
Gruppe V:	von Stahlblöcken gehobelte Fasern

Die in der Praxis am häufigsten zur Anwendung kommenden Gruppen sind die Gruppen I, II und V. Auch wenn in der Norm „gehobelt“ steht, so sind doch gefräste Fasern (Spanfasern) gemeint.



Diese der Gruppe V zugehörigen Spanfasern werden durch rotierende Werkzeuge von einer Stahlbramme abgearbeitet. Dabei ergeben sich sichelförmige Späne die rotglühend sind und sich durch die Umgebungsluft schnell abkühlen. Vom Materialgefüge her sind sie quasi martensitisch und besitzen daher ein relativ sprödes Bruchverhalten. Charakteristisch für diese Fasern ist, dass sie eine raue Innen- und eine glatte Außenseite besitzen. Diese Fasern werden in der Regel nicht mehr nachbearbeitet und besitzen im Allgemeinen eine Länge von 30 mm und eine Dicke von 0,4 mm sowie eine Zugfestigkeit von ca. 900 N/mm² [11]; [18].



Abbildung 6 Gefräste Stahlfaser (Foto: KrampeHarex)

Die der Gruppe II zugehörigen Blechfasern werden durch Abschneiden eines auf ein Coil gewickelten Blechs gewonnen. Durch den Schneidedruck ist es möglich zusätzlich eine Verformung der Faserenden sowie eine Profilierung der Faseroberfläche zu bewirken. Durch die niedrige Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials (ca. 770 N/mm²) findet sich ihre Hauptanwendung im Estrichbereich.



Abbildung 7 Kaltbandfasern mit Endverhakung (Foto: Krampeharex)

Die am häufigsten im Betobau zur Anwendung kommenden Stahldrahtfasern gehören zur Gruppe I. Für diese Fasern wird ein Draht gezogen (kaltverformt), was zu einem Gefüge führt welches sich gut verformen lässt. Dieser Draht wird dann durch Walzen in die gewünschte Form gebracht. Die EN 14889-1 schreibt dabei keine Formen vor, verlangt aber von jedem Hersteller, dass er die Form der Faser und für jeden Fasertyp die produktionsbedingten Abweichungen angibt. Die drei gängigsten Drahtfasern sind die gewellte Stahldrahtfaser für den Industriebodenbereich (s. Abbildung 8), die Faser mit flachgedrückten Ende für den Spritzbeton (s. Abbildung 9) und die wohl populärste Stahldrahtfaser mit Endverankerung für den Fertigteilbau (s. Abbildung 10).



Abbildung 8 Gewellte Stahldrahtfaser (Foto: Krampeharex)



Abbildung 9 Stahldrahtfaser mit Flachgedrückten enden



Abbildung 10 Stahldrahtfasern mit Endverankerung (Foto: Krampeharex)

Die Zugfestigkeit der Drahtfasern ist von der Stahlgüte abhängig und wird von den Herstellern angegeben. Viele Produzenten bieten ihre Fasern in drei Güten an, die sich durch die Zugfestigkeiten des Materials klassifizieren lassen: In der niedrigen Güte liegt die Zugfestigkeit des Drahtes im Bereich von ca. 1100 N/mm², bei der mittlere Güte im Bereich von ca. 1500 N/mm² und in der hohen Güte im Bereich von 1900 N/mm² bis 2500 N/mm². Letztere kommt allerdings nur selten in hochfesten und ultrahochfesten Betonen zum Einsatz.

2.3.2 Verbund zwischen zementgebundener Matrix und Stahldrahtfaser

Für die vorliegende Arbeit kamen Stahldrahtfasern mit Endverankerung von niedriger Güte der Firma KrampeHarex zum Einsatz. Weshalb die Wirkweise der Fasern mit Endverankerung hier genauer betrachtet werden soll.

Bei glatten Stahldrahtfasern ist die Verbundwirkung in der Betonmatrix durch zwei Zustände charakterisiert. Wenn die Faser beispielsweise eine Endverankerung aufweist, gibt es allerdings noch einen dritten dominierenden Zustand. Dieser Verbund zwischen Matrix und Faser zur Kraftübertragung ist durch folgende Mechanismen charakterisiert [19] [20]:

- **Adhäsion / Haftverbund**

Die Faser ist in der Betonmatrix so eingebettet, dass ein Verbundkörper gebildet wird. Dadurch werden Verformung von Faser und umgebenem Zementstein ge-

meinsam und gleichmäßig vorgenommen. Solange die Haftfestigkeit, die auf chemischen und physikalischen Bindungen beruht, unterschritten wird, herrscht eine elastische Scherverbindung zwischen Matrix und Faser. In diesem Zustand ist der Kontaktbereich Zementstein-Faser frei von Rissen. Im Allgemeinen ist der Haftverbund von Stahlfasern im Beton eher niedrig, kann aber nach den Untersuchungen von Naaman [21] mit der Zugabe von adhäsiven Mitteln wie zum Beispiel Latex verbessert werden. (I in Abbildung 11)

- **Reibung**

Wenn die eingeleitete Kraft größer als der Haftverbund ist, treten Risse im Grenzbereich zwischen Faser und Matrix auf. Die Faser beginnt sich aus der Matrix zu lösen. Dieser Prozess wird auch Debonding genannt. Die Kraft wird nun nicht mehr ausschließlich über den Haftverbund sondern auch über eine Reib- Schlupf- Beziehung übertragen. Der Prozess der Rissbildung in der Grenzschicht wird nun fortgesetzt bis zum Erreichen der maximalen Auszugskraft. Wenn diese erreicht ist, beginnt der Prozess des Ausziehens der Faser. Es liegt nun kein Haftverbund mehr vor und die Faser wird nun unter so gut wie konstanter Reibungsspannung aus dem Zementstein gelöst. Der Reibungswiderstand ist von der Oberflächenbeschaffenheit der Faser abhängig. (IV in Abbildung 11)

- **Formverbund**

Ist die Faser nicht stabförmig, sondern besitzt eine geometrische Verformung wie zum Beispiel eine Endverankerung, so tritt nach den ersten Schlupferscheinungen ebenfalls eine mechanische Verzahnung auf. Diese leistet einen zusätzlichen kraftschlüssigen Widerstand gegen das Herausziehen der Faser. Die Größe des Widerstandes ist dabei von der Geometrie der Verformung, der Stahlgüte sowie von der Festigkeit der Matrix abhängig. Der Übergang zum Reibungsverbund ist erst nach vollständigem Aufbiegen der Verformung im Auszugskanal gegeben. (II und III in Abbildung 11)

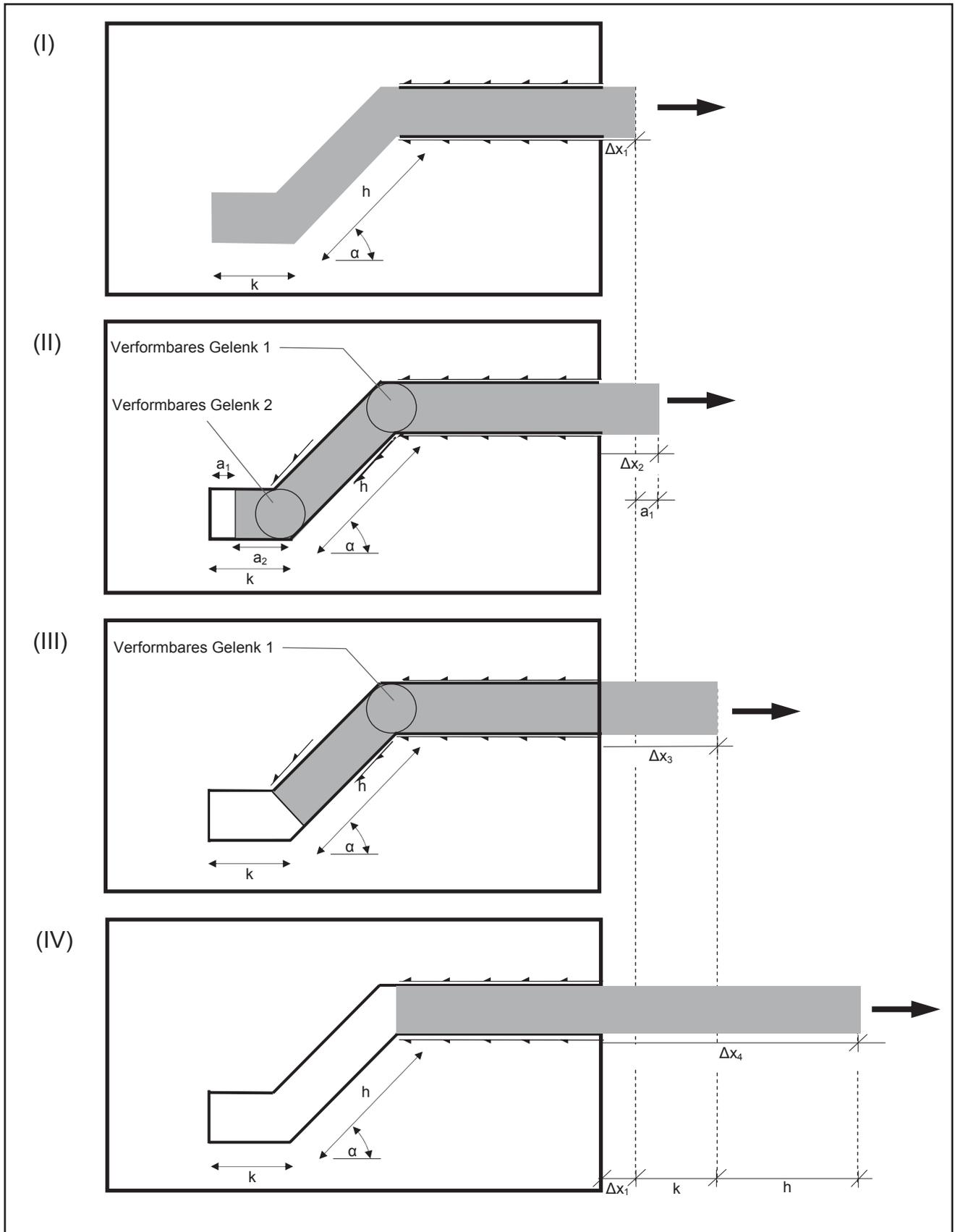


Abbildung 11 Auszugsverhalten einer Faser mit Endverankerung [19]

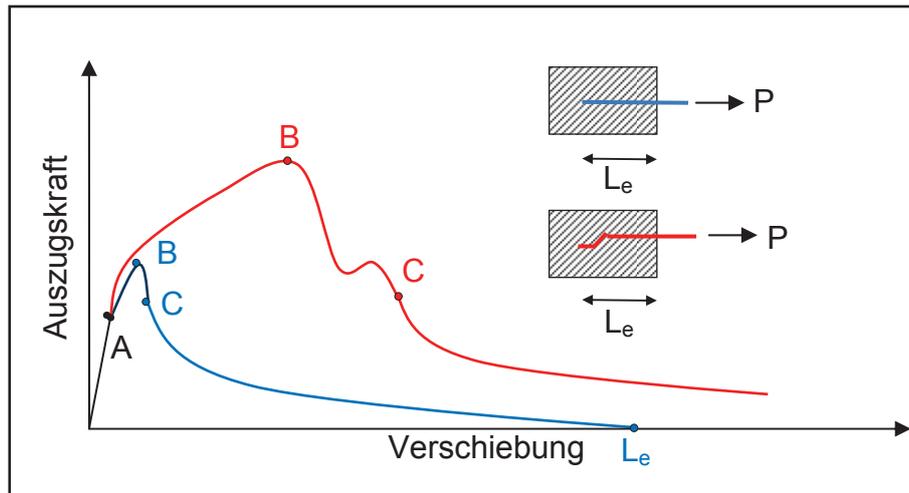


Abbildung 12 Auszugsverhalten von geraden (blau) und endverankerten (rot) Drahtfasern [22]

Um diesen Unterschied zwischen einer Faser mit und einer ohne Endverankerung in ihrer Leistungsfähigkeit zu veranschaulichen, ist in Abbildung 12 das Auszugsverhalten zweier Drahtfasern in einem Kraft- Verschiebungs-Diagramm schematisch dargestellt. Für beide Fasertypen gilt der gleiche Haftverbund vom Ursprung bis Punkt A. Nach diesem Punkt tritt bei beiden Fasern das Ablösen von der Matrix, das sogenannte Debonding, statt. Dieser Prozess startet an der Außenkante und setzt sich nach innen fort. An den gelösten Stellen geht der Haftverbund in den Reibverbund über. Nach dem Punkt C wirkt nur noch die Reibung die bei zunehmender Auszugslänge mangels verbleibender Oberfläche immer geringer wird. Bei vollständigem Auszug der Einbettungslänge (bei der geraden Faser: L_e) sinkt somit die aufnehmbare Kraft letztendlich auf Null.

Bei der endverankerten Faser wirkt nach dem Verlust des Haftverbundes gleichzeitig der entstehende Formverbund, der zusätzliche Kraft aufnimmt. Diese Kraft wird durch die Kaltverformung der Faser absorbiert. Die Faser wird aus dem Kanal durch ständige plastische Verformung herausgezogen. Beim dazugehörigem Diagramm der Abbildung 12 (rote Kurve) fallen zwei Maxima auf. Das Erste beim Punkt B ist erreicht, kurz bevor die Faserverformung um das Verformungsgelenk 2 vollständig abgeschlossen ist, und die Verschiebung die Länge $\Delta x_3 = \Delta x_1 + k$ erreicht hat (vergleiche III in Abbildung 11). Gleiches gilt selbstverständlich auch für das zweite Maximum. Hier wird die Deformation um das Verformungsgelenk 1 bis zum Punkt C abgeschlossen und die Streckung der Faser erreicht die Länge $\Delta x_4 = \Delta x_1 + k + h$. Die mathematische Beschreibung dieses mechanischen Ausziehverhaltens der Faser findet sich bei *Alwan et al.* in [19]. Hier wird ein Modell zweier reibungsbehafteter Umlenkrollen beschrieben, über die die Stahlfaser gezogen wird. Nach dem Punkt C gelten die gleichen Bedingungen wie bei der geraden Drahtfaser.



Diese Beschreibung des Formverbundes gilt allerdings nur, wenn die Endverankerung der Faser mit ausreichender Länge in der Matrix steckt und sich der Bereich zwischen A und C vollständig ausbilden kann. Ist die Verankerung zu nah an der Oberfläche oder die Betonfestigkeit zu niedrig, kann keine plastische Verformung der Faser stattfinden. Es fehlt dann der Widerstand, der für die Ausbildung der Verformungsgelenke nötig ist. Stattdessen bilden sich Risse die zu einem keilförmigen Ausbrechen um die Faser führen und zu einem sofortigen Abfall der aufnehmbaren Kraft führen. Als Anhaltspunkt für die notwendige Einbindelänge (L_e) können die von *Naaman* in [22] angegebenen 6 mm angenommen werden. Es bleibt jedoch darauf hinzuweisen, dass die Einbindelänge abhängig von Beton-, Stahlgüte und Fasergeometrie ist.

Der oben beschriebene Fall, der in Krafrichtung stehenden Faser, stellt einen Sonderfall da. Viel häufiger treten allerdings Fälle auf, in denen die Fasern einen Neigungswinkel (Winkel der mit dem Lot zur Rissfront eingeschlossen wird) besitzen. In diesen Fällen entstehen zwei zusätzliche Verformungsgelenke die zu einer Steigerung der aufnehmbaren Kraft führt und durch die Verformungsenergie abgebaut werden kann. In den Randbereichen zwischen den neuausgebildeten Gelenken und der Rissfront wird in der Regel mit Matrixmaterialabplatzungen zu rechnen sein. Dieser Materialverlust verkürzt damit die Auszugslänge. Gleichzeitig muss die Faser, nach der Reduzierung der Auszugslänge, immer noch die notwendige Einbindelänge besitzen, um ihre volle Wirksamkeit zu haben. Die Größe dieser Abplatzungen ist allerdings entscheidend von der Güte des umschließenden Materials abhängig.

In Abbildung 13 ist dieser Vorgang grafisch in drei Stufen dargestellt.

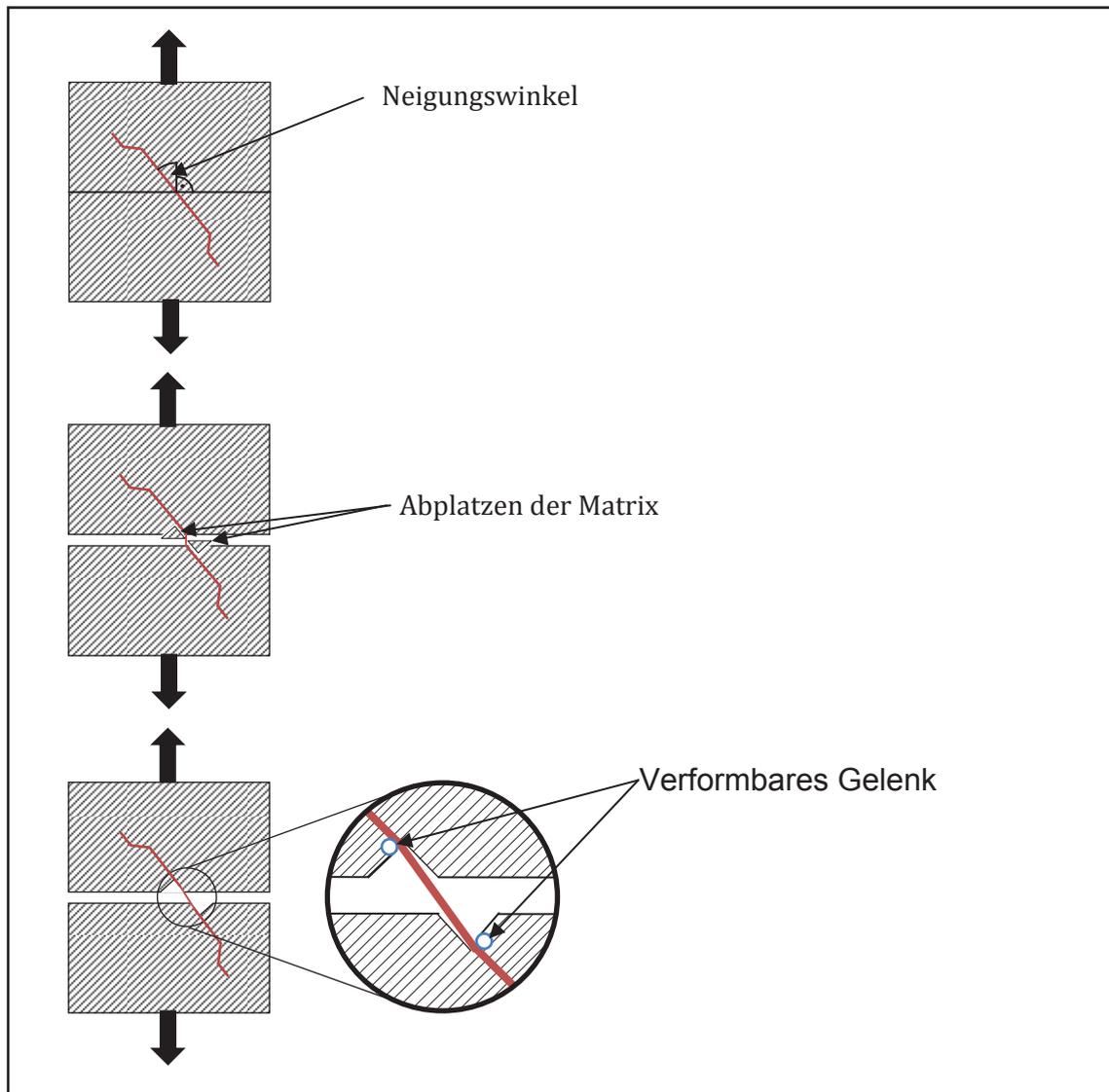


Abbildung 13 Schematische Darstellung des Herausziehens einer geneigten Faser mit Abplatzungen an beiden Seiten der Gerissenen Oberfläche

Robins et al. [20] zeigen durch Versuche, dass der wirksamste Neigungswinkel zwischen 10° und 30° liegt. Allerdings ist schon bei einem Winkel von 30° die Gefahr eines Faserrisses gegeben. Dies liegt darin begründet, dass mit größer werdendem Neigungswinkel die Umlenkung an den neu gebildeten verformbaren Gelenken steigt und zusammen mit der Endverankerung der Faser die aufnehmbare Zugfestigkeit der Faser überschritten wird.

In der oben genannten Arbeit konnte zudem gezeigt werden, dass, wenn die Fasern ausgezogen werden, es zu Laststeigerung von bis zu 20% gegenüber Fasern mit einem Neigungswinkel von 0° kommt.

Ebenfalls wurde in dieser Veröffentlichung durch Faserauszugverfahren festgestellt, dass die eingebettete Länge der Faser entscheidend für das Auszugs- bzw. Reißverhal-



ten der endverhakten Faser ist. Es konnte gezeigt werden, dass die Einbettung 10 bis 20 mm betragen muss, damit die volle Traglast aufgenommen werden und die Verformungsarbeit durch die Faser nutzbar gemacht werden kann. Als Anhaltspunkt für die mindestens benötigte Einbettungslänge gilt die doppelte Länge der Endverankerung (4-5 mm).

Ein weiterer wichtiger Punkt bei den Untersuchungen von *Robins et al.* [20] war, dass das Auszugsverhalten mehr durch die Stahlqualität der Faser und der Faserorientierung, als durch die Güte des Betons beeinflusst wurde. Lediglich bei Einbettungen von 5 mm, wo die Verformungsarbeit der Endverankerung nicht wirksam wurde, konnte keine Abhängigkeit von Orientierung und Matrixfestigkeit festgestellt werden. Vielmehr scheinen in diesem Fall die eingebettete Länge der Faser und die Art des Matrixversagens maßgebend zu sein.

Die hier betrachtete Wirkweise einer Faser in Beton ist jedoch, um in der Praxis Anwendung zu finden, in Betonbauteilen zu erproben. Hier ist es um einiges schwieriger, konkrete Faserorientierungen zu generieren. So ist bei der Auswahl der Faser vor allem darauf zu achten, dass die Faserlänge immer das Doppelte des verwendeten Größtkorns betragen sollte um eine homogene Verteilung der Fasern zu garantieren. Durch diese Maßnahme kann einer Agglomeration der Fasern, der sog. Igelbildung, vorgebeugt werden. Diese „Igel“ sind als unerwünschte Inhomogenität im Bauteil zu sehen, welche den Lastabtrag negativ beeinflussen.

Allerdings gibt es Inhomogenitäten in Bauteilen die sich nicht verhindern lassen. So wird die freie Orientierung der Faser im Bereich der Schalkante auf eine zweidimensionale und in den Kanten sogar auf eine eindimensionale Orientierung begrenzt. Aber nicht nur durch die Schalung sondern auch durch die Verfahren kann es zu einer Beeinflussung der Faserorientierung kommen. Beim Spritzbeton ist beispielsweise eine überwiegend zweidimensionale Faserorientierung festzustellen, die eine Ebene parallel zu der bespritzten Oberfläche einnimmt. [23] Aber auch bei selbstverdichtenden Faserbetonen wurde bereits eine Faserorientierung in Fließrichtung festgestellt. So wurde von *Empelmann und Teutsch* [24] in Untersuchungen festgestellt, dass mit selbstverdichtenden Faserbeton hergestellte Balken, die stehend betoniert worden waren, nur etwa 55 bis 65 % der Nachrissfestigkeit besaßen, als die liegend betonierten Balken, die aus demselben Beton hergestellt worden waren.

Mittlerweile werden Faserbetone auch schon für konstruktive Stahlbetonbauteile eingesetzt und ersetzen hierbei teilweise oder gar vollständig die Querkraft- und Biegezugbewehrung. Um jedoch einen optimalen Lastabtrag durch die Fasern in einem Bauteil zu gewährleisten ist nach [12] eine eindimensionale oder zumindest eine zweidimensionale Orientierung mit hohem Faserorientierungsbeiwert η erforderlich.

Dieser Faserorientierungsbeiwert η , der die Lage der Faser in der Matrix abbildet und somit die Orientierung zur Auszugrichtung berücksichtigt, ist das Verhältnis der projizierten Einbindelänge zur tatsächlichen Einbindelänge. (s. Abbildung 14) Somit wäre ein Orientierungsbeiwert von 1 bei Fasern gegeben, die in Kraftrichtung ausgerichtet sind und einen Neigungswinkel von 0° besitzen.

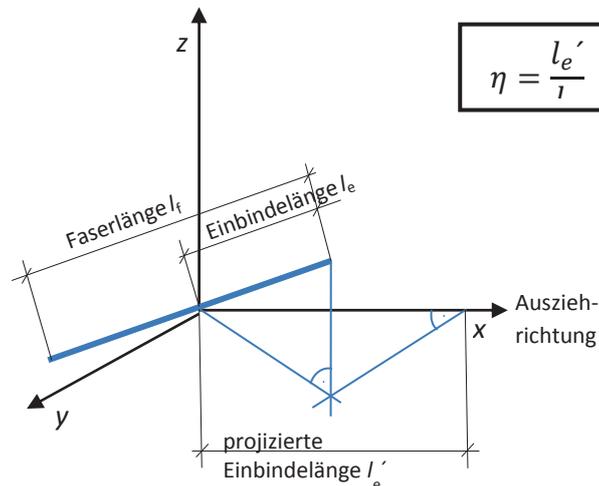


Abbildung 14 Schematische Darstellung der projizierten Einbindelänge [12]

Mit der Multiplikation von η mit der aufnehmbaren Zugspannung durch die Fasern, können Randbedingungen wie Bauteilgeometrie, Herstellungsverfahren, etc., welche eine bestimmte Orientierung der Fasern beeinflussen, berücksichtigt und somit die Tragfähigkeit des Stahlfaserbetonteils realitätsnah abgeschätzt werden. In [12] werden für die Orientierungsbeiwerte folgende Spektren angegeben:

- Dreidimensionale Orientierung
 $0,200 \leq \eta_{3D} \leq 0,667$
- Zweidimensionale Orientierung
 $0,375 \leq \eta_{2D} \leq 0,785$
- Eindimensionale Orientierung
 $0,825 \leq \eta_{1D} \leq 1,000$

Die logische Konsequenz aus den oben angeführten Erkenntnissen war, dass sich dieser Faserorientierungsbeiwert η in Form des Abminderungsfaktors κ_F^f in der *Richtlinie Stahlfaserbeton des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb)* wiederfindet. In [25] werden daher zwei Beiwerte zur Minderung der Nachrissfestigkeit vorgeschrieben. Standardmäßig ist dieser Faktor mit 0,5 anzunehmen. Nur wenn es sich um ein ebenes, liegend betoniertes flächenhaftes Bauteil (Bauteilbreite > 5-mal die Bauteilhöhe) handelt, darf für die Biege- und Zugbeanspruchung $\kappa_F^f = 1,0$ angenommen werden. Somit wird den Erkenntnissen Rechnung getragen, dass bei dünnwandigen Bauteilen die Faserorientierung einen immensen Einfluss hat. Die Erkenntnis, dass diese Effekte durch



sehr fließfähige bis selbstverdichtende Betone sowie feinteilreichen Betone noch verstärkt werden, wurde allerdings noch nicht in Normen berücksichtigt, aber in [12] genannt.

2.3.3 Einfluss des Fasergehalts

Da die Fasern, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, die Aufgabe besitzen bei Rissbildung die Zugkräfte zu übertragen, ist es nicht verwunderlich, dass es von entscheidender Bedeutung ist, wie viele Fasern an der Bruchstelle für die Lastübertragung zur Verfügung stehen. Daher wird das Nachbruchverhalten des Faserbetons von der Größe des Fasergehaltes bestimmt. Wie in der Betontechnologie üblich, wird auch der Stahlfasergehalt V_f in kg/m^3 angegeben. Wenn die Fasermenge gerade ausreichend ist, um die auftretenden Zugspannungen aufzunehmen, spricht man von dem kritischen Fasergehalt V_{crit} . Für diesen kritischen Fasergehalt werden in der Literatur unterschiedliche Mengenangaben erwähnt. So wird zum Beispiel in [26] 100 bis 200 kg/m^3 und in [10] über 60 kg/m^3 genannt. Da der benötigte Fasergehalt zum Übertragen der Last auch vom Fasertyp und der Faserorientierung abhängig ist, ist eine Abschätzung sicher richtiger als ein absoluter Wert. In [27] ist eben eine solche angegeben:

$$V_{crit} \approx \frac{1}{\eta} \cdot \frac{f_{t,M}}{\tau_m} \cdot \frac{d}{l} \quad (1)$$

In dieser Gleichung findet neben dem in Kapitel 2.3.2 bereits erläuterten Faserorientierungsbeiwert η , die Zugfestigkeit der Matrix $f_{t,M}$, die mittlere aufnehmbare Verbundspannung τ_m und das Längen-Dickenverhältnis der Faser $\frac{l}{d}$ Berücksichtigung. Dies bedeutet, dass neben der Faser und dem Betonierverfahren der verwendete Beton ebenfalls das kritische Faservolumen beeinflusst und sich daher allgemeine Aussagen über das kritische Faservolumen verbieten, da nicht jeder Beton, auch wenn er der gleichen Festigkeitsklasse angehört diese gleichen Werte liefert.

Dennoch kann gesagt werden, dass mit Fasergehalten, die über dem kritischem Fasergehalt liegen, ein Ansteigen der Last nach dem Erstbruch festzustellen ist, während Fasermengen unterhalb von V_{crit} mit zunehmender Dehnung nur noch geringere Lasten im äquivalenten Biegezugversuch aufnehmen können. (vgl. Abbildung 15)

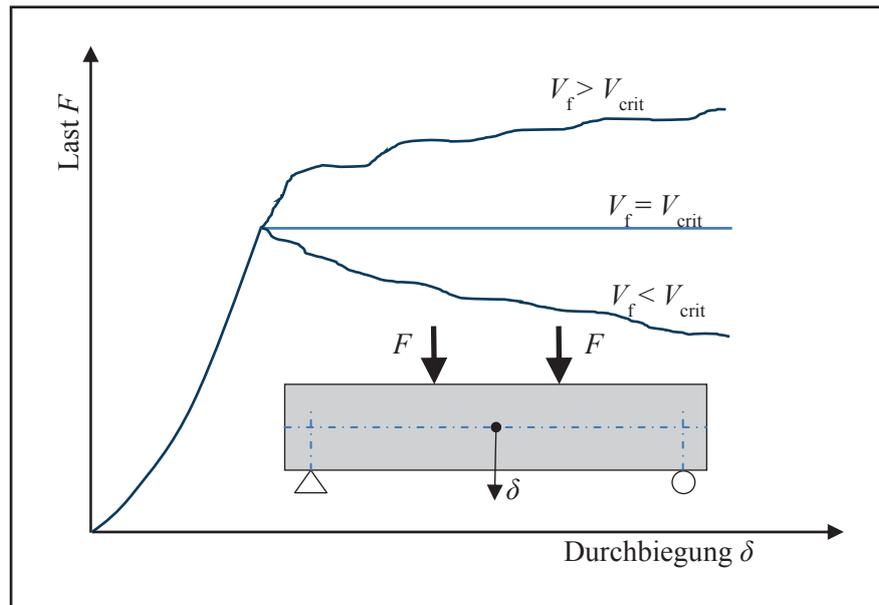


Abbildung 15 Einfluss des kritischen Fasergehalts V_{crit} auf die Verformungslinie [12]

Von *Holschenmacher et. al.* [12] wird aber auch darauf hingewiesen, dass trotz der Verwendung von gleichen Fasergehalten und –typen geringe Abweichungen in der Faser-Verteilung und Faserorientierung einen starken Einfluss auf die Biegezugfestigkeit und das Arbeitsverhalten besitzen können. Daher wird geraten, die relevanten Eigenschaften des Betons nur von Proben zu gewinnen, die aus Faserbeton bestehen, der für den Einbau vorgesehen ist. Angaben von Herstellern über erreichte Tragfähigkeiten mit definierten Fasergehalten können lediglich als Richtwerte dienen.

2.4 Herstellung von Stahlfaserbeton

Üblicherweise kommt Stahlfaserbeton als Rüttelbeton und Spritzbeton zur Anwendung. Wobei unter Rüttelbetonen auch weiche und fließfähige Konsistenzbereiche verstanden werden. Zudem gibt es noch Sonderverfahren wie z.B. SIFCON, bei dem der Hohlraum zwischen ausgestreuten Fasern mit einem Vergussmörtel in einem zweiten Arbeitsschritt ausgefüllt wird. Für den üblichen Stahlfaserbeton ist es, wie schon in Kapitel 2.3.2 erwähnt, von entscheidender Bedeutung, dass die Fasern einzeln und nicht als Konglomerate in der Matrix vorliegen. Um dies zu erreichen, ist ein herkömmlicher Beton zu modifizieren und die Faserzugabe zu optimieren.

Bei der Modifikation von Betonen für die Verwendung als Stahlfaserbeton ist darauf zu achten, dass der Leimgehalt höher als bei normalen Rüttelbetonen ist. Diese Änderung ist besonders bei mittleren und hohen Fasergehalten zwingend notwendig. Dies wird zum einen durch höhere Bindemittelgehalte und zum anderen durch einen erhöhten Feinanteil der Gesteinskörnung erreicht. *Breitenbücher* gibt in [28] die in Tabelle 1 aufgeführten Richtrezepturen für Stahlfaserbeton an:



Tabelle 1 Richtrezepturen für Stahlfaserbeton nach [28]

	Größtkorn 8 mm	Größtkorn 16 mm	Größtkorn 32 mm
Bindemittelgehalt [kg/m ³]	350 ... 590	300 ... 550	280 ... 420
w/z-Wert [-]	0,35 ... 0,45	0,35 ... 0,50	0,35 ... 0,55
Feinanteil (bis 2 mm) im Zuschlag [Vol.-%]	45 ... 60	45 ... 55	40 ... 50
Fasergehalt [Vol.-%]	0,4 ... 1,5	0,3 ... 1,0	0,3 ... 0,8

Um ein verbessertes Verformungs- und Rissverhalten zu erzielen, ist es wichtig, dass man mindestens einen Stahlfasergehalt von 25 kg/m³ verwendet. Bei geringerer Dosierung stellt sich nahezu keine Verbesserung der Performanz ein. Die zur Anwendung kommende Fasermenge richtet sich sowohl nach der zukünftigen Beanspruchung des Bauteils, als auch nach der Einmischbarkeit in den Beton. Nach [28] ist bei Fasermengen von 80 bis 100 kg/m³ eine erhöhte Gefahr von Igelbildungen gegeben. Einen weiteren Einfluss auf die Igelbildung stellt die Schlankheit der Faser dar. Hierbei ist jedoch das Längen (l_f) zu Dicken (d_f) Verhältnis entscheidend. Die im Stahlfaserbeton üblicherweise zum Einsatz kommenden Stahldrahtfasern sind zwischen 15 und 65 mm lang und besitzen eine Dicke von 0,4 bis 1,0 mm. Nach *Breitenbücher* [28] sind l_f/d_f – Verhältnisse von 30 bis 100 als unproblematisch zu sehen. Fasern mit Verhältniswerten von größer als 100 besitzen allerdings die ungewollte Eigenschaft, sich durch den Mischprozess zu verbiegen und somit wieder Igelbildungen zu ermöglichen. Aber auch die Homogenisierung im Beton wird durch den Fasertyp beeinflusst. So haben sich vor allem glatte Fasern mit Endverankerung und für den Spritzbeton glatte Fasern mit flachgedrückten Enden als vorteilhaft erwiesen. *Breitenbücher* weist ebenfalls darauf hin, dass gewellte Fasern oder solche mit konischen Köpfen trotz vorheriger guter Verankerung im Beton in Pumpleitungen immer wieder zu Verstopfungen führen. Dennoch kann allgemein behauptet werden, dass homogen im Beton befindliche Fasern nach dem Mischen durch den Betonierprozess nicht mehr zu Igeln agglomerieren können. Die Ausnahme dieses Postulats tritt bei Betonförderungen durch Pumpen auf.

Da mit steigendem Fasergehalt und l_f/d_f – Verhältnis die Konsistenz des Betons abnimmt, tritt häufig der Fehler auf, dass dem Beton auf der Baustelle noch Wasser hinzugefügt wird. Oft sind Faserbetone, die von der optischen Bewertung über den Ausbreittisch als nicht pumpbar gelten, dennoch problemlos pumpbar, da sie ja über einen höheren Leimgehalt als herkömmliche Betone verfügen. Wenn nun einem Stahlfaserbeton zusätzliches Wasser zugefügt wird, führt es zu einer weicherer Konsistenz aber gleichzeitig steigt die Gefahr der Separierung des Materials durch den Pumpvorgang. Dadurch können sich wiederum Faseragglomerate bilden die zu Verstopfungen

gen in den Leitungen führen. Um Stahlfaserbeton problemlos fördern zu können, werden in [28] folgende zu beachtende Aspekte aufgeführt:

- Die Betonpumpe sollte hinsichtlich Volumen und Druck steuerbar sein.
- Pumpenleitungen sollten einen Durchmesser von mindestens 150 mm besitzen.
- Flexible Schläuche sollten – mit Ausnahme eines kurzen Endstücks – vermieden werden.
- Verengungen und Krümmer sollten in der Pumpleitung weitgehend vermieden werden.
- Auf dem Einlauftrichter der Betonpumpe sollte ggf. ein Sieb mit der Maschenweite von etwa 50 x 75 mm angeordnet werden, um dort vorhandene Igel vor dem Eintreten in die Pumpleitung aussortieren zu können.
- Keine zu „nasse“ Mischung in die Pumpe einbringen.

Wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben, ist der Wahl der Gesteinskörnung besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Hier ist nicht nur die feine Fraktion von Bedeutung sondern auch das gewählte Größtkorn. So beeinflusst vor allem dieses den Abstand, den die einzelnen Fasern voneinander einnehmen. Wenn das Größtkorn sehr groß ist, kann es zu Faserkonzentrationen führen und eine homogene Verteilung ist nicht mehr gewährleistet. Auch ist drauf zu achten, dass die Faser den Bereich des Größtkorns überspannen kann. Als Faustformel kann gelten, dass die Faserlänge etwa dreimal die Größe des Größtkorns besitzt. Aus dieser Regel ging auch die Empfehlung hervor, lediglich Betone mit einem Größtkorn von 16 mm zu verwenden.

Des Weiteren wird in [12] festgestellt, dass mit steigendem Anteil der groben Gesteinskörnung die einmischbare Fasermenge sinkt und die Gefahr von Igelbildung steigt. Daher wird auch hier empfohlen, bei hohen Fasergehalten keine Ausfallkörnungen zu verwenden, da hier der Anteil der groben Gesteinskörnung am höchsten ist.

Ein weiterer Effekt der Fasern ist, dass die Luft im Beton weniger gut ausgetrieben werden kann als bei normalen Rüttelbetonen. Dies beeinflusst zum einen die Verdichtungsdauer bzw. die Anordnung von Rüttelgassen, zum anderen ist besonders bei der Zugabe von Luftporenbildnern zu berücksichtigen, dass diese nicht überdosiert werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Herstellung von Faserbeton ist der Zeitpunkt der Faserzugabe. Üblicherweise wird im Transportbetonwerk der fertige Beton gemischt und zum Schluss die Stahlfasern hinzugegeben. Die Faserzugabe kann hierbei in den Mischer oder in den Fahrmischer erfolgen. Wenn die Fasern in den Mischer hinzugegeben werden, kann dies gleichzeitig mit oder nach der Zugabe des Fließmittels erfolgen. Allerdings ist von entscheidender Bedeutung, welcher Mischertyp verwendet wird. So haben sich Wellenmischer als deutlich bessere Aggregate zur Herstellung von Faserbeton erwiesen als Planetenmischer.

Letztere haben in der Regel Abstreifer, die die Anhaftungen an der Außenwand des Mischbehälters beseitigen und die Bewegung des Mischguts gewährleisten sollen, an denen sich häufig Igel bilden. Diese werden mit zunehmender Mischzeit größer und zahlreicher und können durch Wirbler und Mischwerkzeuge nicht mehr vereinzelt werden. Diese Gefahr ist besonders bei hohen Fasergehalten gegeben.

Eine andere Art der Faserzugabe ist die direkte Zugabe der Fasern in die Fahrmischertrommel. Hier haben sich nach [28] vor allem Anlagen, die nach dem „Wäschetrockner“-Prinzip funktionieren, bewährt. Hierbei werden die Fasern mit Druckluft über einen Rüssel in die Einfüllöffnung des Fahrmischers eingeblasen und gewährleisten somit eine mehr oder weniger gute Vereinzelnung der Fasern beim Auftreffen auf dem Beton. Die Fahrmischertrommel muss sich dabei stets mit der höchsten Geschwindigkeit drehen und eine Mischzeit von mindestens fünf Minuten ist einzuhalten.

Diese Art der Faserzugabe war vor allem auf Baustellen gebräuchlich. Allerdings ist dies in Deutschland mit der Einführung der DAfStb-Richtlinie Faserbeton nicht mehr erlaubt. Hier darf die Faser nur noch im Betonwerk zugegeben werden. Allerdings ist dies auch von Vorteil, da hier die Einstellung der Konsistenz des Stahlfaserbetons mit Betonverflüssigern nach der Faserzugabe vorgenommen werden kann, und man davon ausgeht, dass eine genauere Faserdosierung möglich sein sollte.

Anders kann es sich bei Spritzbetonen verhalten. Hier gibt es Verfahren die eine Zugabe der Fasern direkt an der Pumpe vorsehen. Somit soll eine Einleitung von Igel in die Pumpenleitung verhindert werden. Dieses Verfahren gibt es für Trocken- als auch für Nassspritzverfahren. Üblicherweise werden allerdings die Stahlfasern bereits im Trockenmischgut für den Trockenspritzbeton beigegeben.

3 Untersuchungen zur Faserorientierung

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen vorgestellt, die unternommen wurden um eine Faserorientierung zu visualisieren. Aus diesem Grund wurde nach einer Ersatzflüssigkeit gesucht, die ähnliche Eigenschaften besitzt wie selbstverdichtender Beton. Bevor auf die Entwicklung dieser Versuchsflüssigkeit und die Untersuchungen mit ihr eingegangen wird, soll ein kurzer Überblick über die Rheologie von Beton gegeben werden.

3.1 Grundlagen der Rheologie

Der Ursprung des Wortes Rheologie stammt aus dem Griechischen und bedeutet übersetzt „die Lehre des Fließens“. Als Rheologie wird die Wissenschaft bezeichnet, die sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten von Materialien beschäftigt [29]. Hierbei werden verschiedene Verfahrenstechniken herangezogen um Fließgrenzen festzustellen und Aussagen über die Viskosität zu tätigen. Diese Messapparaturen werden im Allgemeinen Viskosimeter oder Rheometer genannt.

Die meisten Rheometer sind allerdings für Leim- oder Mörtelproben mit einer maximalen Korngröße von 2 mm konstruiert. Diese messen die Kräfte, die benötigt werden, um Verformungen im Material bei verschiedenen Verformungsgeschwindigkeiten zu verursachen. Als Ergebnis dieser Messverfahren erhält man eine Fließkurve, aus der zwei Werte herausgelesen werden können. Dies sind zum einen die Fließgrenze, die Kraft, die benötigt wird um das System gerade in Bewegung zu bringen, zum anderen die Viskosität, ein Maß für die Zähflüssigkeit des Fluides und damit eine Beschreibung seines Fließverhaltens.

Zudem werden in der Rheologie prinzipiell zwei Strömungen unterschieden. Auf der einen Seite die Scherströmung die sich in Fließrichtung ergibt und auf der anderen Seite die Dehnströmung die senkrecht dazu entstehen kann. In der folgenden Betrachtung sollen beide Begriffe erläutert werden.

Um die Strömungen zu erklären, behilft man sich in [30] damit, ein Stromfeld als eine Summe von Materialflächen zu betrachten. Diese Materialflächen können bei Bewegungen nicht verzerrt und verbogen werden. Allerdings können sie aneinander gleiten.

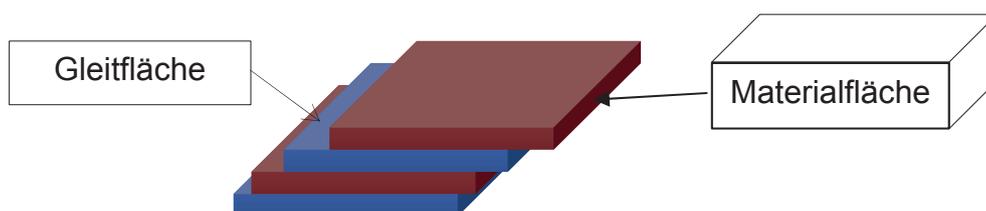


Abbildung 16 Plattenmodell eines Fluids



Die Gleitflächen, an denen die Materialflächen sich gegeneinander verdrehen und verschieben können, sind starr und bewegen sich als Ganzes. So kann jede Gleitfläche als in sich feste aber als ganze bewegliche Wand gesehen werden, an der das Fluid haftet. Wenn sich diese Gleitflächen zueinander verschieben oder verdrehen, wird das dazwischen anhaftende Fluid deformiert.

Bei der nun betrachteten Strömung wird das Verschieben dieser Platten genauer betrachtet. Im Bezug zu einer gewählten und nicht zwingend kartesischen Basis der sog. *natürlichen Basis* wirkt diese Verformung als eine Scherung. Deswegen wird diese Strömung auch *Scherströmung* genannt. Eine andere Bezeichnung, die in der Literatur [31] verwendet wird, ist die *Schichtenströmung*, die ebenfalls ohne eine spezielle Basis auskommt.

In [30] wird das Ergebnis der Scherströmung auch Scherfließen genannt. Es tritt laut *Eyerer et al.* beim Durchfließen einer Düse, beim sog. Urformprozess auf.

Beide Quellen verwenden das Newton'sche Zweiplattenmodell um das Fließen von Fluiden zu erklären. Hierbei wird der Begriff der Viskosität η eingeführt, welche den inneren Widerstand eines Fluids gegen eine von außen einwirkende Beanspruchung beschreibt. Bei einer Scherbeanspruchung wie sie in diesem Modell vorgesehen ist, nennt man diesen Widerstand auch Scherviskosität. Aus der Newton'schen Gleichung in der Fluidmechanik folgt daher die absolute Scherviskosität η :

$$\tau_{yx} = \frac{F}{A_0} = \eta \frac{dv_x}{dy} = \eta \dot{\gamma}_x \quad (2)$$

Die Schubspannung τ_{yx} resultiert aus der Bewegung der Platte mit der Fläche A_0 mit der Geschwindigkeit v_x über einem idealen Fluid (Newton'sche Flüssigkeit) das sich auf der feststehenden Platte befindet (s. Abbildung 17). Bei eben einem solchen Fluid gilt, dass die Schubspannung τ_{yx} direkt proportional zu dem resultierenden Geschwindigkeitsgradienten $\dot{\gamma}_x = \frac{dv_x}{dy}$ ist. Die Proportionalitätskonstante ist dabei die Viskosität η (bzw. in diesem Falle die Newton'sche Viskosität).

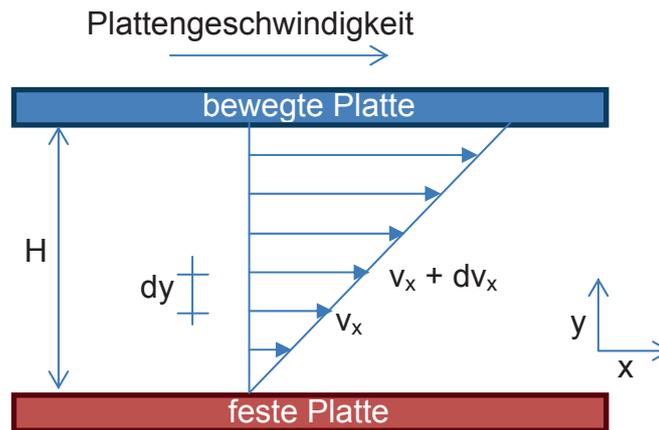


Abbildung 17 Geschwindigkeitsprofil eines Newton'schen Fluids bei 2d Scherfließen

Bei Nicht-Newton'schen und Bingham Fluiden besteht allerdings keine direkte Proportionalität zwischen Schubspannung und Schergeschwindigkeit und die Viskosität ist keine Konstante mehr.

Die Bingham Fluide, zu denen auch Beton gezählt werden kann, zeichnen sich lediglich durch eine Fließgrenze aus, die überwunden werden muss, bevor das Fluid ein lineares Fließverhalten aufweist.

Tritt bei einem Newton'schen Fluid keine Scher- sondern Dehnbeanspruchung auf, so spricht man auch von einer Dehnviskosität η_E oder Trouton'schen Viskosität. Es gilt dann:

$$\eta_E = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}} \text{ mit } \dot{\epsilon} = \frac{dv_x}{x} \quad (3)$$

Bei der Messung von Dehnströmen wird vor allem ein Dickenzuwachs (x-Richtung) eines Volumenelementes gemessen. In der Rheologie wird üblicherweise jedoch der Logarithmus dieses Längenverhältnis die sog. Hencky –Dehnung ϵ verwendet:

$$\epsilon = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right) \quad (4)$$

Die Dehnviskosität ist bei Newton'schen Fluiden unabhängig von der Dehngeschwindigkeit und es ergibt sich das Trouton-Verhältnis, das dem dreifachen Wert der Scher-viskosität entspricht. [32] [33]

$$\eta_E = 3\eta \quad (5)$$

„Bei Nicht-Newton'schen Flüssigkeiten gilt dies aber nur bei kleinen Deformationsgeschwindigkeiten, d.h. im Bereich des Newton'schen Fließens. Bei Nicht-Newton'schen



Fluiden kann die Dehnviskosität um mehrere Zehnerpotenzen größer als die Scherviskosität sein. [32],

Durch das Dehnströmen (Streckfließen) findet eine Querschnittsveränderung der Volumenanteile statt, die in dieser Art bei den reinen Scherströmen nicht auftritt. Dadurch kommt es zu einer zweidimensionalen Fließfrontänderung. In Abbildung 18 ist deutlich zu erkennen, wie sich beim Punktanguss die Volumenanteile immer stärker dehnen und die Höhe der Volumenanteile dadurch reduziert wird. Diese auftretenden Dehnkräfte sind ebenfalls dafür verantwortlich dass sich Fasern dann senkrecht zur Fließrichtung ausrichten. Dieser Effekt wird in [30] ebenfalls so beschrieben, und es wird darauf hingewiesen, dass dieser Effekt auch bei zentral angespritzten Platten festzustellen ist.

Da Beton allgemein als Bingham-Fluid betrachtet wird, sind nach Überwinden der Fließgrenze die Trouton-Verhältnisse für Newton'sche Fluide anwendbar. Daher gilt auch für den Beton die Formel (5).

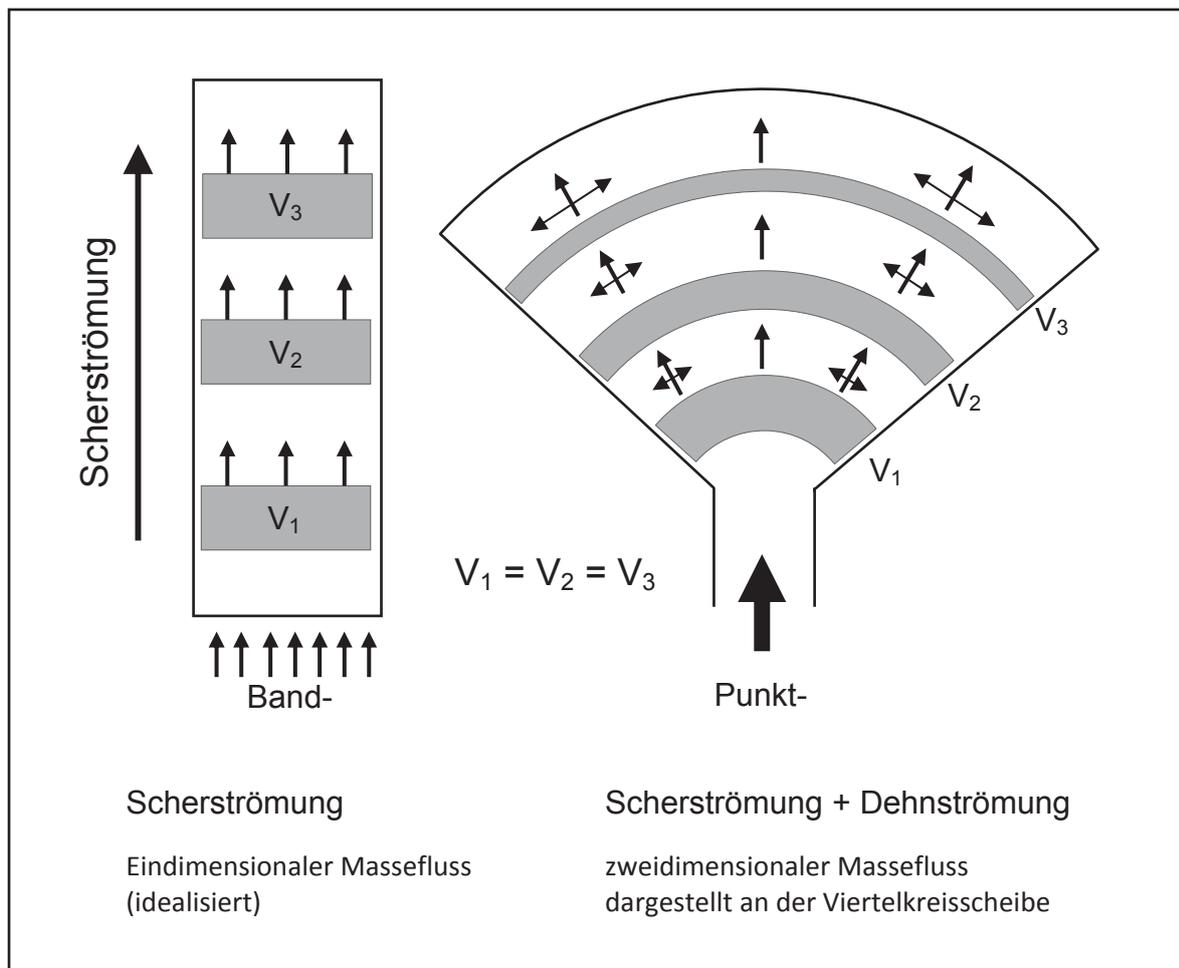


Abbildung 18 Schematische Darstellung von Scherströmung und Dehnströmung [34]



Ein weiterer Effekt wird bereits in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen von *Trouton* [33] und von *Jeffery* [35] benannt. Beide Veröffentlichungen behandeln die Bewegung von elliptischen Teilen (Fasern) in laminarer Strömung. In [35] wird beschrieben, dass sich Fasern in laminarer Strömung zu drehen beginnen, dadurch ihre stabile Position in dem Medium verlieren und somit beginnen sich abzusetzen.

Ob dieser Effekt auch bei selbstverdichteten Stahlfaserbetonen allgemeine Gültigkeit hat, soll mit der Ersatzflüssigkeit untersucht werden.

Im Rahmen der Betontechnologie werden rheologische Untersuchungen auch Konsistenzprüfungen genannt. Diese sind im Allgemeinen nicht so sensibel wie es eine Viskosimetermessung ist. So gibt es zwar Viskosimeter, die Baustellen tauglich sind, dennoch ist diese Messmethode für den Einsatz im Beton noch nicht genormt und wird daher nur selten eingesetzt. Mit Viskosimetern wäre es aber viel leichter, Änderungen in der Betonrezeptur oder bei den Zusatzmitteln festzustellen, als es die genormten Prüfverfahren (EN 12350-8, -9, -10, -11 und -12) ermöglichen.

3.2 Entwicklung einer transparenten Versuchsflüssigkeit

Um die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Phänomene visuell erfassen zu können, war es notwendig sich mit dem rheologischen Verhalten eines Selbstverdichtenden Betons (SCC) näher auseinander zu setzen. Auf diese Erkenntnisse basierend musste ein transparentes Ersatzsystem entwickelt werden. Eine zusätzliche Anforderung an dieses System war die nachträgliche Veränderbarkeit der Viskosität.

In Vorträgen [36] und wissenschaftlichen Veröffentlichungen [37] wurde bei der Beschreibung des Fließverhaltens des selbstverdichtenden Betons der Vergleich mit Honig bemüht. Dies galt besonders für SCC's die mit PCE-Fließmitteln der ersten Generation hergestellt worden waren. In Abbildung 19 ist das bekannte Bild zu sehen, welches in den Vorträgen oft Verwendung fand.



Abbildung 19 Bild aus dem Vortrag von Ing. Strobl [36]

Durch dieses Bild inspiriert war der erste Gedanke, einen geeigneten Honig zu suchen. Bei den Recherchen musste allerdings festgestellt werden, dass Honig stark schwankende Viskositäten aufweist. Selbst bei Honig desselben Typs und Herstellers war eine gleichbleibende Qualität nicht zu gewährleisten. Da Honig jedoch zum größten Teil eine Zuckerlösung ist, lag es nahe, diese Zuckerlösung künstlich zu generieren und die Viskosität über den Zuckergehalt und die Temperatur zu steuern.

Zucker (Saccharose) besitzt eine sehr gute Löslichkeit in Wasser, die durch Erhöhen der Temperatur noch gesteigert werden kann. In [38] wird die Löslichkeit von Saccharose in Wasser bei Zimmertemperatur mit 204 g pro 100 g Wasser und bei 100 °C mit 487 g pro 100 g Wasser angegeben. Es war also relativ leicht möglich eine übersättigte Zuckerlösung herzustellen, die eine konstante Viskosität besaß. Ein Problem stellten nur Fremdkörper dar, die mit dieser Lösung in Kontakt kamen. An deren Oberfläche konnten sich Zuckerkristalle bilden, der überschüssige Zucker fiel aus. Dadurch wurde die transparente Flüssigkeit wieder milchig und ein Beobachten war nicht mehr möglich (s. Abbildung 20).



Abbildung 20 Auskristallisieren von Zucker an der Faser

Diesen Effekt galt es mit geeigneten Maßnahmen entgegen zu wirken. Durch teilweise Substitution des Zuckers durch Gelierzucker 1:3 (pektinhaltiger Zucker) konnte ein Ausfallen der Zuckerkristalle über sieben Versuchstage hinweg verhindert werden. In Tabelle 2 ist die finale Rezeptur zu sehen.

Tabelle 2 Rezept der Zuckerlösung

Für 1 Liter Zuckerlösung	
Zucker	1000 g
Gelierzucker 1:3	100 g
Wasser	300 g

Nachdem die Zuckerlösung nun auf die gleiche Viskosität wie der SCC-Mörtel eingestellt war, musste ein Messverfahren gefunden werden welches für beide Medien tauglich war. Das aus der Betontechnologie bekannte Messverfahren des Fließmaßes, kam nicht in Frage, weil die Zuckerlösung an dem Stahlkonus des Hägermann-Ausbreittisches zu sehr anhaftete. Auch durch Aufbringen von Trennmitteln konnte dieses Problem nicht gelöst werden. Deshalb wurde darauf verzichtet eine Prüfung nach EN 12350-9 mit dem V-Trichter durchzuführen.

Als einzig praktikable Messmethode kam die Messung der Sinkgeschwindigkeit eines definierten Gewichts durch die Medien Zuckerlösung und Mörtel in Frage. (s. Abbildung



21 und Abbildung 22) Hierzu wurden die Sinkgeschwindigkeit von zwei M12 Muttern (30,51 g) über eine definierte Strecke (400ml Eichstrich bis zum Boden) gemessen.



Abbildung 21 Rheologische Messung des Betons



Abbildung 22 Rheologische Messung der Zuckerlösung

Um die nötigen Ausgangsparameter zu erhalten, wurde zuerst der Mörtel des später zum Einsatz kommenden Selbstverdichtenden Betons nach Tabelle 3 gemischt und die benötigten Parameter bestimmt.

Tabelle 3 Rezeptur des SCC-Mörtels

Für 2 kg Trockenmischung	
SupraCem 45	599,0 g
Hydraulit M	142,6 g
Sand 0/2	1024,0 g
Sand 2/4	228,2 g
FM [Glenium 323 Mix]	4,5 g
Verzögerer	1,8 g
Wasser	328,0 g

Für diesen SCC-Mörtel ergab sich bei einer Frischmörteltemperatur von 20,6°C ein Fließmaß in Anlehnung an Setzfließmaß nach EN 12350-8 auf der Glasplatte mit umgedrehtem Hägermann-Trichter von 24 cm (s. Abbildung 23). Die Erfahrung mit dieser

Messmethode hat gezeigt, dass ein Mörtel, der ein solches Fließmaß von größer als 21 cm besitzt, selbstverdichtende Eigenschaften aufweist.



Abbildung 23 Fließmaß des SCC-Mörtels

Danach wurde mit demselben Mörtel die Sinkzeit der Gewichte im Mörtel gemessen. Im Mittel aus fünf Wiederholungen betrug sie 4,18 Sekunden.

Da die Zuckerlösung bei 20°C zu zäh war, wurden Proben auf 45°C, 50°C und 55°C erwärmt um die benötigte niedrigere Viskosität zu erreichen. Die Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung.

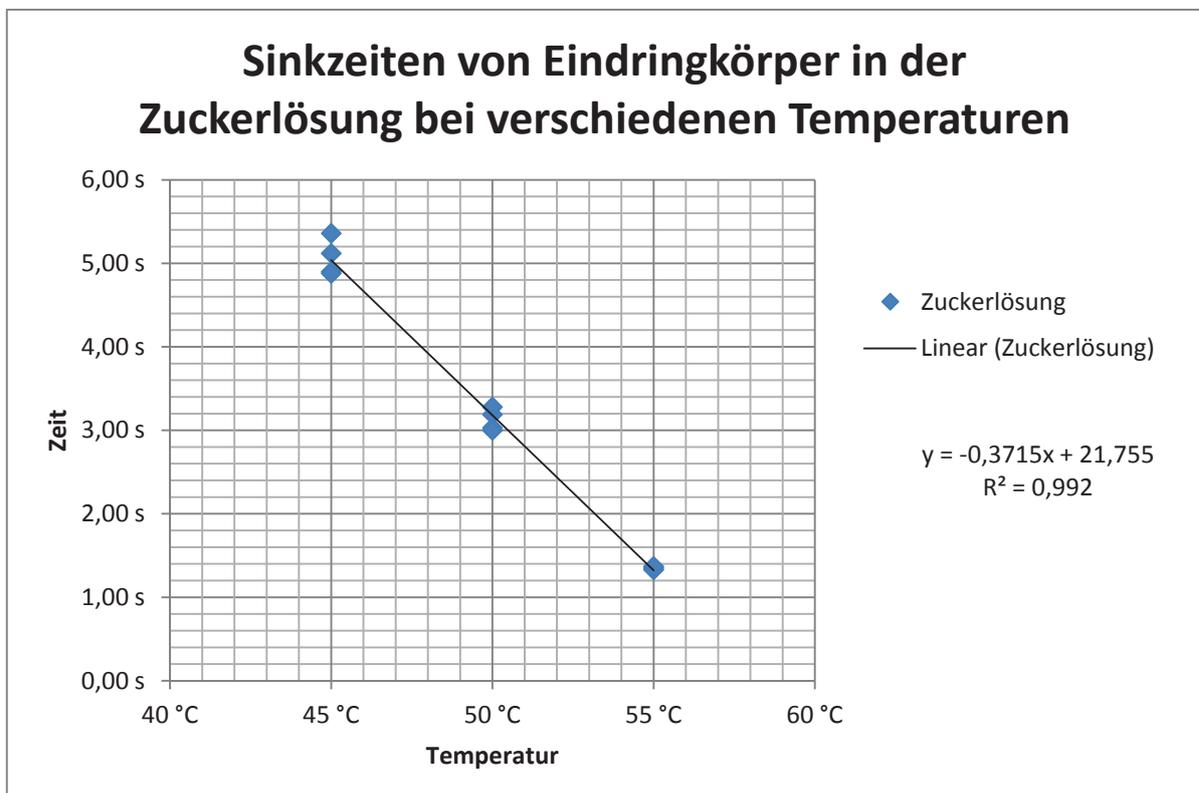


Abbildung 24 Bestimmen der Sinkzeiten bei verschiedenen Temperaturen



Anhand Abbildung 24 ist zu erkennen, dass das Gewicht in einer Zuckerlösung bei 47°C die gleiche Sinkzeit benötigt wie im Mörtel bei 20°C. Somit wurden alle folgenden Versuche mit 47°C warmer Zuckerlösung vorgenommen.

3.3 Versuche zur Faserorientierung

Mit dieser so designten Ersatzflüssigkeit wurden nun unterschiedliche Versuche mit verschiedenen Fasermaterialien durchgeführt. Zum Einsatz kamen Stahlfasern (KrampeHarex DE 50/0,8 N und DE 30/0,6 N) Kunststofffasern (Stratos B) und Glasfasern (Cem-FIL®). Die Stahlfasern erreichten nie einen Schwebezustand. Vielmehr blieben bei der kleineren Fraktion einige an der Oberfläche, die meisten sanken allerdings sofort auf den Boden. Die Kunststofffasern schwammen wegen ihrer geringeren Dichte nur an der Oberfläche. Lediglich die Glasfasern hielten ihre Position weitgehend stabil und zeichneten sich durch eine sehr niedrige Sinkgeschwindigkeit aus. In den nun folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Versuche vorgestellt.

3.3.1 Balkenform

Bei diesen Versuchen wurde angestrebt, den gleichen Versuchsaufbau, wie für die späteren Betonagen der Biegezugbalken, zu verwenden. Die Ersatzflüssigkeit wurde über eine Rinne (Durchmesser 10 cm und einem Gefälle von 5 %) in eine Balkenform eingeleitet. Diese besaß ebenfalls die Höhe von 15 cm war jedoch kürzer als die Betonbalkenformen. Zudem waren die Seitenflächen aus Plexiglas um einen eventuell auftretenden Sinkprozess beobachten zu können. In Abbildung 25 und Abbildung 26 ist der Versuchsaufbau sowie die Positionierung der Videokameras zu sehen.



Abbildung 25 Versuchsaufbau Balkenform



Abbildung 26 Bilddokumentation der Balkenversuche

Im Folgenden werden nun die Versuche chronologisch vorgestellt. Jeder einzelne Versuch wurde durch mehrfache Wiederholung validiert. Es soll jedoch jeweils nur ein Versuchsdurchgang exemplarisch beschrieben werden.

Bei den ersten Versuchen kamen dieselben Stahlfasern vom Typ KrampeHarex DE 50/0,8 N zum Einsatz, welche später auch im Beton verwendet werden sollten. Allerdings waren diese zu schwer und konnten nicht von der Ersatzflüssigkeit mittransportiert werden. Sie sanken sofort ab. Auch durch die Erhöhung der Viskosität war dies nicht zu verhindern. Die Versuche wurden ohne Ergebnis abgebrochen.

Bei einer neuen Versuchsserie wurden deshalb kleinere Stahlfasern mit Endverankerung vom Typ KrampeHarex DE 30/0,6 N verwendet. Diese sanken zum größten Teil ebenfalls ab, einige konnten aber doch eine gewisse Strecke überwinden. Aus diesem Versuch, der im Anhang als Versuch: Zucker 2-1 bezeichnet und durch einzelne Bilder dokumentiert ist, sollen an dieser Stelle dennoch vier Fasern genauer betrachtet werden. In den Abbildung 27 bis Abbildung 30 sind diese Fasern farbig umrandet.

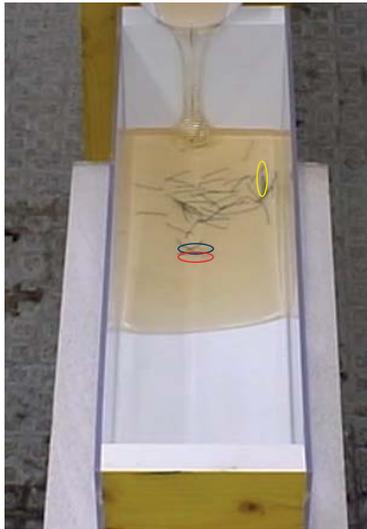


Abbildung 27 Foto 3

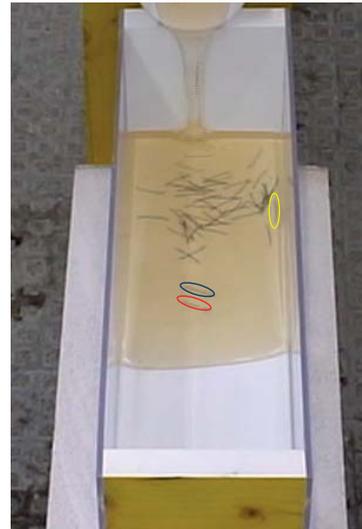


Abbildung 28 Foto 4

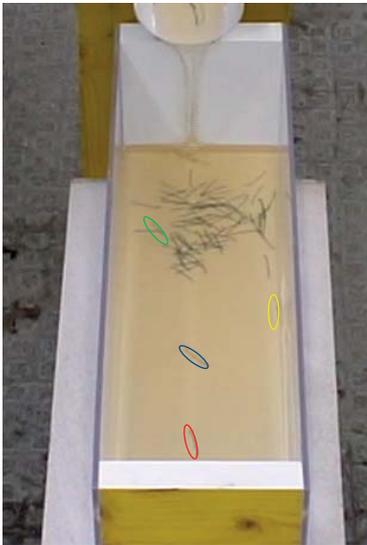


Abbildung 29 Foto 10



Abbildung 30 Foto 24

Die Faser 1 (rot), Faser 2 (blau) Faser 3 (gelb) und Faser 4 (grün) wurden ausgewählt, da diese mit Abstand die weitesten Strecken zurückgelegt haben. Außerdem eignen sie sich für die Beschreibung von drei Bereichen. Die Faser 1 und die Faser 2, die bereits schon im frühen Stadium in die Balkenform kommen, sind eindeutige Vertreter der Mitte des Fließbereichs. Auffällig ist, dass sie sich ursprünglich, solange man noch von einem Punkt-Anguss nach Abbildung 18 sprechen kann, senkrecht zur Fließrichtung ausrichten. Hierbei sind sie allerdings leicht vom Zentrum versetzt. Nachdem die Form horizontal gefüllt ist, verhalten sich die Fasern, die über die Mitte der Form transportiert wurden, wie bei einem Band-Anguss. Das bedeutet, dass sich diese Fasern in Fließrichtung drehen bis sie letztendlich auf den Boden absinken.

Die gelbumrandete Faser 3 ist etwa gleichzeitig mit den zuvor betrachteten Fasern in die Form gekommen. Allerdings wird sie an den Rand gedrängt und ist ein guter Indikator für den Randeffekt. Dieser besagt, dass sich die Fasern an den Rändern mangels Bewegungsmöglichkeit immer in Fließrichtung ausrichten [39]. Dieser Effekt ist auch

dafür verantwortlich, dass sich vereinzelte Fasern in der Rinne stets in Fließrichtung ausrichten. Dies ist auch in Abbildung 31 deutlich zu erkennen.



Abbildung 31 Fasern in der Fließrinne

Die beobachtete Faser 4 (grün) ist im Gegensatz zu den Anderen relativ spät in die Balkenform eingebracht worden. Sie zeigt keinerlei Bewegung und schwimmt langsam auf der Zuckerlösung bis der Versuch beendet ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Stahlfasern zu schwer für die Ersatzflüssigkeit sind. Auch eine Verkleinerung der Fasern war nicht erfolgreich, da der größte Teil der Fasern früh abgesunken ist. Eine Behinderung durch abgesunkene Fasern ist nicht nur nicht auszuschließen sondern vielmehr anzunehmen. Auch war bei den vorangegangenen Versuchen festzustellen, dass Fasern, die nach dem Eintauchen Bodenkontakt hatten statistisch verteilt um den Eintauchpunkt umfielen und sofort auf den Boden sanken. Aus diesem Grund wurden die folgenden Versuche mit anderem Fasermaterial durchgeführt.

Hier kamen nun Kunststofffasern der Firma Stratos zum Einsatz. Bei diesen war damit zu rechnen, dass sich die Fasern aus Polypropylen (PP) durch ihre geringe Dichte von ca. $0,9 \text{ t/m}^3$, eher nahe an der Oberfläche befinden würden. Dies bestätigte sich auch in den Versuchen und führte zu einem anderen Problem. Die Kunststofffasern, die sich nahe an der Fließfront befanden, wurden untergewalzt und blieben danach am Boden kleben. Somit bildeten sie teilweise Barrieren für nachfolgende Fasern und deren volle Bewegungsfreiheit war nicht mehr gegeben. Aber auch bei einem ausreichendem Vorlauf von Zuckerlösung ohne Fasern war keine vorwiegende Faserorientierung zu erkennen.



Um die Ergebnisse mit einer Kamera besser dokumentieren zu können, wurden die PP-Fasern blau eingefärbt und die Versuche wiederholt. Hier fiel besonders auf, dass diese sich nicht so gut vereinzeln ließen und sich teilweise Agglomerate bildeten. In Abbildung 32 ist ein Ergebnis dieser Versuche zu sehen.



Abbildung 32 Faserorientierung mit blau eingefärbten PP-Fasern

Da die Änderung des Fasermaterials nicht nur positive (kein schnelles Absinken) sondern auch negative (Unterwalzen von Fasern, Agglomeration) Effekte mit sich brachte, wurde daran gearbeitet das Problem der Stahlfaser beim Eintauchen durch geeignete Versuchsaufbauten zu eliminieren. Es wurden zwei Versuchsaufbauten gewählt, die einmal eine minimale oder gar keine Fallhöhe besaßen. Als Fasern kamen wieder die Stahldrahtfasern vom Typ DE 30/0,6 N der Firma KrampeHarex zum Einsatz. Diese Änderungen sollten es nun möglich machen zu überprüfen, ob die Annahme, dass Fasern durch das Fließen des Trägermaterials bewegt werden, richtig ist. Zudem sollte damit untersucht werden, ob das Fließen wirklich eine so große Kraft darstellt, wie ursprünglich angenommen.



Abbildung 33 Foto 52



Abbildung 34 Foto 82

Beim ersten Versuch mit den geänderten Bedingungen wurde das Ende der Fließrinne mit einem Abstand von 5 mm zum Boden ausgerichtet. Bei diesen Versuchen schwammen die Fasern auf der Zuckerlösung. Zudem wurde auch hier ein Unterwalzen



der Fasern an der Front festgestellt. Doch konnte ebenso eindeutig beobachtet werden, dass die am Grunde liegenden Fasern die darüber hinweg schwimmenden in keiner Weise beeinflussten. Auffällig war bei den vereinzelt Fasern, dass sich diese meistens quer zur Fließrichtung stellten und danach ihre Position auch weitgehend stabil behielten. Wie in Abbildung 33 und Abbildung 34 zu sehen ist (roter Kreis), verändert sich die Lage der quer zur Fließrichtung liegenden Faser nur minimal.

Im folgenden Versuch lag die Rinne auf dem Boden der Schalung auf. Hier konnten ähnliche Beobachtungen gemacht werden wie im zuvor beschriebenen Versuch. Allerdings war festzustellen, dass die Faser, welche mit höherer Fließgeschwindigkeit von der Rinne kam, von der in der Form befindlichen Flüssigkeit abgebremst wurde. Auch war zu sehen, dass singuläre Fasern doch tendenziell zu einer Querausrichtung zur Fließrichtung neigten. Ob diese negative Beschleunigung der alleinige Grund für diesen Effekt ist, wird bei den folgenden Betonversuchen genau geklärt werden müssen. Weiterhin wurde festgestellt, dass Agglomerate, die bereits in der Rinne bestanden hatten, auch unverändert in der Schalung anzutreffen waren und keine auffällige Drehbewegung vollzogen. Dies ist unter anderem an dem rot umrandeten Faserhaufen in Abbildung 35 und Abbildung 36 zu sehen.



Abbildung 35 Foto 106



Abbildung 36 Foto 152

Abschließend ist zu diesen Versuchen festzustellen, dass die Faserorientierung stark vom Eintritt der Flüssigkeit in die Form abhängig ist. Wider Erwarten scheint das Fließen viel weniger Einfluss auf die Faserorientierung zu haben als angenommen. Eine starke Drehung wie die rote Faser in Versuch Zucker 2-1 ist eher die Ausnahme gewesen. In den nun folgenden Versuchen wird die Faserbewegung in einer laminaren Strömung beobachtet. Durch diesen Versuch soll gezeigt werden, wie beweglich Fasern in einer solchen Strömung sind.



3.3.2 Rohr

Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurde ein neuer Versuchsstand gebaut, wie in Abbildung 37 und Abbildung 38 zu sehen ist. In diesem Versuch wurde eine höhergelegene Einfüllstation (oranger Trichter) installiert, um einen Druck zu erzeugen der die Versuchsflüssigkeit durch das Plexiglasrohr befördert. Um eine vollständige Füllung des Rohres zu ermöglichen wurde dieses leicht ansteigend installiert. Parallel zu dem Rohr wurde eine Eisenstange befestigt, die als Schiene für die Videokamera diente. Die Lichtinstallation (Neonröhre) diente zur besseren Durchleuchtung der Flüssigkeit im Plexiglasrohr.

Für die Charakterisierung von Strömungen wird die Reynolds-Zahl Re verwendet. Für sie gilt folgende Formel:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\mu} \quad (6)$$

wobei v eine charakteristische Strömungsgeschwindigkeit, l eine charakteristische Länge sowie ν die kinematische Viskosität ist. Alternativ kann ν auch durch den Quotienten aus μ , der dynamischen Viskosität, und ρ , die Dichte des strömenden Fluids, ausgedrückt werden.

Aus der Strömungslehre ist bekannt, dass für das Durchfließen von Rohren die kritische Reynolds-Zahl bei etwa 2300 liegt. Sobald diese unterschritten ist, kann man von einer laminaren Strömung im Rohr ausgehen. Erst wenn der Wert diese kritische Marke übersteigt treten Verwirbelungen auf und man spricht von einer turbulenten Strömung. Die Formel (6) für den kritischen Zustand kann somit für ein Rohr wie folgt umgeschrieben werden:

$$Re_{krit} = \frac{v_m \cdot d}{\nu} \approx 2300 \quad (7)$$

Hier wurden die in der allgemeinen Form verwendete charakteristische Länge durch den Rohrrinnendurchmesser und die charakteristische Geschwindigkeit durch die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ersetzt. Es ist somit klar erkennbar, dass v_m der entscheidende Faktor für die Veränderung der Reynolds-Zahl ist, da die Eigenschaften des Fluides und der Rohrdurchmesser in diesem Versuch konstant sind. Somit gilt, dass in Rohren bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten Strömungen laminar sind.



Abbildung 37 Versuchsaufbau Rohr von der Seite



Abbildung 38 Versuchsaufbau Rohr von der Frontale

Ziel des Versuches war es, das Verhalten von stabförmigen Partikeln in einer laminaren Strömung zu untersuchen. Auch hier kam die bereits erprobte Ersatzflüssigkeit zum Einsatz. Die Verwendung der Stahlfasern war nicht möglich, da der Durchmesser des Schlauches und des Plexiglasrohres den Einsatz von kleinen Fasern erforderlich machte. Da die bereits verwendeten Polypropylenfasern wegen ihrer geringen Dichte zum Aufschwimmen neigen, waren diese ebenfalls für diese Versuche nicht geeignet. Deshalb wurde für die Strömungsversuche Glasfasern verwendet. Nach den ersten Versu-



chen wurden die Fasern mit Natronlauge angeätzt und mit Mytelenblau eingefärbt, damit sie besser in der Flüssigkeit zu erkennen waren. Des Weiteren wurde auch ein Versuch mit Bleistiftminen unternommen, da diese den besten Kontrast lieferten. Die einzelnen Versuche zum Verhalten von Fasern in laminarer Strömung werden im Folgenden beschrieben:

Im ersten Rohr-Versuch wurden nur wenige Glasfasern in die Ersatzflüssigkeit eingemischt, um deren Bewegung besser verfolgen zu können. Hier wurde festgestellt, dass sich nur wenige Fasern überhaupt drehen. In Abbildung 39 bis Abbildung 46 wird dokumentiert, wie sich eine Faser (gelb markiert) dreht, dadurch langsamer wird und danach auf der gesamten Beobachtungsstrecke ihre Lage nicht mehr ändert. Der Startpunkt der Beobachtung ist mit einem roten Pfeil auf der Skala in Abbildung 39 und Abbildung 40 bei 43 gekennzeichnet. Die Strömungsrichtung verläuft von rechts nach links.



Abbildung 39
Auschnitt aus Foto 153



Abbildung 40
Auschnitt aus Foto 156



Abbildung 41
Auschnitt aus Foto 158



Abbildung 42
Auschnitt aus Foto 170



Abbildung 43
Auschnitt aus Foto 174



Abbildung 44
Auschnitt aus Foto 177



Abbildung 45
Auschnitt aus Foto 190



Abbildung 46
Auschnitt aus Foto 203

In einem weiteren Versuch wurden nun mehrere eingefärbte Fasern in die Ersatzflüssigkeit gegeben und der Versuch wiederholt. Mit diesem Versuch sollte gezeigt werden, ob mit steigendem Fasergehalt eine höhere Mobilität der Fasern festzustellen ist. Allerdings war durch die hohe Anzahl der Fasern eine Verfolgung von einzelnen Fasern im Nachhinein nicht mehr möglich. Auch war der Kontrastgewinn durch das Einfärben der Fasern nicht so hoch wie gewünscht. In Abbildung 47 ist dennoch sehr deutlich zu erkennen, dass sich die Fasern vorwiegend in Fließrichtung ausrichten. Auch bei diesem Versuch wurde ein leichtes Aufschwimmen der Fasern festgestellt. Ebenso konnte beobachtet werden, dass Faserbündel (Agglomerate) sich nicht mehr auflösten und zu ei-



ner stärkeren Bewegung führten. Im Gegensatz zu den vereinzelt Fasern, die maximal zwei Drehungen auf der Beobachtungslänge von einem Meter vollzogen, war die Bewegung von Faserbündeln um ein vielfaches höher.



Abbildung 47 Foto 293

Bei den bereits beschriebenen Versuchen wurde stets versucht, die Faser mit der Kamera zu verfolgen, um, wie im ersten Rohr-Versuch, das Verhalten einiger ausgesuchter Fasern betrachten zu können. Für die folgenden Versuche wurde die Kamera auf einen beschränkten Ausschnitt (ca. 40 cm) in der Mitte des Rohres fixiert.

Zuerst wurden Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Hierfür wurden mehrere Fasern und eine Luftblase als Indikatoren benutzt.

Bereits bei den vorangegangenen Versuchen war aufgefallen, dass sich Fasern mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fortbewegten. Dies stützte zusätzlich die Annahme, dass sich im Rohr eine laminare Strömung ausgebildet hat. Zuerst wurde die Randgeschwindigkeit mit Hilfe einer Luftblase gemessen. Die auf dem Rohr angebrachten Striche besitzen jeweils einen Abstand von 10 cm. In Abbildung 48 bis Abbildung 51 ist die Messung dokumentiert.

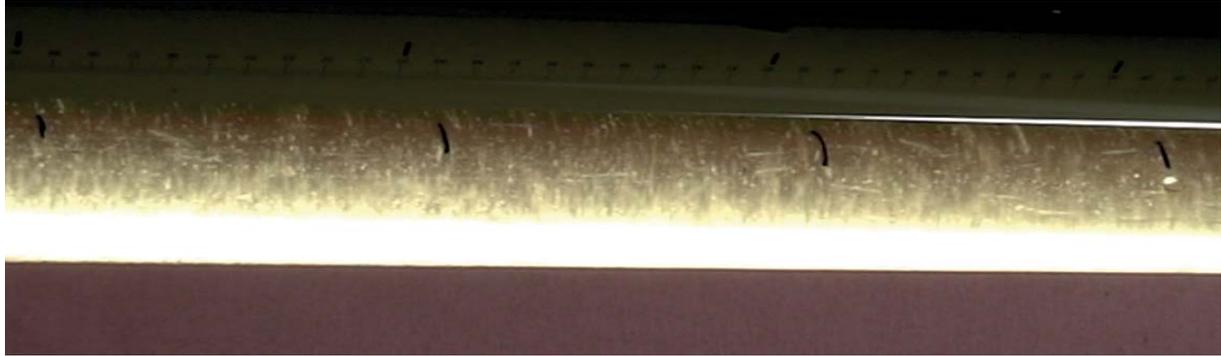


Abbildung 48 Geschwindigkeitsmessung mit einer Luftblase – 0 Sekunden



Abbildung 49 Geschwindigkeitsmessung mit einer Luftblase – 8 Sekunden



Abbildung 50 Geschwindigkeitsmessung mit einer Luftblase – 17 Sekunden



Abbildung 51 Geschwindigkeitsmessung mit einer Luftblase – 25 Sekunden

Aus den erhaltenen Werten ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit an der Oberfläche des Rohres von 43,5 m/h

Die zweite Geschwindigkeit wurde mit einer in Fließrichtung (gerade) liegenden Faser gemessen. In Abbildung 52 bis Abbildung 55 sind diese Messpunkte festgehalten und die Faser gelb markiert.



Abbildung 52 Geschwindigkeitsmessung mit einer geradliegenden Faser – 0 Sekunden



Abbildung 53 Geschwindigkeitsmessung mit einer geradliegenden Faser – 5 Sekunden



Abbildung 54 Geschwindigkeitsmessung mit einer geradliegenden Faser – 11 Sekunden



Abbildung 55 Geschwindigkeitsmessung mit einer geradliegenden Faser – 16 Sekunden



Aus diesen Werten ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit dieser Faser von 68,3 m/h. Für die dritte und letzte Geschwindigkeitsmessung wurde eine schräg liegende Faser gewählt. Zusätzlich zur Geschwindigkeitsmessung zeigt diese Faser ein weiteres Phänomen. So behält diese, bemerkenswerter Weise, ihre Lage, obwohl sie einem Gradienten der Geschwindigkeit ausgesetzt sein muss. In Abbildung 56 bis Abbildung 59 sind diese Messpunkte festgehalten und die Faser gelb markiert.



Abbildung 56 Geschwindigkeitsmessung mit einer schrägliegenden Faser – 0 Sekunden



Abbildung 57 Geschwindigkeitsmessung mit einer schrägliegenden Faser – 5 Sekunden



Abbildung 58 Geschwindigkeitsmessung mit einer schrägliegenden Faser – 10 Sekunden



Abbildung 59 Geschwindigkeitsmessung mit einer schrägliegenden Faser – 15 Sekunden

Diese Messung ergibt eine mittlere Geschwindigkeit dieser Faser von 72,0 m/h

Da bei beiden Geschwindigkeitsmessungen mit den Fasern jeweils auch die Luftblase der ersten Messung zu sehen ist, kann davon ausgegangen werden, dass alle drei Messung unter gleichen Bedingungen stattgefunden haben. Dadurch kann angenommen werden, dass eine Strömung mit solchen Gradienten vorherrschen muss. Um diese Hypothese zu bestätigen, wurde ein weiterer Versuch durchgeführt. In diesem wurde zur besseren Sichtbarmachung der Strömung eine eingefärbte Ersatzflüssigkeit mit Hilfe einer Spritze in den Materialstrom injiziert. In Abbildung 60 bis Abbildung 66 ist dieser Versuch dokumentiert.

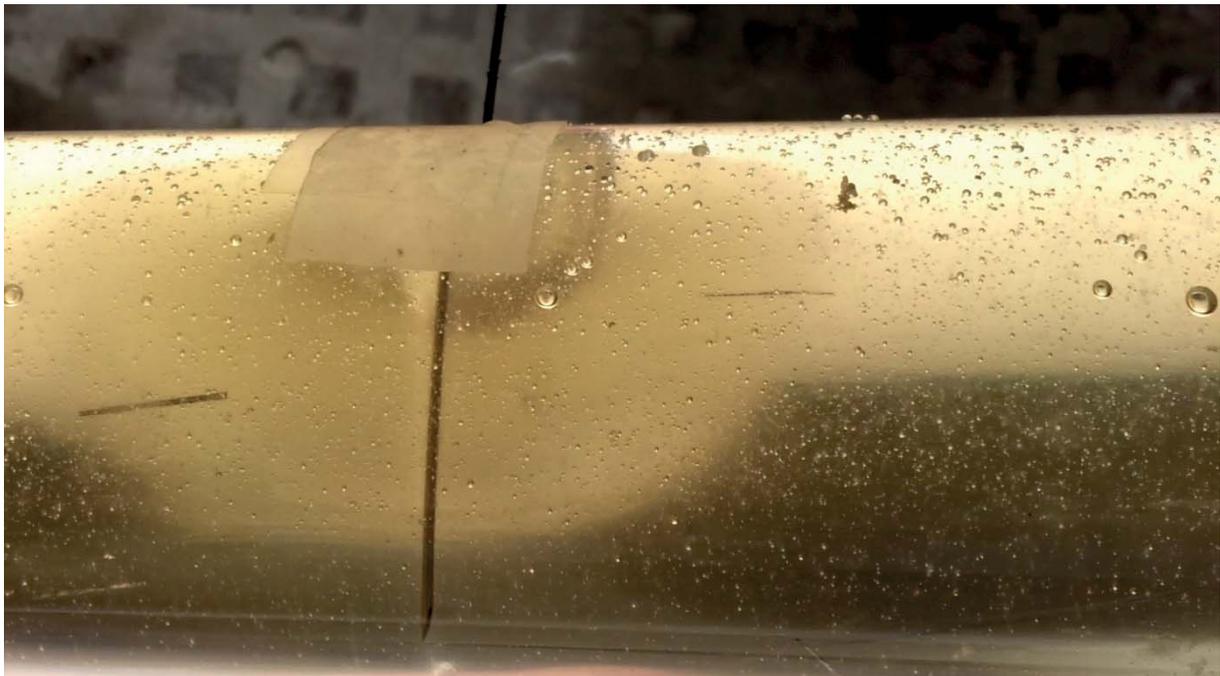


Abbildung 60 Foto 369



Abbildung 61 Foto 373



Abbildung 62 Foto 376

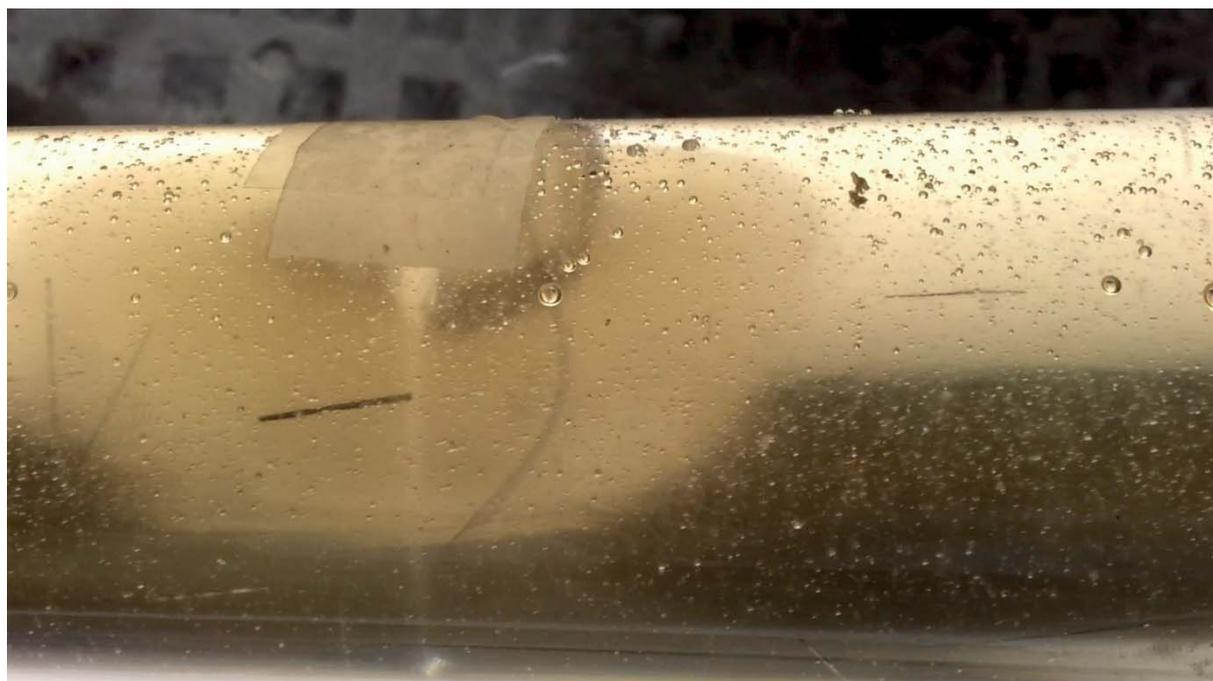


Abbildung 63 Foto 379



Abbildung 64 Foto 382



Abbildung 65 Foto 385



Abbildung 66 Foto 389

Es ist deutlich zu erkennen, dass es sich in dem Rohr um eine laminare Strömung eines als newtonsche Flüssigkeit anzusehenden Mediums handelt. Diese Annahme wird durch *Eyrer et al.* in [30] bestätigt. (vgl. Abbildung 67)

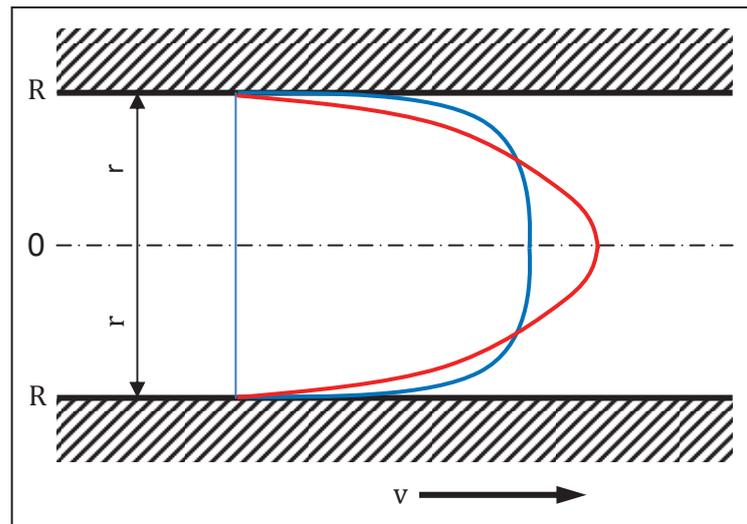


Abbildung 67 Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Radius bei einer Rohrströmung: Newton'sche Flüssigkeit (rot); strukturviskose Flüssigkeit (blau) [30]

Um den Eindruck aus den vorangegangenen Versuchen zu bestätigen, wurde im Folgenden eine Auswertung der sich in Eigenrotation befindlichen Fasern unternommen. In Abbildung 68 bis Abbildung 74 ist in Ausschnitten diese Untersuchung gezeigt.

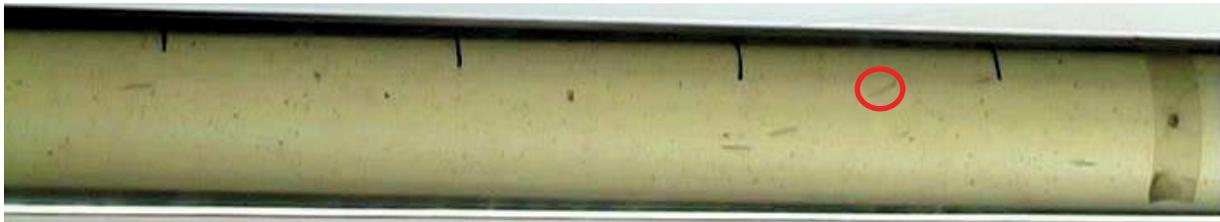


Abbildung 68 Faserbewegung Messzeitpunkt 0 Sekunden (Foto 360)



Abbildung 69 Faserbewegung Messzeitpunkt 15 Sekunden (Foto 398)



Abbildung 70 Faserbewegung Messzeitpunkt 33 Sekunden (Foto 442)



Abbildung 71 Faserbewegung Messzeitpunkt 43 Sekunden (Foto 467)

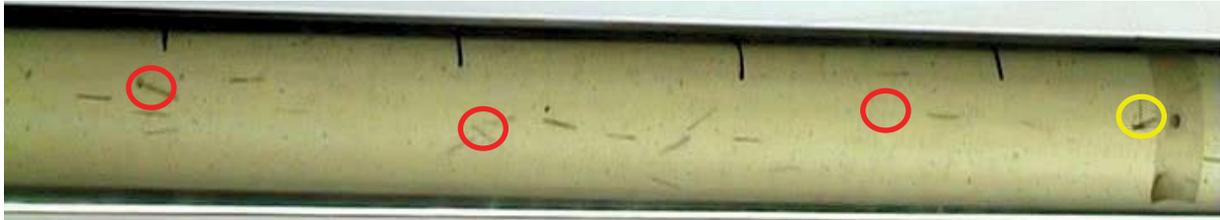


Abbildung 72 Faserbewegung Messzeitpunkt 58 Sekunden (Foto 506)

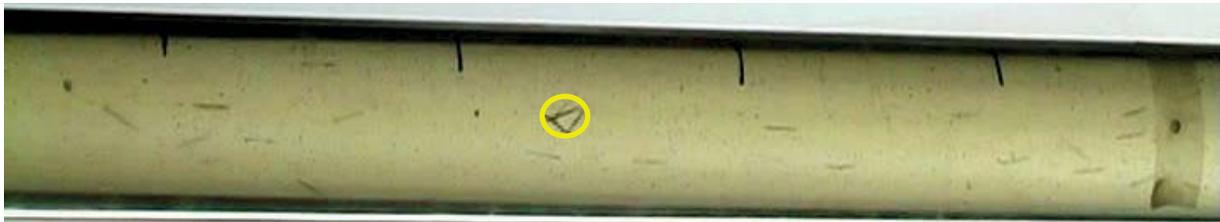
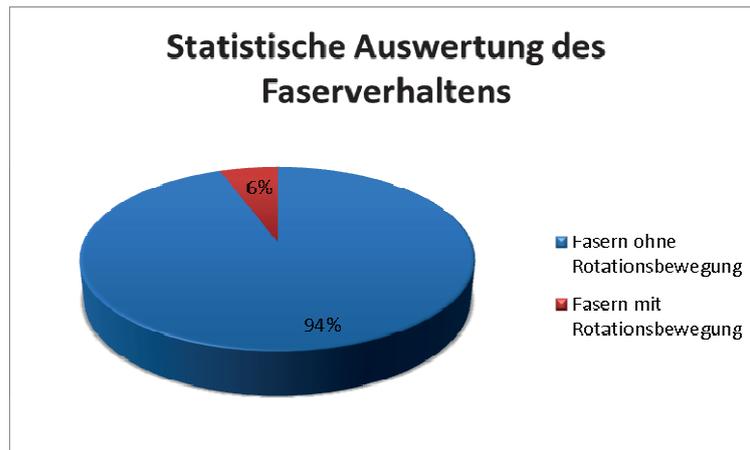


Abbildung 73 Faserbewegung Messzeitpunkt 68 Sekunden (Foto 530)



Abbildung 74 Faserbewegung Messzeitpunkt 82 Sekunden (Foto 563)

Die hier rot umrandeten Fasern sind die, welche im Beobachtungszeitraum eine Lageveränderung deutlich erkennen ließen. Von insgesamt 124 beobachteten Fasern zeigten nur 7 eine eindeutige Richtungsänderung. Dies bedeutet, dass 94 % der Fasern keine Rotationsbewegungen vollzogen, obwohl sie teilweise eine deutliche Schräglage zur Fließrichtung besaßen. Die mit einem gelben Kreis gekennzeichnete Agglomeration wurde in der Bewertung nicht berücksichtigt.



3.3.3 L-Box

Da sich in den vorangegangenen Versuchen herausgestellt hatte, dass es zwingend erforderlich ist, bei der Befüllung der Schalung eine Dehnströmung zu verhindern, lag es nahe, einen Befüllungsvorgang mit der Ersatzflüssigkeit nachzustellen. Hierzu wurde ein bereits genormtes Prüfverfahren adaptiert. Hierbei handelt es sich um den L-Box Test nach EN 12350-10. Mittels dieser Prüfung wird die Fließfähigkeit, Blockierneigung und Entmischung von selbstverdichtendem Beton bestimmt.

Allerdings wurde bei diesem Versuch lediglich das Befüllen über einen Trichter simuliert. Blockiereisen oder ähnliches sind in diesem Versuch nicht von Interesse, da es sich bei den zukünftigen Betonagen um rein faserbewehrte Bauteile handeln wird.

In dem Versuch, der im Anhang (Foto 602 bis 619) dokumentiert ist, wurden mit Hilfe der Visualisierungssoftware Amira[®] von FEI Visualization Sciences Group die 2D Bilder über die Zeit aufgetragen und folgende 3D- Abbildung (Abbildung 75) generiert.

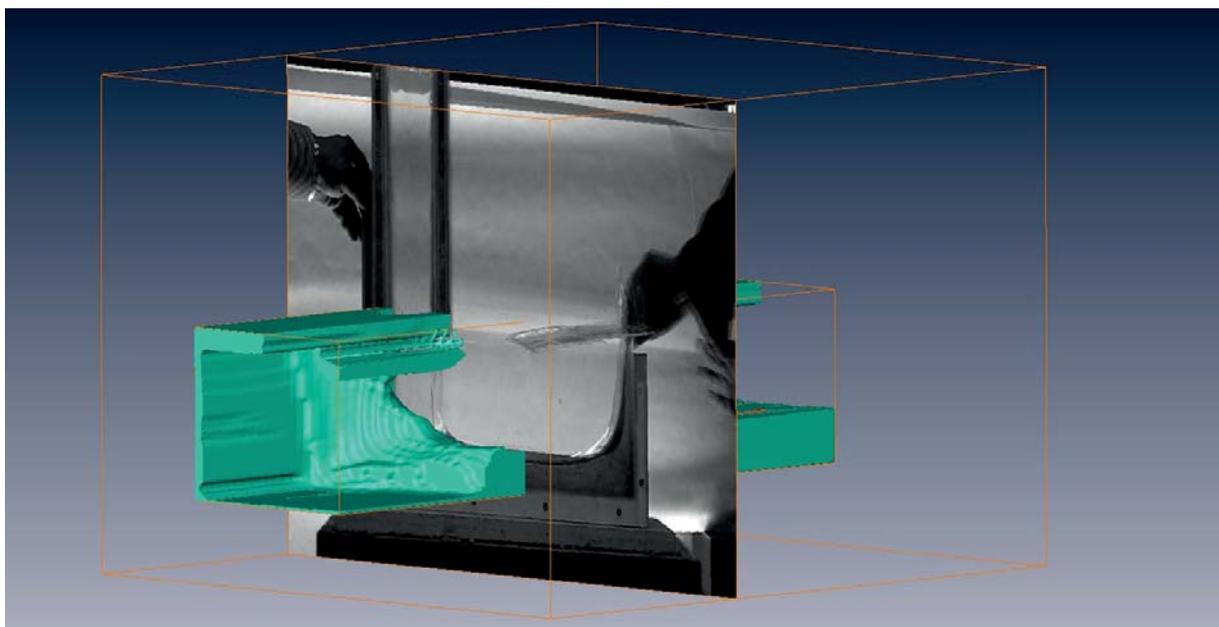


Abbildung 75 Visualisierung des L-Box Versuchs (Metzler, G.)



In der oben gezeigten Abbildung, wie auf den Fotos im Anhang, ist deutlich zu sehen, dass beim Einfließen der Flüssigkeit in die Schalung eine Streckung des Ausgussstroms stattfindet. Zudem bildet sich im unteren Bereich mit dem bereits am Schalungsboden befindlichen Material ein radialer Bereich aus. In diesem Bereich wird eine Radialbeschleunigung erzeugt, die zu einer Umlenkung der Fasern von der Vertikalen in die Horizontale führt. Diese Entwicklung ist allerdings nur für die Dauer eines kontinuierlichen Materialflusses zu beobachten. Nach diesem Bereich ist eine Beeinflussung der Faserorientierung fast nicht mehr möglich.

Eine Aussage über die Faserverteilung war nicht möglich, da das Zurückschwappen und die damit einhergehende Wellenbildung das Ergebnis verfälschten. Auf den Fotos sind keine einzelnen Fasern, jedoch die von den Fasern erzeugten Schattierungen deutlich zu erkennen. Dadurch ist auch festzustellen, dass sie anfänglich im Fall vertikal, später im Materialfluss horizontal ausgerichtet sind.

3.3.4 Ergebnisse der Versuche

Nach den Versuchen mit der Ersatzflüssigkeit bleibt folgendes festzuhalten:

- Die Fasern bleiben nach dem Eintritt in die Form in ihrer Lage weitgehend stabil.
- Die Kräfte durch das Fließen sind nicht so groß wie angenommen. Die Manipulation der Faser durch Strömung ist weitgehend unmöglich. Dies zeigte sich insbesondere bei der statistischen Auswertung. Dort traten Fasern auf, die 90° zur Fließrichtung lagen und diese Lage unverändert beibehielten, obwohl sie einem Geschwindigkeitsgradienten ausgesetzt waren.
- Aus dieser Beobachtung heraus muss die Manipulation der Faserorientierung unmittelbar nach Eintritt in die Schalung erfolgen.
- Das Einleiten von gerichteten Fasern kann nur bei gleichbleibender Fließgeschwindigkeit und im Band-Anguss-Verfahren erfolgen. Langsamere Fließgeschwindigkeiten in der Schalung führen zu einem Abbremsen der einfließenden Flüssigkeit. Ein abruptes Abbremsen des Materialstroms führt zu starken Richtungsänderungen der Faserpartikel. So können gerichtete Partikel wieder eine isotrope Orientierung erhalten.
- Für eine Befüllung der Schalung über einen Trichter spricht die hohe Fließgeschwindigkeit, die mit einer Rinne nicht zu erreichen ist. Durch die hohe Geschwindigkeit entsteht eine Verjüngung des einfließenden Materialstroms. Dieser Vorgang kann auch als Verstrecken verstanden werden, welches zu einer Faserorientierung in Fallrichtung führt.
- Bei dem L-Box-Versuch war klar zu erkennen, dass sich zwischen dem Einguss und dem Fließbereich in der Schalung eine Zwischenzone ausbildet, in der eine Radialbeschleunigung des Materials erzwungen wird. Durch diese Radialbe-

schleunigung ist es möglich, die durch den Streckvorgang gerichteten Fasern umzulenken. Dieser Radius nimmt mit steigender Einflussdauer ab, bis der Materialfluss aus dem Trichter versiegt.

3.3.5 Schlussfolgerung

Die hier vorgenommenen Versuche werden teilweise durch wirkliche Betonversuche zu ratifizieren sein. Dennoch wird bei den folgenden Betonversuchen darauf zu achten sein, dass lediglich Scherströme auftreten und die dominanten Dehnströme vermieden werden. Nur so kann eine Ausrichtung der Fasern in Fließrichtung sichergestellt werden.

Aus diesem Grund ist bei der Befüllung der Balken über eine Fließrinne darauf zu achten, dass das Material über die gesamte Bauteilbreite eingefüllt wird. Dies erfordert eine Fließrinne deren Rinnendurchmesser größer als die Bauteilbreite sein muss. Nach den durchgeführten Untersuchungen zur Faserorientierung, sollte jedoch die Befüllung der Schalung mit einem Trichter die besten Orientierungswerte liefern.



4 Selbstverdichtender Beton (SCC) mit Schnellzement SupraCem 45

In dem nun folgenden Kapitel wird der Beton aus dem Schnellzement SupraCem 45 mit selbstverdichtenden Eigenschaften beschrieben. Da es sich bei diesem Schnellzement um keinen genormten Zement handelt, wird ebenfalls ein Teil dieses Kapitels darin bestehen, seine Güte durch Bewertungsverfahren mit Betonen aus Normzementen gleichzusetzen. Damit soll gezeigt werden, dass dieser Beton dauerhaft und darüber hinaus ebenfalls für den Einsatz im Tunnelbau geeignet ist.

4.1 Einführung zum SCC

Die Idee vom Betonbau ohne Verdichtungsarbeit ist bereits sehr alt. In den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde der sogenannte Gussbeton entwickelt [40]. Bei der Entwicklung dieses Betons wurde festgestellt, dass die Sieblinie eine besondere Rolle einnahm und entscheidend den Bedarf an Bindemitteln beeinflusste. Schon zu dieser Zeit galt die Fuller-Kurve als Idealsieblinie. [37] Allerdings wurden damals keine Fließmittel eingesetzt. Die Konsistenz wurde ausschließlich über das Zugabewasser eingestellt, was auf Kosten der Dauerhaftigkeit ging. Darum wurden diese Gussbetone ausschließlich für Außenbauteile verwendet, welche im Anschluss mit Natursteinen oder Spritzmörtel verblendet wurden [37]. Ein Vorteil, den dieser Beton gegenüber dem damals üblichen Stampfbetonen besaß, war die hohe Produktivität. So war es bei dem Bau der Schwarzenbachtalsperre möglich eine Tagesbetonierleistung von bis zu 1300 m³ zu erreichen. Was für damalige Verhältnisse eine extrem hohe Leistung war [37].

Auf dieses Wissen konnte Okamura zurückgreifen, als er Mitte der 1980er- Jahre mit der Entwicklung des Selbstverdichtenden Betons begann. In Japan traten zu dieser Zeit gehäuft erhebliche Baumängel an Betonbauten auf, die durch unsachgemäßes Verdichten verursacht worden waren. Die Idee von Okamura war es, einen Beton zu erfinden, der keine Verdichtungsarbeiten mehr benötigte. Sein Bestreben war es, den Zementleim mit feiner Gesteinskörnung so stabil zu machen, dass das Grobkorn darin in Schwebe gehalten werden konnte. Die Sieblinienoptimierung, die bereits beim Gussbeton zur Anwendung kam, wurde auf den zementfeinen Bereich ausgedehnt. Zusammen mit den neuen Fließmitteln auf Polycarboxylat-Ether-Basis, die eine höhere Dosierung erlaubten als die Fließmittel auf Lignin-, Naphtalin- und Melaminsulfonatbasis, ohne zu einem Entmischen zu führen, war es ihm möglich gewesen, eine absolute Sedimentationsstabilität bei angestrebter niedriger Viskosität zu erreichen. [4] [37] Das von Okamura und Ozawa entwickelte Konzept für den Mischentwurf eines Selbstverdichtenden Betons ist in eigenen [4] [41] [42] sowie in Veröffentlichungen von Dritten [37] und seit 2003 auch in der SVB-Richtlinie des DAfStb zu finden. Grundlage des Entwurfs



ist die Idee der höchsten Packungsdichte die durch unterschiedliche Verfahren ermittelt werden kann.

In der SVB-Richtlinie ist eine passende Definition für diesen Beton formuliert:

„Selbstverdichtender Beton ist Normalbeton, der ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie alleine unter dem Einfluss der Schwerkraft fließt, entlüftet sowie die Bewehrungszwischenräume und die Schalung vollständig ausfüllt.“

Im Allgemeinen ist der SCC im Vergleich zu Normalbeton reicher an Feinteilen, dem sog. Mehlkornanteil ($\emptyset \leq 0,125$ mm). Diese Feinteile müssen jedoch nicht zwingend aus Zement bestehen, sondern können auch durch Zugabe von Zementzusatzstoffen erreicht werden. Zudem besteht die Möglichkeit die gewünschte Stabilität durch stabilisierende Betonzusatzmitteln zu erreichen. Je nach Design werden die SCC's in drei Typen unterteilt:

- Mehlkorntyp:
Mehlkorngehalt: 550-650 kg/m³
- Stabilisierertyp:
Mehlkorngehalt: 350-500 kg/m³
- Kombinationstyp:
abhängig von der Stabilisiererzugabe

Im Vergleich dazu hat ein normaler Rüttelbeton einen Mehlkornanteil von 350- 400 kg/m³.

In der Praxis hat sich allerdings der Mehlkorntyp (in Deutschland [37]) und der Kombinationstyp (in der Schweiz [43]) durchgesetzt. Obwohl der Mehlkorntyp nach dem Konzept von Okamura gut funktioniert, ist er doch empfindlich gegenüber Abweichungen in Sieblinie und Feuchtegehalt. Häufig wird ein Kombinationstyp gewählt, der in sich ein Mehlkorntyp ist und zusätzlich mit einem Stabilisator abgesichert wird (Beispiel: Baustelle Schwarzasperre – Schluchseewerke). Der Stabilisierertyp wird üblicherweise aus Kostengründen nicht verwendet.

Damit die gewünschte Funktionsweise eines SCC's erreicht wird, sind zwei Merkmale zu erfüllen:

1. Ausreichendes Fließvermögen
d.h. Der SCC muss so fließfähig sein, dass durch den Mischprozess eingebrachte Luft gut entlüftet, der Stahl, auch bei hohen Armierungsgraden, vollständig umschlossen und die Gefahr von Fehlstellen, wie z.B. Kiesnester, minimiert werden kann.

2. Ausreichendes Zusammenhaltvermögen

d.h. Der SCC benötigt eine Gefügestabilität damit keine Entmischungserscheinungen auftreten.

Diese konträr zueinander stehenden Bedingungen müssen dennoch beide erfüllt werden, um eine Sedimentation (Absinken der groben Gesteinskörnung) oder Separation (der Zementleim ist nicht mehr in der Lage die grobe Gesteinskörnung zu transportieren), im allgemeinen Entmischen genannt, zu verhindern.

Um die Empfindlichkeit dieses Systems zu verdeutlichen, wird in [44] darauf hingewiesen, dass bereits $\pm 3 \text{ l/m}^3$ in der Wasserdosierung ausreichend sein können, damit bei einem SCC eine Entmischung oder ein zu geringes Fließvermögen auftreten kann. Prinzipiell kann festgehalten werden, dass bereits kleinste Änderungen in der Betonzusammensetzung zu erheblichen Veränderungen der Eigenschaften des SCC's führen können.

Diesem Nachteil der Empfindlichkeit und der höheren Dosierung von Zement, Betonzusatzstoffen und -mitteln stehen allerdings auch einige Vorteile gegenüber. So ist mit einer gleichmäßigeren Betonqualität über das gesamte Betonbauteil zu rechnen. Damit einhergehend sind durch die höhere Qualität auch geringere Bauteilabmessungen vertretbar. Zudem sind komplizierte Formgebungen und höhere Bewehrungsdichten möglich. Nicht zu unterschätzen ist die geringere Lärmbelastung durch das Wegfallen des Verdichtungsprozesses. Zu guter Letzt ist die Einbauleistung mit einem SCC deutlich höher als mit einem normalen Rüttelbeton und somit ein schnellerer Baufortschritt realisierbar.

Um diese Vorteile auch vereinfacht nutzbar machen zu können, wurde neben zahlreichen nationalen Richtlinien auf europäischer Normungsebene im Jahr 2010 die EN 206-9 „Ergänzende Regeln für selbstverdichtenden Beton“ eingeführt. Diese ist in Deutschland Bestandteil der LTBs (Liste der Technischen Bestimmungen).

4.2 Bindemittel SupraCem 45

Da bei diesem Forschungsvorhaben der Beton nicht mit Normalzement, sondern mit Schnellzement hergestellt wurde, soll zu Beginn Schnellzement im Allgemeinen betrachtet werden.

Schnellzemente lassen sich nach [45] in zwei Arten unterteilen:

- Einkomponentensysteme – Zemente mit einer Hauptkomponente
- Mehrkomponentensysteme – Zemente die mehrere Hauptkomponenten besitzen

Um die gewünschte ausreichend hohe Hydratationsgeschwindigkeit zu erreichen, kommen nach [45] als Hauptbestandteile folgende Varianten zum Einsatz:



- Ca-Silikate : Portlandzemente mit hohem Alit (C_3S) –Gehalt
- Ca-Aluminate : Tonerdezement mit CA-Klinker
- Ca-Aluminatsulfat: CAS-Zemente mit $C_4A_3\bar{S}$
- Ca-Aluminatfluorid: $C_{11}A_7F$ -Klinker

Bei den Einkomponentensystemen sind folgende Schnellzemente üblich:

Portlandzement

Hier kommen spezielle Rohmehlzusammensetzungen zum Einsatz, die einen hohen Kalkstandard (KSt > 97) und /oder Tonerdemodul (TM) besitzen. Nach dem Brennen dieser Rohmehle bilden sich Klinker mit erhöhtem C_3S - und/oder C_3A - Gehalt. Zusätzlich kann durch die Mahlung des Klinkers zu Zement die Abbindegeschwindigkeit durch die Mahlfineinheit zusätzlich gesteigert werden. Die Reaktivität von C_3A ist verglichen mit den anderen Zementphasen sehr hoch. Das Abbindeverhalten von C_3A wird durch die Zugabe von Sulfatträgermischungen (Dihydrat, Halbhydrat und Anhydrit III) geregelt und eingestellt. Dieser ist bei Normzementen durch die EN 197-1 allerdings auf 4 M-% begrenzt. Durch diese Begrenzung ist der Anteil von möglichem C_3A Gehalt in Normzement ebenfalls limitiert. Diese Begrenzung ist notwendig, da sonst die Gefahr von Sulfatreiben und Sekundärettringitbildung besteht.

Tonerdezement

Die Hauptphase des Tonerdezementes ist, wie ebenfalls in Abbildung 77 ersichtlich, Monocalciumaluminat (CA). Dieses bildet mit Wasser das Hydrat CAH_{12} , welches zu schnellen hohen Festigkeiten (bis zu 80 MPa nach 24 h [45]) führt. In [46] wird die Hydratation des Tonerdezementes wie folgt beschrieben:

Das für die Festigkeit verantwortliche CAH_{12} , welches allerdings nur metastabil ist, wird bevorzugt bei Temperaturen < 10°C gebildet. Bei Temperaturen zwischen 10°C und 27°C bildet sich aus dem CA neben CAH_{10} das ebenfalls metastabile C_2AH_8 . Bei noch höheren Temperaturen treten, nach vorheriger Bildung von C_2AH_8 , zunehmend auch die stabilen Phasen C_3AH_6 und Gibbsit (γ - AH_3) auf. Zur besseren Übersicht im Folgenden die möglichen Reaktionsgleichungen der Hydratation von Monocalciumaluminat:



Problematisch ist allerdings, dass die Hydratationsprodukte CAH_{10} und C_2AH_8 nur metastabil sind und sich bei geeigneten Umgebungsbedingungen zu den stabilen Phasen C_3AH_6 und Gibbsit umwandeln können. Als geeignete Voraussetzung für die Umwandlung ist in [45] und [46] eine Umgebungstemperatur von > 23 °C mit gleichzeitig vor-

herrschender Feuchtigkeit genannt. Diese Kristall-Transformation ist bereits seit den 1930er Jahren bekannt und wird seitdem als Umwandlung bezeichnet. Folgende Reaktionen sind damit gemeint:



Mit dieser Umwandlung gehen ein wachsender Porenraum und ein steigender Wassergehalt einher. Die Steigerung des Porenraums ist dadurch bedingt, dass das C_3AH_8 zusammen mit dem $\gamma\text{-AH}_3$ nur etwa 48,0 Vol-% des CAH_{10} bzw. 63,6 Vol-% des C_2AH_8 einnimmt. Mit Fortschreiten der Umwandlung steigt demnach das Porenvolumen und in gleichem Maße wird die Festigkeit reduziert. Ein weiterer negativer Effekt ist bei der Umwandlung von CAH_{10} festzustellen. Hier wird durch die Reaktion mit 55,0 Vol-% volumetrisch mehr Wasser frei, als Porenraum (52,0 Vol-%) zur Verfügung steht. In dichtem Zementstein werden daher Druckspannungen hervorgerufen, die sich als Dehnung bemerkbar machen.

Mit fortschreitender Umwandlung steigt äquivalent zur Porosität auch die Permeabilität was zu einer schneller einhergehenden Karbonatisierung des Zementes führt. Dies bewirkt ein Absenken des pH-Wertes und damit den Abbau des Korrosionsschutzes. Somit ist bei entsprechenden Umweltbedingungen mit Korrosion der Stahlbewehrung zu rechnen.

Die Problematik mit dem Wasser aus der Umwandlung ist nach [46] durch geeignete Betonrezepturen mit w/z -Werten $\leq 0,4$ gelöst worden. In diesen Rezepturen steht dann genügend nicht reagierter CA-Klinker zur Verfügung, der wieder neue Hydratprodukte bilden kann. Durch diese Reaktion wird die Festigkeit wieder gesteigert und der Umwandlungsprozess verlangsamt. Mit derartigen Rezepturen tritt nach [45] kein schädigender Festigkeitsverlust mehr auf. Auch gibt es Untersuchungen von *Mifgley* [46], dass der Umwandlungsprozess in Proben, welche bei 18 °C gelagert werden, ohne Festigkeitsverlust stattfindet.

Die Umwandlung war jedoch nicht die vordergründige Ursache, weshalb Tonerdezement in Deutschland nicht mehr für tragende Betonbauteile zugelassen ist. Grund war nach [46] das vermehrte Auftreten von Spannungsrisskorrosion an Spannbetonfertigteilen. Verursacht wurden diese sowohl durch den Sulfidgehalt des stark reduzierend gebrannten Tonerdezementes, als auch durch die fortgeschrittene Umwandlung und damit einhergehende Absenkung des pH-Wertes unter 9.



Calciumaluminatsulfatzement (z.B. Denka CSA#20)

Die Hauptklinkerphasen des Calciumaluminatsulfatzementes sind nach [45] $C_4A_3\bar{S}$, β - C_2S und $C_2(A,F)$. Diese Zemente zeichnen sich durch hohe Frühfestigkeiten und starkes Quellen aus. Beides wird durch die schnelle Ettringitbildung hervorgerufen. Für eine gute Nacherhärtung dieser Zemente sorgen der Belit und der Ferrit. Auch wenn diese Zemente sich durch eine hohe Frühfestigkeit auszeichnen, so sind sie doch eher als Quellzemente des Typs K denn als Schnellzement bekannt.

Calciumaluminatfluorid Zement (z.B. SupraCem 45)

Bei diesen Zementen wird durch die Zugabe von CaF_2 zum Rohmehl eine kalkärmere Variante des C_3A als $C_{11}A_7F$ gebildet. Dies ist nah verwandt mit dem Mayenit ($C_{12}A_7$). In [46] wird zudem darauf verwiesen, dass Mayenit sehr wohl schnell mit Wasser reagiert, aber langsamer ist als das im Portlandzement enthaltene C_3A . Allerdings ist, wie in Abbildung 77 zu sehen ist, der C_3A -Gehalt im CEM I mit ca. 10 M-% doch erheblich niedriger als der $C_{12}A_7$ -Gehalt im SupraCem 45, einem Vertreter dieser Zementart, mit ca. 15 M-%. Über die Hydratation dieser Zemente ist nach [45] folgendes bekannt: Das Erstarren und die Erhärtung in den ersten Stunden ist vor allem durch die Bildung von Ettringit bestimmt. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Alithydratation in diesen Systemen früher und doppelt so schnell stattfindet als in Normalzementen. Dies wird auch durch die hohen Druckfestigkeiten im Alter von drei Stunden (ca. 14 MPa [47]) belegt, da die übliche Induktionsperiode von C_3S im CEM I bei ungefähr sechs Stunden liegt. In [46] wird explizit darauf hingewiesen, dass diese Induktionsperiode im normalen Portlandzement weder durch die Zusammensetzung und Mahlfeinheit noch durch Änderungen im w/z-Wert und der Gesteinskörnung beeinflusst werden kann.

Zum Abschluss dieses kurzen Exkurses über die Arten der Schnellzemente soll zum Abschluss noch das am häufigsten anzutreffende Mehrkomponentensystem vorgestellt werden:

Schnellzement auf Basis von Portlandzement und Tonerdezement

Diese Systeme sind im Allgemeinen auch als Schnellbinder bekannt. Jedoch weist *Balsevics* in [48] darauf hin, dass alleiniges Mischen von Portlandzement und Tonerdezement noch keinen Schnellbinder ergibt. Um eine Steigerung der Frühhochfestigkeit zu erreichen, haben sich Sulfate und Calciumcarbonat als Zusätze für diese Mischungen bewährt. Eine von *Balsevics* optimierte Mischung hat folgende Zusammensetzung:

Portlandzementklinker	76 M-%
Tonerdezement	14 M-%
CaSO ₄	6 M-%
CaCO ₃	3 M-%
Na ₂ SO ₄	1 M-%

Das Einsatzgebiet von solchen Systemen ist bei der Sanierung von Betonflächen und im Estrichbereich. Als ein vom DIBT zugelassener Vertreter mit Tonerdezementanteil von etwa 18 M-% ist der Wittener Schnellzement 32,5 R-SF Zulassungs-Nr. Z-3.12-1206 zu nennen.

Der für dieses Forschungsvorhaben verwendete Schnellzement ist ein Vertreter der Calciumaluminatfluorid Zemente. Allerdings ist der SupraCem 45 der Firma Schretter & Cie am ehesten vergleichbar mit einem Portlandhüttenzement (CEM II/A-S 52,5 R). Die nahe Verwandtschaft zu einem Portlandzementklinker ist im Gibbs'schen Dreieck in Abbildung 76 gut zu erkennen. Zudem ist aus dem Diagramm zu entnehmen, dass der Aluminatgehalt des SupraCem 45 auf Kosten des Calciumoxides im Vergleich zum Portlandzementklinker leicht erhöht ist.

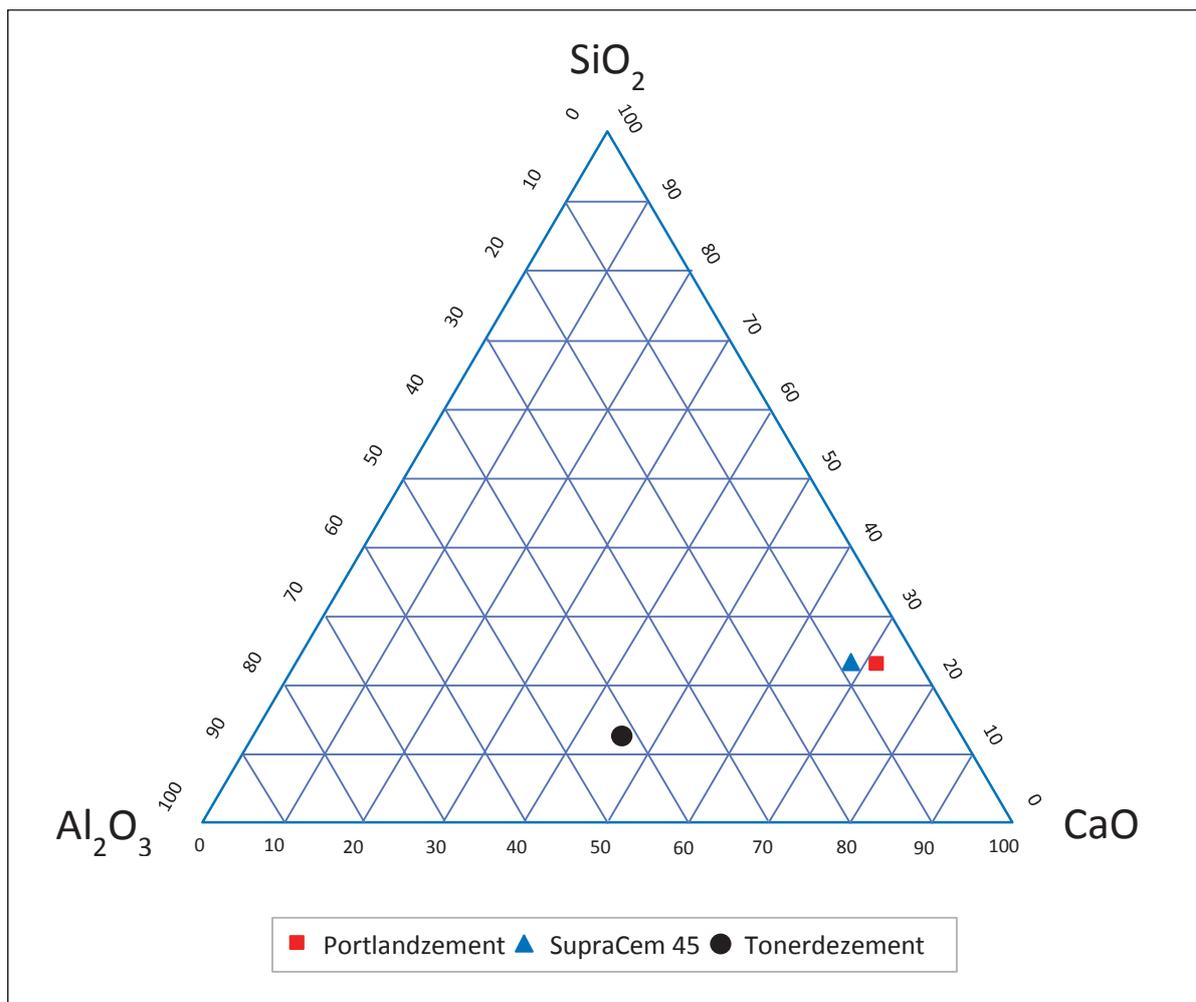


Abbildung 76 Gibbs-Dreieck für Zement



Eine andere Darstellung, die die Ähnlichkeit mit CEM I zeigt, ist die Darstellung über die Klinkerphasen in Abbildung 77. Wie hier deutlich wird, liegt die Aluminatphase des SupraCem 45 nicht wie in üblichen Portlandzementen ausschließlich als C_3A sondern auch als $C_{12}A_7$ bzw. $C_{11}A_7F$ vor. Zudem fällt der stark erhöhte Sulfatgehalt auf, der weit über dem zulässigen Gehalt von 4 M-% nach EN 197-1 liegt. Dieser wird allerdings benötigt, um das Abbindeverhalten (Ettringitbildung) des SupraCem 45 steuern zu können. Jedoch bedarf dadurch dieser Schnellzement einer eigenen Zulassung, die vom Österreichischen Institut für Bautechnik in Form einer Europäischen Technischen Zulassung (ETA 08/0027) ohne jegliche Einsatzbeschränkung erteilt wurde. Eine Zulassung durch das DIBT ist beantragt und sollte 2015 erteilt werden.

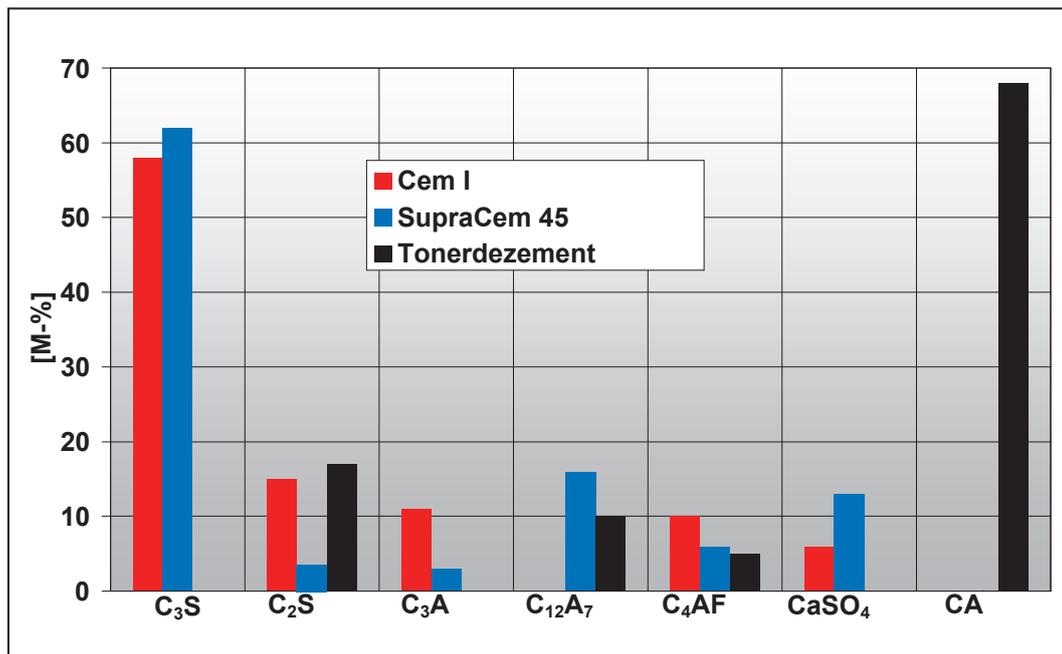


Abbildung 77 Mineralogische Zusammensetzung der Zemente

Ein weiteres deutliches Indiz dafür, dass es sich bei dem hier verwendeten SupraCem 45 um einen Calciumaluminatfluorid Zement handelt, zeigt sich bei den Frühfestigkeiten der Zemente an Normprismen, die in Abbildung 78 dargestellt sind. Es ist deutlich erkennbar, dass, wie zuvor beschrieben, der Festigkeitszuwachs des SupraCems 45 durch das C_3S bereits nach einer Induktionsperiode von etwa vier Stunden beginnt, während die CEM I – Zementen die, in [46] genannte, volle Induktionsperiode von sechs Stunden benötigen.

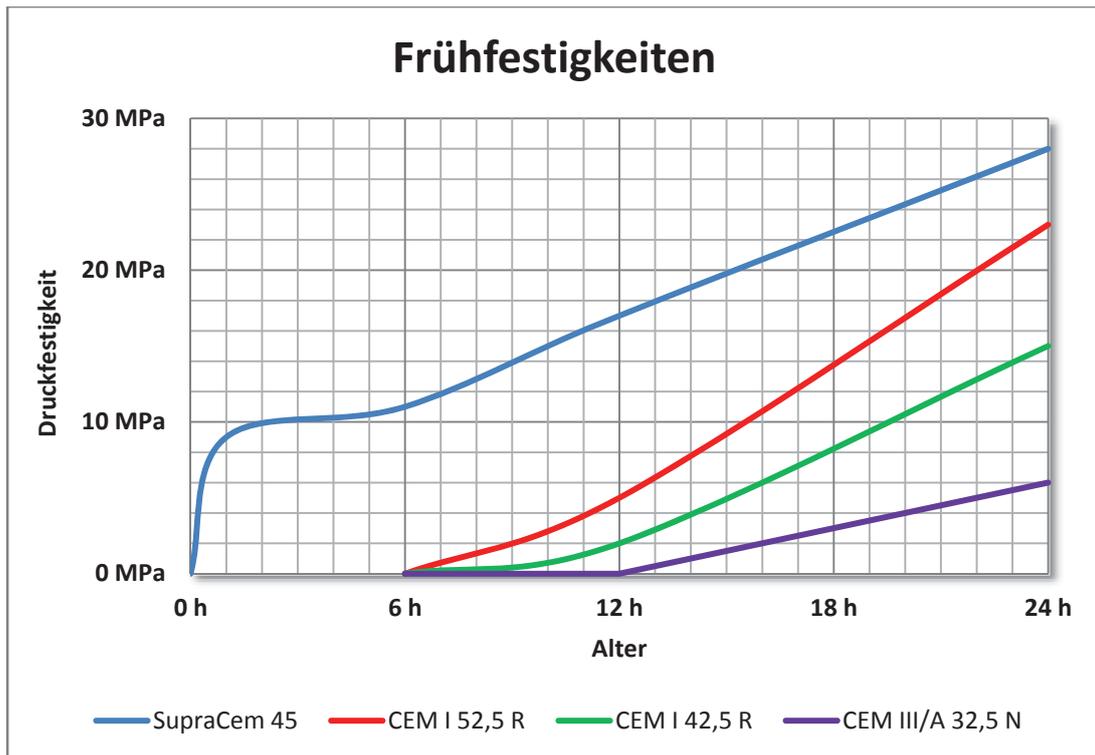


Abbildung 78 Frühfestigkeiten verschiedener Zemente

Die Abbindezeit des SupraCems 45 lässt sich über den w/z-Wert nur bedingt einstellen. Dies kann durch die in Tabelle 4 gezeigten Versuchsergebnisse belegt werden.

Tabelle 4 Abbindezeit SupraCem 45 in Abhängigkeit vom w/z-Wert

w/z-Wert	Abbindezeit
0,35	4 Minuten
0,40	7 Minuten
0,45	12 Minuten
0,50	14 Minuten
0,55	15 Minuten
0,70	15 Minuten
1,00	15 Minuten

Als wesentlich praktikabler zur Einstellung der Verarbeitungszeit hat sich der Einsatz von Fruchtsäuren erwiesen. Mit diesen ist das Erstarren auf bis zu 90 Minuten verzögerbar. Die Art der Zugabe des Verzögerers ist entscheidend für seine Wirksamkeit. Am effektivsten ist das Auflösen bzw. Zugeben in das Anmachwasser. Somit ist eine optimale Verteilung des Wirkstoffes im Beton gewährleistet und es sind die längsten Verarbeitungsdauern zu erreichen. Zudem sind gleichzeitig niedrige w/z-Werte von $\leq 0,40$ und 20 Minuten Verarbeitungszeit möglich. Eine weitere Möglichkeit ist, den Zement bereits vorher mit dem pulverförmigen Verzögerer zu homogenisieren bzw. eine Werkstrockenmischung herzustellen. Versuche haben allerdings gezeigt, dass bei solchen Mischungen die maximale Verarbeitungszeit geringer ausfällt. Zudem ist bei Fertigmischungen darauf zu achten, dass das Anmachwasser vorgelegt wird und der w/z-



Wert nicht unter 0,45 liegt. Das Vorlegen des Anmachwassers bewirkt, dass man sich beim Anmischen des Betons von einem w/z -Wert = ∞ dem gewünschten w/z -Wert annähert und so eine frühzeitige Keimbildung unterbunden wird. Bei umgekehrter Mischreihenfolge besteht die Gefahr, dass Mischungen, die für 60 Minuten Verarbeitungsdauer ausgelegt sind, im schlimmsten Fall nur noch 30 Minuten aufweisen. Dieser Effekt kann ein Problem darstellen, welches leicht vermeidbar ist.

Die Problematik von Keimbildungen ist bei verzögerten Systemen nicht zu unterschätzen. Sobald im SupraCem 45-System eine erste Keimbildung stattgefunden hat, beginnt der Erhärtungsprozess und das Erstarrungsende ist nach etwa fünf Minuten erreicht. Wenn dieser Prozess erst einmal begonnen hat, ist er nicht mehr aufzuhalten.

Die Keimbildung wird sowohl durch ein falsches Mischregime als auch durch reaktive Verunreinigungen oder Anbackungen in Mischer- und Betontransportequipment gefördert. Bei der Wahl der Maschinenteknik ist darauf zu achten, Totbereiche zu vermeiden bzw. regelmäßige Reinigungsintervalle einzuhalten. Auch sollte vermieden werden, dass unterschiedliche zementöse Materialien mit SupraCem 45-Systemen die gleichen Förderwege verwenden. Als ein gutes und praktikables Mittel haben sich Inline-Systeme erwiesen, die für die Dauer der SupraCem 45 Anwendung in die vorhandenen Förderwege eingebracht werden und nach deren Beendigung wieder gezogen werden können. Für die Mischregime haben sich zum einen Chargenmischer, zum anderen aber auch Durchlaufmischer mit kunststoffüberzogenen Mischwerkzeugen bewährt. Mit Letzterem konnte bereits zwei Stunden lang problemlos und kontinuierlich ein SupraCem 45-SCC (SCC S 8 / Schretter & Cie) produziert und verarbeitet werden.

Zudem ist die Auswahl der Fließmittel von Bedeutung. So wurden vom Autor insgesamt zwölf verschiedene Fließmittel verschiedener Hersteller in Mörtel und Betonversuchen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass nur zwei brauchbar sind. Die anderen Fließmittel benötigten entweder zu hohe Dosierungen, die auch über den erlaubten Maximaldosierungsangaben der Hersteller lagen, um die gewünschte Konsistenz zu erreichen, oder sie legten den Verzögerer lahm wodurch die auf eine Stunde projektierte Verarbeitungsdauer in einem unzulässigen Maß unterschritten wurde. Diese Untersuchungen sind im Anhang aufgeführt.

4.3 Rezeptur des SC45-SCC

Die Wahl der Ausgangsstoffe für folgende Betonrezeptur war von mehreren Umständen beeinflusst. Da unter anderem mit dieser Forschungsarbeit nachzuweisen war, dass sich Fertigteile mit dem Schnellzement SupraCem 45 herstellen lassen, stand der Zement fest. Ziel war es, mit derselben Zementmenge wie bei der Tübbingproduktion in



Brixlegg für die Unterinntaltrasse Los H3-4 auszukommen. Die dort verwendete Tübbingbetonrezeptur war durch die Teilnahme am FFG-Projekt Nr. 813678 bekannt. Damals wurden die Tübbinge mit einem Beton aus 420 kg/m^3 CEMI 52,5R hergestellt. Somit stand die maximal zulässige Zementmenge ebenfalls fest.

Die Wahl der Gesteinskörnung wurde durch den möglichen Einsatzort für eine derartige Tübbingproduktion bestimmt. Als anstehendes Infrastrukturprojekt in Tirol fiel dabei die Wahl auf das Gemeinschaftskraftwerk Inn (GKI). Ein möglicher Produktionsstandort wäre damit, in der Nähe des geplanten Fensterstollens Maria Stein, das dort ansässige Betonwerk Hilti & Jehle. Aus diesem Grund wurde die Gesteinskörnung für die Betonversuche von dieser Firma bezogen. Hierbei handelte es sich um Innschotter der Fraktionen 0/2, 2/4, 4/8 und 8/16. Die dazugehörigen Kornverteilungen sind in Tabelle 5 zu sehen.

Tabelle 5 Kornverteilungen der Gesteinskörnung Hilti & Jehle

Gesteinskörnungen			Kornverteilung, Siebweite [mm]										
			0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	
Art		Hersteller/Lieferant	Durchgang, M.-%										
0 / 2	mm		Sand	Hilti & Jehle		9,9	21,5	39,5	65,4	92,7	100,0	100,0	100,0
2 / 4	mm	Sand	Hilti & Jehle				0,8	3,0	15,9	96,9	100,0	100,0	100,0
4 / 8	mm	Kies	Hilti & Jehle				0,3	0,3	1,2	15,8	93,0	100,0	100,0
8 / 16	mm	Kies	Hilti & Jehle						0,1	0,1	3,1	90,4	100,0

Auffällig ist der niedrige Feinkornanteil dieser Kornverteilung der auch verdeutlicht, dass es sich um eine aus einem Fluss und nicht aus einem Steinbruch gewonnene Gesteinskörnung handelt. Des Weiteren war die Kornform eher rund denn kantig. Dies bedeutete, dass für einen SCC mit diesem Zuschlag zusätzliche Feinteile von Nöten waren. Auch würden die zu erzielenden Festigkeiten niedriger sein als mit einem Kantkorn. Allerdings wäre der Leimbedarf durch die geringere Oberfläche der Gesteinskörnung niedriger. Da im SCC allerdings der Leimgehalt immer sehr hoch ist, würde dieser Einfluss nur bedingt zum Tragen kommen.

Durch den niedrigen Feinanteil der Gesteinskörnung und die Deckelung der Zementmenge stand so für den SCC ein Mehlkorngesamt von 500 kg/m^3 zur Verfügung – zu wenig für einen SCC des Mehlkorntyps. Daher war es notwendig, den Feinkornanteil zu erhöhen. Da die Silobelegung der Firma Hilti & Jehle bekannt war und dort kein Steinmehl zur Verfügung stand, fiel die Wahl auf das vorhandene AHWZ Hydraulit M. Durch eine Zugabe von 100 kg/m^3 war es möglich, den benötigten Mehlkorngesamt auf nun insgesamt 591 kg/m^3 zu steigern.

Um eine optimale Verzögerbarkeit von 60 Minuten zu erreichen, wurde ein w/z_{eq} -Wert von 0,46 gewählt. Für die Verzögerung des SupraCem 45 wurde die „Weinsäure fein“



der Firma Jungbunzlauer verwendet. Mit einer Dosierung von 0,3% v. SupraCem 45-Gehalt war die angestrebte Offenzeit zu erreichen.

Wie bereits erwähnt, waren zwölf Fließmittel auf ihre Verträglichkeit mit dem Tartrat untersucht worden (s. Anhang). Letztendlich fiel die Wahl auf das Glenium 323 Mix der Firma BASF. Für dieses Fließmittel sprachen dessen weite Verbreitung in den Transportbetonwerken sowie der günstige Preis. Mit einer Dosierung von 0,75% vom Zement war die Dosierung im üblichen Rahmen und es konnte ein Setzfließmaß nach EN 12350-8 von 68 cm bis 72 cm realisiert werden.

Zusammenfassend ist in Tabelle 6 die Rezeptur und in Abbildung 79 die Sieblinie des entwickelten SC-SCCs gezeigt:

Tabelle 6 Betonrezeptur des SC-SCC mit dazugehöriger Stoffraumrechnung

AUSGANGSSTOFFE					
Stoff	Art	Hersteller	Gesteinskörnung	Art	Hersteller/Lieferant
Zement 1	SC 45	Schretter & Cie	0 / 2 mm	Sand	Hilti & Jehle
Zusatzstoff 1	Hydraulit M	Schretter & Cie	2 / 4 mm	Sand	Hilti & Jehle
Zusatzmittel 1	C 323 Mix	BASF	4 / 8 mm	Kies	Hilti & Jehle
Zusatzmittel 2	Weinsäure	Jungbunzlauer	8 / 16 mm	Kies	Hilti & Jehle
STOFFRAUMRECHNUNG					
Gewählter w/z_{eq} -Wert	0,46			Dichte t/m^3	Stoffraum in dm^3/m^3
Wasser- incl. Zusatzmittelgehalt w_{eff}	230 kg/m^3				230
Zementgehalt 1	420 kg/m^3			: 2,960	142
Zusatzstoffgehalt 1	k-Wert 0,8	100 kg/m^3		: 2,630	38
anrechenbarer Zusatzstoffgeh.	$f = 0,25 \times CEM$	100 kg/m^3		 	
Luftporengehalt	1 Vol.-%			(x10)	10
Erforderlicher Zuschlaggehalt	1596 kg/m^3			 	580
Zusammensetzung für: 1,000 m³					
Gesteinskörnung	Anteil Vol.-%	Stoffraum dm^3/m^3	Kornrohddichte kg/dm^3	Masse (GK trocken)	
0/2 mm Sand	45,0%	261	2,750	718 kg/m^3	
2/4 mm Sand	10,0%	58	2,750	160 kg/m^3	
4/8 mm Kies					
8/16 mm Kies	45,0%	261	2,750	718 kg/m^3	
Summe	100,0%	580	 	1596 kg/m^3	
Zement 1 : SC 45				420 kg/m^3	
Zusatzstoff 1: Hydralit M				100 kg/m^3	
Wasser _{eff.} + Kernfeuchte:				230 kg/m^3	
ZM1 : C 323 Mix	0,75 M.-% vom Zementgehalt			3,15 kg/m^3	
ZM2 : Weinsäure	0,30 M.-% vom Zementgehalt			1,26 kg/m^3	
Sollwert Frischbetonmasse (theoretisch)				2350 kg/m^3	

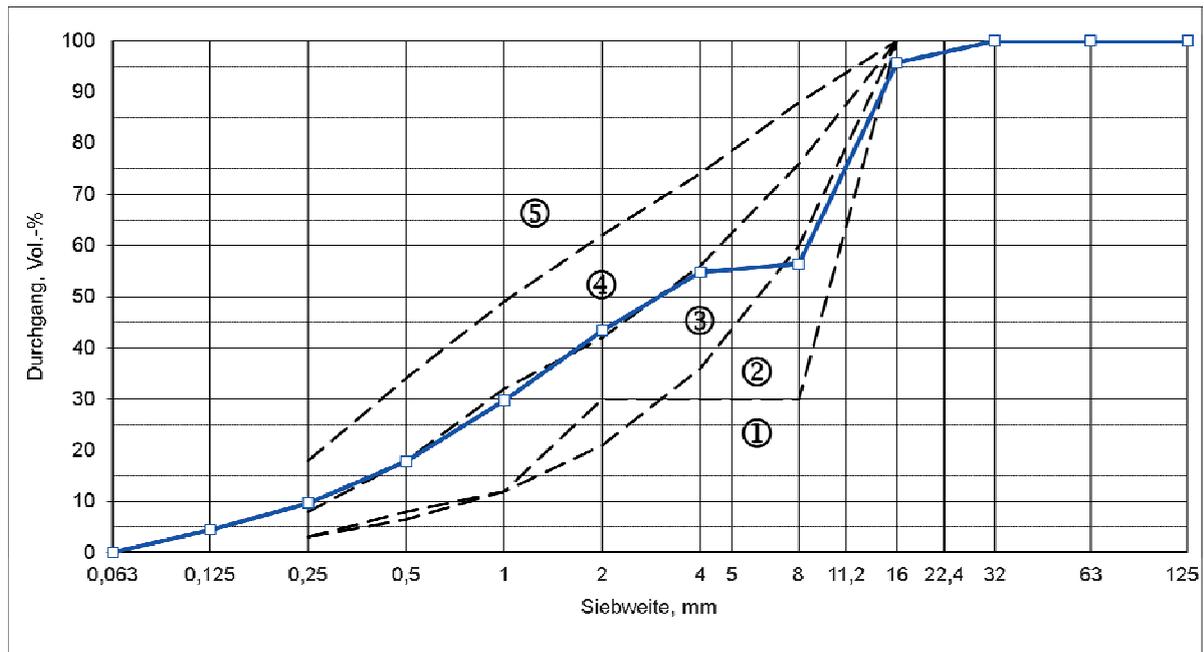


Abbildung 79 Sieblinie des entwickelten SC-SCC's

Die hier vorgestellte und entwickelte Rezeptur ist die Basis für die in Kapitel 5 beschriebenen Balkenversuche sowie für die in Kapitel 6 beschriebenen Kleintübbingversuche. Dieser Mischung wurden lediglich unterschiedliche Mengen und Dimensionen von Stahlfasern des Herstellers KrampHarex beigemischt.

Wie es in der Betontechnologie üblich ist, wurde diese 0-Mischung ohne Fasern einer Erstprüfung unterzogen. Ziel einer solchen Erstprüfung ist es, die Frisch- und Festbetoneigenschaften festzuhalten, um diese mit Proben aus der laufenden Produktion vergleichen zu können. Auch wenn in den späteren Betonagen Fasern zum Einsatz kommen, die im Allgemeinen zu höheren Festigkeiten führen, wurde diese Prüfung ohne Fasern durchgeführt, da einige Prüfungen wie beispielsweise die Spaltzugfestigkeit nicht mit Fasern gemessen werden können. Im Rahmen der Erstprüfung wurden Balken (12 cm x 12 cm x 36 cm) und Würfel mit 15 cm Kantenlänge hergestellt. Die Ergebnisse dieser Erstprüfung sind in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

4.3.1 Frischbetoneigenschaften

Die Frischbetonprüfung umfasste folgende Prüfungen:

- Konsistenzmessung nach EN 12350-8 (Setzfließmaß ohne Ring)
- Frischbetonrohichte nach EN 12350-6
- Gesamtwassergehalt nach ONR 23303 Abschnitt 8.4.2

Zusätzlich wurden an der akkreditierten Prüfanstalt Wasser Tirol in Ötztal-Bahnhof folgende Prüfungen durchgeführt:



- Messung des Temperaturanstiegs durch Hydratationswärme nach ONR 23303 Abschnitt 9.16. Gemessen an einem isolierten 200 mm x 200 mm x 200 mm Würfel
- Schwinden nach ÖNORM B 3329

Bei der Konsistenzprüfung nach EN 12350-8 wurde auf den Blockierring verzichtet, da in der späteren Anwendung keine Armierungseisen verwendet wurden.

Nachfolgend sind die im Labor der Universität Innsbruck ermittelten Daten zusammengefasst:

Konsistenzmessung:



Strecke 1: 710 mm
Strecke 2: 725 mm

Mittelwert: 720 mm

Abbildung 80 Setzfließmaß der Erstprüfung
(ohne Fasern)

Frischbetonrohichte:

8l Frischbeton: 18,841 kg $\rho = 2,355 \text{ t/m}^3$

Der Vergleich mit der theoretisch errechneten Dichte von $2,350 \text{ t/m}^3$ zeigt, dass die Mischung der Rezeptur entspricht und ordnungsgemäß entlüftet. (vgl. Tabelle 6).

Gesamtwassergehalt nach ONR 23303 Abschnitt 8.4.2 (Mikrowellenverfahren)

Einwaage Frischbeton: $m_f = 2000 \text{ g}$

Getrockneter Beton: $m_t = 1805 \text{ g}$

Wasser in der Probe: $w = 195 \text{ g}$ entspricht $w_{\%} = 9,75$

Für $w_{\text{kg/m}^3}$ gilt:

$$w_{\text{kg/m}^3} = \frac{w_{\%} \cdot \rho [\text{kg/m}^3]}{100}$$

$$w_{\text{kg/m}^3} = 229,6 \text{ kg/m}^3$$

Bei einem rezeptierten Wassergehalt von 230 kg/m^3 ist mit diesem Wert nachgewiesen, dass die Mischung der Rezeptur entspricht. (vgl. Tabelle 6)

Die Ergebnisse des Temperaturanstiegs durch Hydratationswärme sind in Abbildung 81 und die des Schwindverhaltens in Abbildung 82 dargestellt

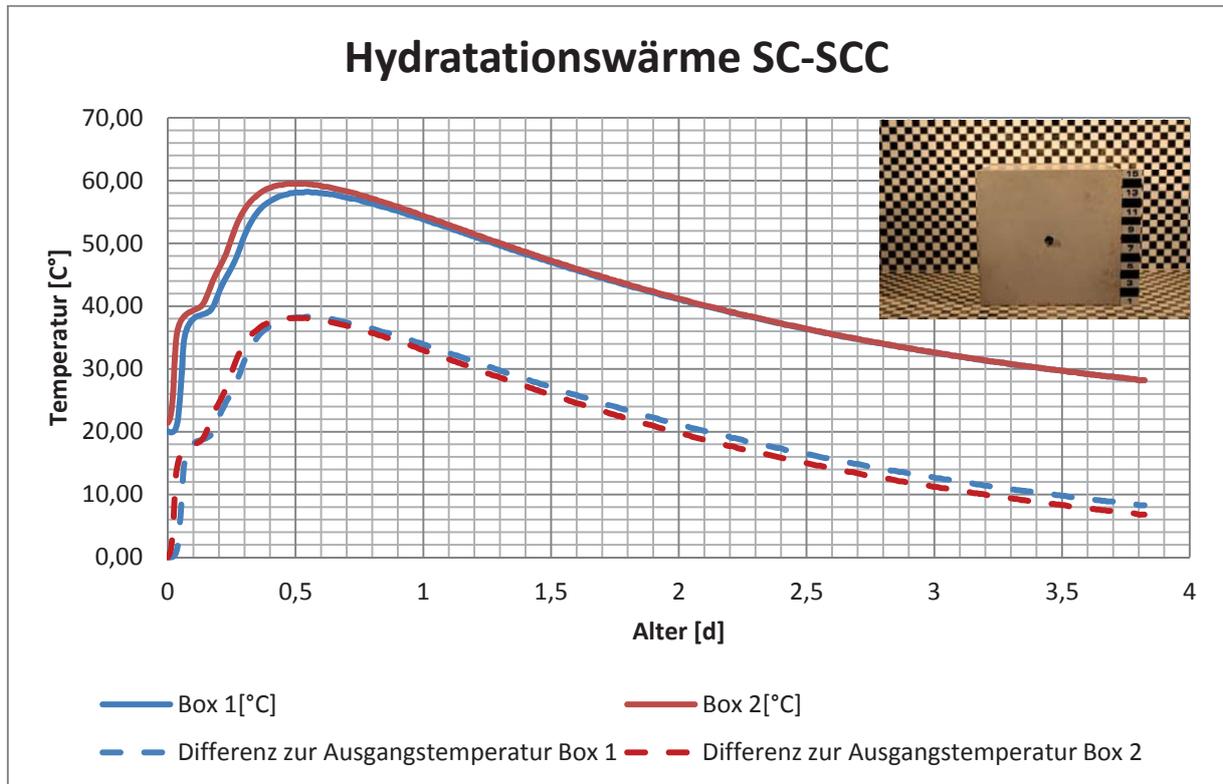


Abbildung 81 Hydratationswärme des SC-SCC nach ONR 23303 Abschnitt 9.16

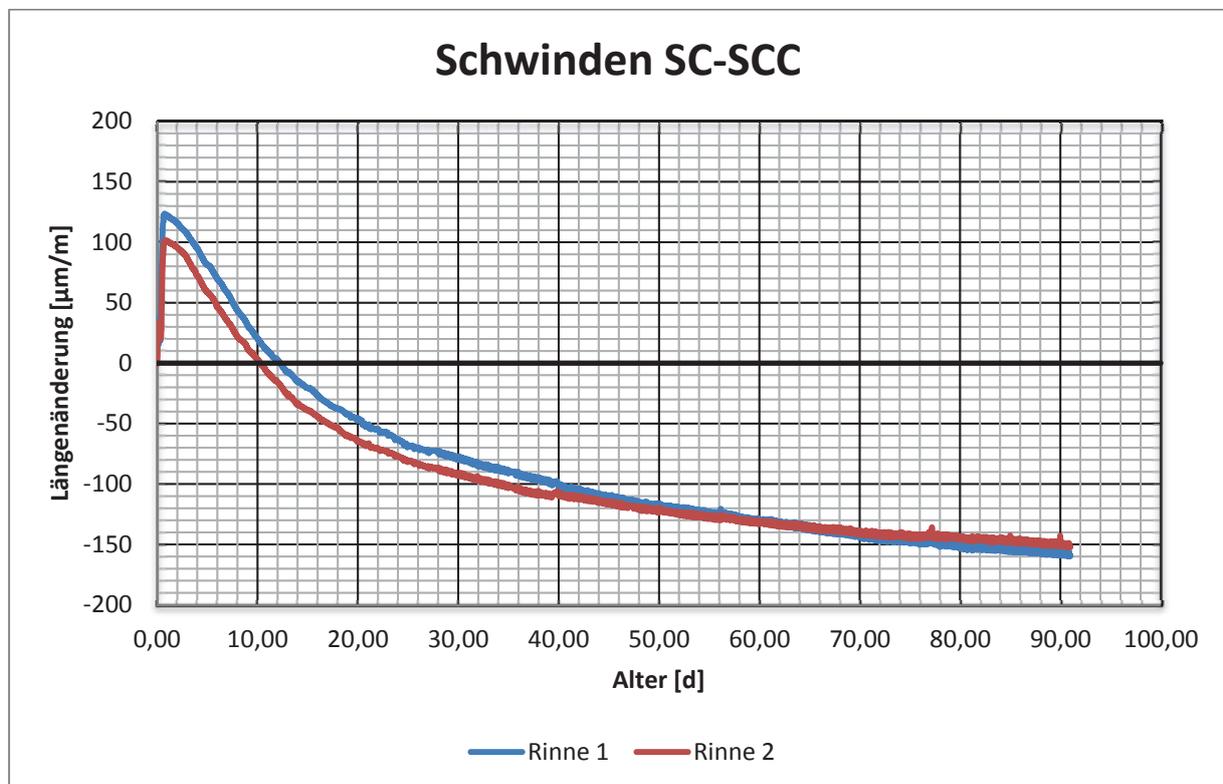


Abbildung 82 Schwinden nach ÖNORM B 3329



Als Ergebnis dieser beiden Untersuchungen bleibt festzuhalten, dass der SC-SCC eine Hydratationswärme entwickelt, die bei diesem Test die in der ÖVBB – Richtlinie „Tübbingsystem aus Beton“ erlaubte maximale Bauteiltemperatur von 55 °C, wenn auch nur knapp, übersteigt und somit der Nachweis der Expositionsklassen gemäß ÖNORM B 4710-1 NAD 10 vorerst nicht erbracht werden konnte. Da die Messbedingungen hier jedoch schärfer sind als bei einer Messung am Bauteil, soll die Annahme, die Temperatur im Bauteil steige nicht über die erlaubten 55 °C, durch eine Messung am Bauteil validiert werden. Zusätzlich wurde eine WU-Prüfung veranlasst um die Expositionsklasse XC4 nachweisen zu können.

Die Schwindmessung zeigt, dass durch das anfängliche Quellen (im Mittel 0,113 ‰) der SC-SCC zu einem niedrigen Schwinden (mittleres Schwindmaß von 0,156 ‰ nach 91 Tagen) neigt, was ihn zu einem optimalen Beton für passgenaue Bauteile, wie zum Beispiel Tübbinge, macht.

4.3.2 Festbetoneigenschaften

Bei den Festbetonprüfungen wurden neben den obligatorischen Druckfestigkeitsprüfungen und der Messung des E-Moduls auch die Spaltzugfestigkeiten geprüft. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Erstprüfung aufgeführt und graphisch dargestellt:

Druckfestigkeit

Alter	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
4 h	8,39 MPa	7,74 MPa	8,07 MPa	8,1 MPa
6 h	9,94 MPa	8,80 MPa	10,14 MPa	9,6 MPa
8 h	18,26 MPa	15,06 MPa	15,66 MPa	16,3 MPa
7 d	39,74 MPa	38,91 MPa	37,96 MPa	38,9 MPa
28 d	51,90 MPa	52,49 MPa	49,49 MPa	51,3 MPa

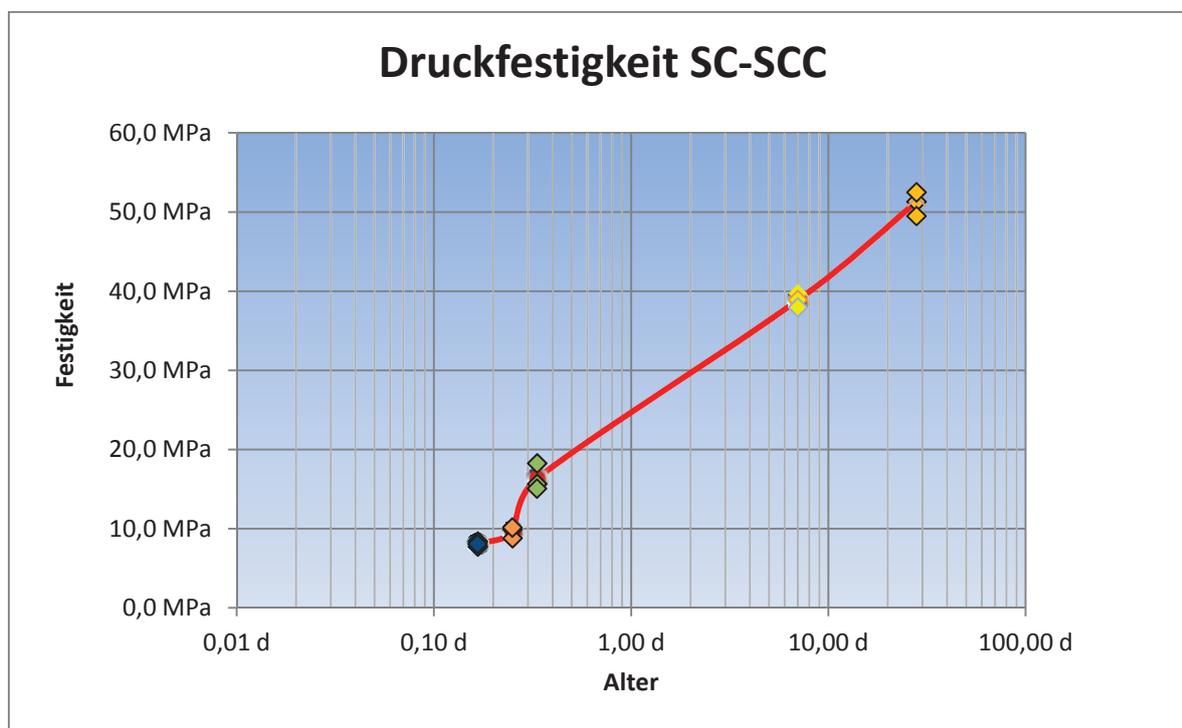


Abbildung 83 Druckfestigkeit SC-SCC

E-Modul nach 28 Tagen: 27,3 GPa



Spaltzugfestigkeit

Alter	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
4 h	0,95 MPa	0,80 MPa	1,10 MPa	1,0 MPa
6 h	1,45 MPa	1,30 MPa	1,60 MPa	1,5 MPa
8 h	1,85 MPa	1,95 MPa	2,15 MPa	2,0 MPa
7 d	3,05 MPa	3,40 MPa	3,20 MPa	3,2 MPa
28 d	5,10 MPa	5,70 MPa	5,85 MPa	5,6 MPa

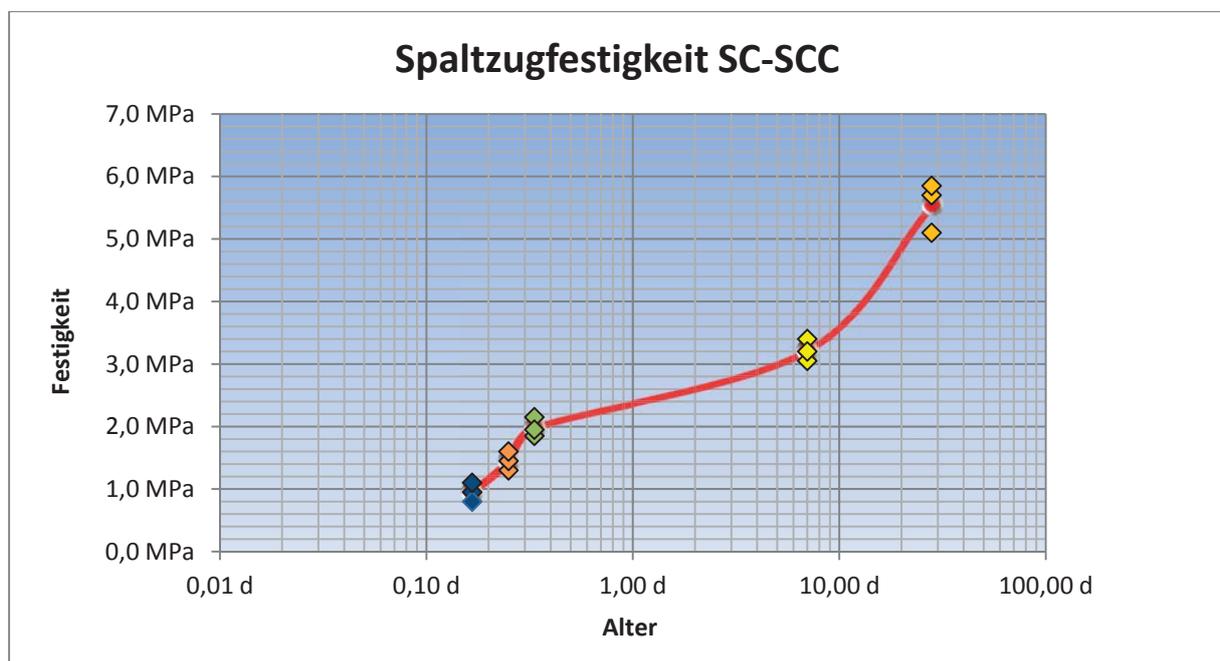


Abbildung 84 Spaltzugfestigkeit SC-SCC

In der ÖVBB-Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ wird darauf verwiesen, dass der Tübbing eine einaxiale Zugfestigkeit von üblicherweise 0,8-1,2 MPa benötigt, um aus der Schalung gehoben zu werden. Da diese Zugfestigkeit jedoch nicht gemessen werden konnte, entschied ich mich stattdessen für die Messung der Spaltzugfestigkeit. In [49] wird für eine grobe Abschätzung das Verhältnis Zugfestigkeit (f_{ct}) zu Spaltzugfestigkeit ($f_{ct(SZ)}$) mit 1:1,2 angegeben. In der DIN 1045-1 wird für die Bemessung folgende Umrechnung zugelassen:

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct(SZ)}$$

Dies bedeutet, für die Erstprüfung, dass der Beton eine Spaltzugfestigkeit von 0,9 bis 1,3 MPa aufweisen müsste, um aus der Schalung gehoben werden zu können. In diesen Fall wäre dies nach fünf Stunden möglich. Wenn man bedenkt, dass die in diesem Beton verwendete Gesteinskörnung eher ungünstig für diese Festigkeitsentwicklung ist,



so ist es durchaus denkbar, dass mit einer kantigeren Kornform noch kürzere Schalzeiten realisierbar wären.

Bemerkenswert ist zudem der niedrige E-Modul bei dieser Betonfestigkeit. Normalerweise würde man eher Werte um 36 GPa erwarten. Dies ist vor allem positiv, wenn man an die Manipulation und Lagerung denkt. Hier ist die Gefahr von abbrechenden Kanten und Ecken durch Sprödbruch stark herabgesetzt.

Da durch die hohe Hydratationswärme ein Beleg der Expositionsklasse XC3 bzw. XC4 nötig war, wurde dieser durch eine WU-Prüfung gemäß EN 12390-8 nachgewiesen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lieferten eine mittlere Eindringtiefe von 16 mm.

Nach ÖNORM B 4710-1 ist somit die Expositionsklasse XC4 nachgewiesen, da die Anforderung kleiner 25 mm somit deutlich erfüllt ist.

Um die Frage zu klären, ob Faserbeton nun bessere oder schlechtere Ergebnisse liefern würde, wurde die Prüfung auch mit 50 kg/m³ DE 60/1,0 N Fasern wiederholt. Fraglich war, ob die Fasern an der Oberfläche das Wasser ins Innere leiten könnten und somit schlechtere Werte bringen würden. Andererseits war es auch möglich, eine Abdichtung zu erreichen, da die Fasern Spannungen durch Schwinden aufnehmen konnten und somit zu einem dichteren Gefüge durch Schwindrissvermeidung führten. In diesem Versuch stellte sich heraus, dass der Wassereindringwiderstand sich sogar noch deutlich steigerte. So lag die Wassereindringung zwischen 5-7 mm, also deutlich niedriger als beim Nullbeton.

4.4 Bewertungsverfahren zur Vergleichbarkeit

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauten wird bei genormten Betonen durch die Einhaltung der Expositionsklassen gewährleistet. Jede Expositionsklasse setzt gewisse Mindestanforderungen an die Zusammensetzung bezüglich Bindemittelgehalt und zulässiger Menge an Zugabewasser voraus. Durch diese Maßnahmen wird eine gewisse Dichtigkeit des aushydratisierten Betons gewährleistet, die einen Schutz vor schädigenden Umwelteinflüssen gewährleistet. Allerdings ist Voraussetzung für diese Norm, dass die Betone mit Zementen nach EN 197-1/-4, DIN 1164-10/-11/-12 oder EN 14216 hergestellt worden sind. Da der hier verwendete Zement zwar eine ETZ besitzt, jedoch in keiner dieser Normen vertreten ist, wird in dieser Arbeit nun mit unterschiedlichen Prüfungen die Dichtheit nachgewiesen. Anschließend werden diese nach dem System von *Baroghel-Bouny* [50] katalogisiert und mit dem Datensatz von geprüften Normzementen verglichen. Die in diesem Falle vorgenommenen Messungen sind zum einen die Luftpermeabilität und zum anderen die Chloridmigration. Hierfür wurden aus zwei Probewürfeln der Erstprüfung mit einer 100 mm Bohrkronenkerne gezogen. Diese wurden, wie in Abbildung 85 gezeigt, zerteilt. Die etwa 50 mm hohen Proben von der Oberfläche wurden zur Bestimmung der Chloridmigrationskoeffizienten im nicht-stationärem Zu-



stand (D_{nssm}) nach dem Nordtest Build 492 [51] verwendet. Das mittlere Segment wurde ebenfalls halbiert, sodass sich zwei Scheiben mit der Höhe von etwa 25 mm ergaben. Diese wurden zur Ermittlung der Gaspermeabilität verwendet. Die verwendete Messapparatur ist in Abbildung 86 zu sehen.

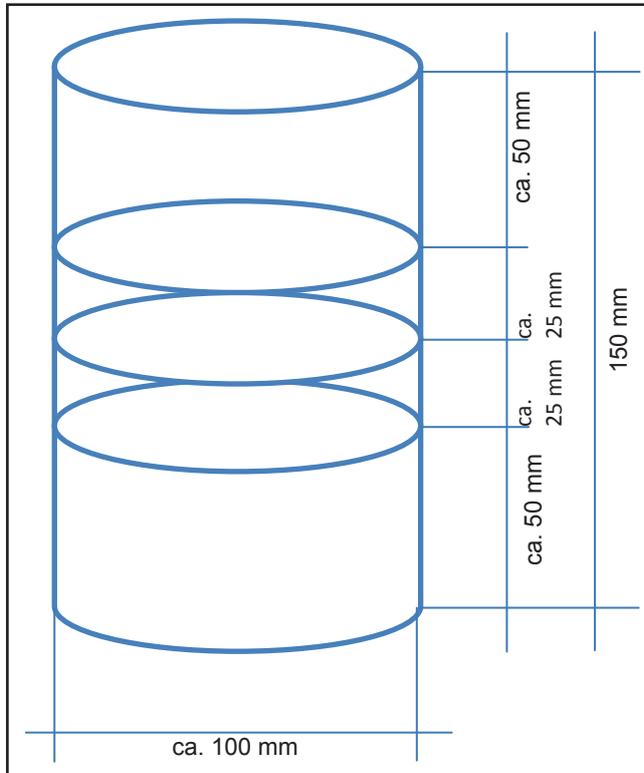


Abbildung 85 Schema zur Probengewinnung



Abbildung 86 Permeabilitätszelle mit Druckkessel und Messwertaufnahme [52]

Beim Nordtest Build 492 [51] wird die Migration der Chloridionen in den Probekörper durch das Anlegen einer elektrischen Spannung erzwungen. Nach einer bestimmten Testdauer wird die Probe axial gespalten und die neu gewonnenen Oberflächen mit Silbernitratlösung besprüht. Der mit Chlorid belastete Probenbereich ist durch helle Verfärbung gut zu erkennen (vgl. Abbildung 87)



Abbildung 87 Chloridmigration Probe 2/1

Über diese nun messbare Eindringtiefe lässt sich der Chloridmigrationskoeffizient nach [51] wie folgt berechnen:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(u - 2) \cdot t} \left(x_d - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \quad (8)$$

wobei folgendes gilt:

D_{nssm} : Nicht-stationärer Migrationskoeffizient, [$\times 10^{-12}$ m²/s];

U: Angelegte Spannung, [V];

T: Mittelwert der Anfangs- und Endtemperaturen in der Anolyt-Lösung, [°C]

L: Dicke des Probekörpers, [mm];

x_d : Mittelwert der Eindringtiefe, [mm];

t: Testdauer, [h].

Die Auswertung der untersuchten Proben sowie der nach Formel (8) berechnete nicht-stationäre Chloridmigrationskoeffizient sind in den Tabelle 7 bis Tabelle 10 zu finden.

Tabelle 7 Chloridmigrationskoeffizientberechnung der Probe 1/1

Bohrkern Nr. 1/1					I(60 V)		
Prüfdatum	Dauer	T _{start}	T _{end}	I(30 V)	start	end	Länge
Start/Stop	[h]	[°C]	[°C]	[mA]	[mA]	[mA]	[mm]
27.05./28.05.13	48	20	21	7,22	14,98	16,79	49
<i>Mittelwert</i>		20,5			15,89		
Eindringung mm	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1.Hälfte	8,4	10,7	13,2	7,7	11,3	11,2	10,2
2.Hälfte	11,3	12,1	10,7	14,3	12,4	11,4	15,0
<i>Mittelwert</i>	11,4						
D_{nssm}	1,9 · 10⁻¹² m²/s						

Tabelle 8 Chloridmigrationskoeffizientberechnung der Probe 1/2

Bohrkern Nr. 1/2					I(60 V)		
Prüfdatum	Dauer	T _{start}	T _{end}	I(30 V)	start	end	Länge
Start/Stop	[h]	[°C]	[°C]	[mA]	[mA]	[mA]	[mm]
27.05./28.05.13	48	20	22	7,97	16,45	17,15	49
<i>Mittelwert</i>		21,0			16,8		
Eindringung mm	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1.Hälfte	12,9	13,0	12,5	11,4	10,8	12,8	13,6
2.Hälfte	14,4	11,8	11,0	19,5	16,2	16,7	15,2
<i>Mittelwert</i>	13,7						
D_{nssm}	2,3 · 10⁻¹² m²/s						



Tabelle 9 Chloridmigrationskoeffizientenberechnung der Probe 2/1

Bohrkern Nr. 2/1					I(40 V)		
Prüfdatum	Dauer	T _{start}	T _{end}	I(30 V)	start	end	Länge
Start/Stop	[h]	[°C]	[°C]	[mA]	[mA]	[mA]	[mm]
05.06./07.06.13	24	20	21	29,5	39,3	49,8	49
<i>Mittelwert</i>		20,5			44,5		
Eindringung mm	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
	9,3	6,2	5,4	6,2	7,8	7,1	9,4
<i>Mittelwert</i>	7,3						
D_{nssm} 2,3 · 10⁻¹² m²/s							

Tabelle 10 Chloridmigrationskoeffizientenberechnung der Probe 2/2

Bohrkern Nr. 2/2					I(35 V)		
Prüfdatum	Dauer	T _{start}	T _{end}	I(30 V)	start	end	Länge
Start/Stop	[h]	[°C]	[°C]	[mA]	[mA]	[mA]	[mm]
05.06./07.06.13	24	20	21	37,2	43	44,4	49
<i>Mittelwert</i>		20,5			43,7		
Eindringung mm	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
	12,7	7,7	7,1	6,3	4,3	7,2	12,1
<i>Mittelwert</i>	8,2						
D_{nssm} 2,6 · 10⁻¹² m²/s							

Als Mittelwert dieser vier Messungen kann ein Chloridmigrationskoeffizient von $2,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ angenommen werden.

Als zweite Messung der Dichtigkeit wurde die Gaspermeabilität mit der in Abbildung 86 gezeigten Messapparatur bestimmt. Dieses am Institut befindliche Prüfgerät ist ein Eigenbau und wurde bereits durch Dissertationen von *Nasution* (2006) und *Lun* (2014) sowie durch wissenschaftliche Veröffentlichungen von *Prof. Paulini* [52] [53] beschrieben und die Ergebnisse validiert. In diesem Prüfgerät, einer Luft-Durchströmungszelle, wird die Probe, welche bis zur Massekonstanz bei 105°C getrocknet wurde, zwischen zwei Rohren mit Klebeband fixiert, eingebaut und durch einen Gummischlauch und seitlich aufgebracht Druck abgedichtet. Das Durchströmungsvolumen der Luft wird durch die Messung des Druckabfalls im Kessel gemessen. Das Steuerventil am Kessel erlaubt es, einen konstanten Druck auf die Probe anzulegen und diesen stufenförmig zu verändern. Die Messung der Permeabilität erfolgt über einen Bereich mit konstanter Strömungsrate. In den hier durchgeführten Messungen wurden die Strömungsraten bei Probedrücken von 9 bar, 7 bar, 5 bar und 3 bar gemessen. Eine solche Messung ist in Abbildung 88 exemplarisch dargestellt.

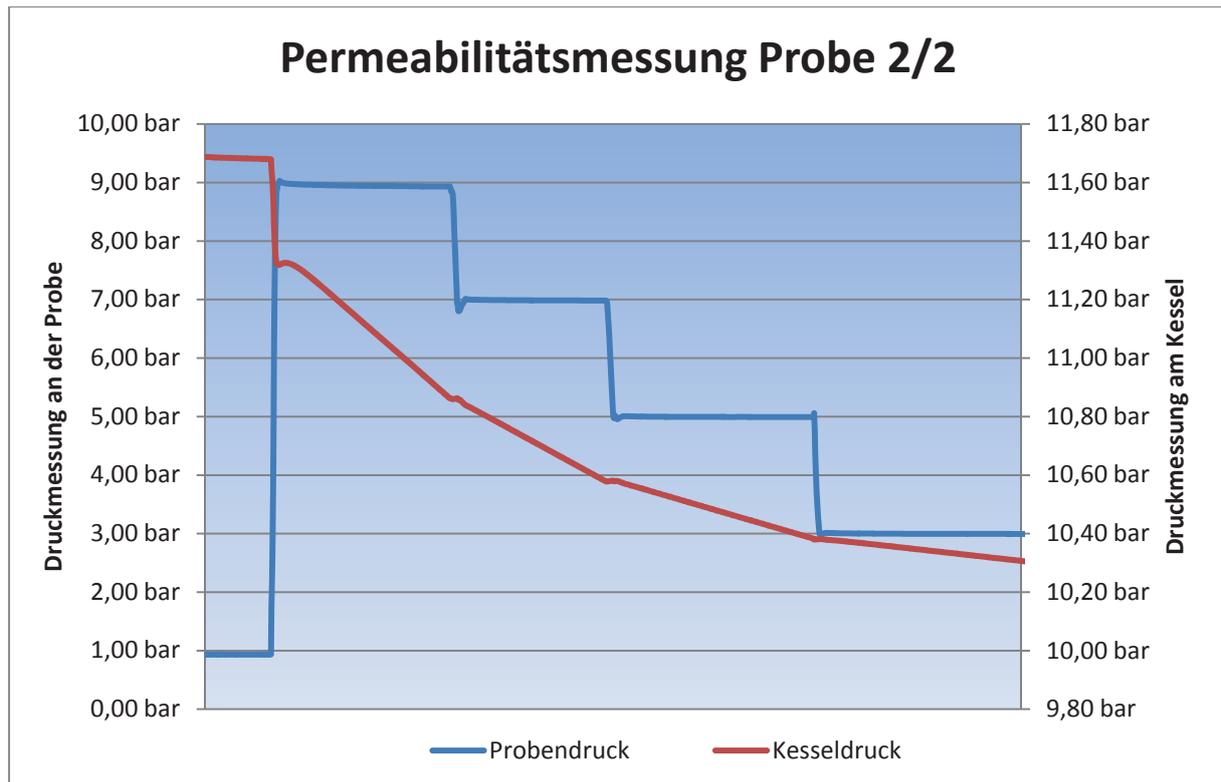


Abbildung 88 Messdiagramm der Permeabilitätsmessung der Probe 2/2

Im Folgenden werden nun die Messungen vorgestellt. Die vorbereiteten Probekörper wurden vor dem Einbau vermessen und deren Dichte berechnet. Aus Tabelle 11 sind die einzelnen Werte ersichtlich.

Tabelle 11 Daten zu den Probekörpern für die Permeabilitätsmessung

Probenummer	Dicke	Dicke mittel	Durchmesser	Gewicht	Dichte
1/1	25,39 mm	25,44 mm	99,95 mm	455,23 g	2,28 kg/dm ³
	25,48 mm				
	25,46 mm				
1/2	25,08 mm	25,17 mm	100,10 mm	460,66 g	2,33 kg/dm ³
	25,25 mm				
	25,19 mm				
2/1	25,11 mm	25,53 mm	99,71 mm	456,63 g	2,29 kg/dm ³
	25,70 mm				
	25,79 mm				
2/2	25,76 mm	25,79 mm	99,99 mm	461,10 g	2,28 kg/dm ³
	25,99 mm				
	25,61 mm				

Im Anschluss wurden die einzelnen Proben dem oben beschriebenen Messregime unterzogen. Die dazugehörigen Messdiagramme sind im Anhang zu finden. Aus den Messdiagrammen wurden zu den einzelnen Druckstufen der mittlere Druck an der Probe ($p_{\text{Probe, abs.}}$), die Messdauer (Δt) und der Druckverlust im Kessel (Δp_{Kessel}) bestimmt.



Mit diesen Werten lassen sich die Permeabilitätskonstante (k_g) nach folgender Gleichung aus [52] berechnen

$$k_g = 2 \cdot \eta_{Luft} \cdot h \cdot \frac{q}{A} \cdot \frac{p_{Luft}}{(p_{Probe,abs}^2 - p_{Luft}^2)} \quad (9)$$

worin η_{Luft} die Viskosität der Luft [Pa·s], h die durchströmte Länge [m], q der Massenstrom [m^3/s], p_{Luft} der Außenluftdruck und A die geprüfte Oberfläche der Probe ist. Der Massestrom q wird hier über folgende Gleichung bestimmt

$$q = \frac{\Delta p_{Kessel} \cdot V_{Kessel}}{\Delta t \cdot p_{Luft}} \quad (10)$$

wobei V_{Kessel} das Volumen des Druckbehälters ist.

Die aus den Diagrammen abzulesenden Werte so wie die Berechnung der Masseströme und der Permeabilitätskonstanten sind für die einzelnen Proben und Druckbereiche in den Tabelle 12 bis Tabelle 15 eingetragen.

Tabelle 12 Berechnung der Permeabilitätskonstante von Probe 1/1

Druckstufe	$P_{Probe,abs}$	Δt	Δp_{Kessel}	q	k_g
9 bar	898459 Pa	314 s	26580 Pa	$1,11 \cdot 10^{-5} m^3/s$	$1,54 \cdot 10^{-16} m^2$
7 bar	697739 Pa	284 s	16260 Pa	$7,53 \cdot 10^{-5} m^3/s$	$1,73 \cdot 10^{-16} m^2$
5 bar	497818 Pa	300 s	8700 Pa	$3,81 \cdot 10^{-5} m^3/s$	$1,76 \cdot 10^{-16} m^2$
3 bar	297471 Pa	1440 s	17760 Pa	$1,62 \cdot 10^{-5} m^3/s$	$1,24 \cdot 10^{-16} m^2$
Mittelwert					$1,82 \cdot 10^{-16} m^2$
Standardabweichung					$2,97 \cdot 10^{-17}$

Tabelle 13 Berechnung der Permeabilitätskonstante von Probe 1/2

Druckstufe	$P_{Probe,abs}$	Δt	Δp_{Kessel}	q	k_g
9 bar	894862 Pa	480 s	37620 Pa	$1,02 \cdot 10^{-5} m^3/s$	$1,41 \cdot 10^{-16} m^2$
7 bar	707777 Pa	458 s	22620 Pa	$6,44 \cdot 10^{-5} m^3/s$	$1,43 \cdot 10^{-16} m^2$
5 bar	499618 Pa	600 s	16380 Pa	$3,56 \cdot 10^{-5} m^3/s$	$1,62 \cdot 10^{-16} m^2$
3 bar	299266 Pa	3300 s	34020 Pa	$1,34 \cdot 10^{-5} m^3/s$	$1,82 \cdot 10^{-16} m^2$
Mittelwert					$1,63 \cdot 10^{-16} m^2$
Standardabweichung					$1,94 \cdot 10^{-17}$

Tabelle 14 Berechnung der Permeabilitätskonstante von Probe 2/1

Druckstufe	$P_{\text{Probe, abs}}$	Δt	Δp_{Kessel}	q	k_g
9 bar	896852 Pa	600 s	46980 Pa	$9,29 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$1,44 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
7 bar	704869 Pa	540 s	26940 Pa	$5,92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$1,50 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
5 bar	499403 Pa	1140 s	32760 Pa	$3,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$1,76 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
3 bar	299876 Pa	2772 s	33180 Pa	$1,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$2,20 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
Mittelwert					$1,72 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
Standardabweichung					$3,47 \cdot 10^{-17}$

Tabelle 15 Berechnung der Permeabilitätskonstante von Probe 2/2

Druckstufe	$P_{\text{Probe, abs}}$	Δt	Δp_{Kessel}	q	k_g
9 bar	896094 Pa	980 s	84600 Pa	$1,12 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	$1,60 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
7 bar	717550 Pa	668 s	36780 Pa	$7,13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$1,60 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
5 bar	499476 Pa	2192 s	63960 Pa	$3,78 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$1,78 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
3 bar	300303 Pa	2000 s	22380 Pa	$1,45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$2,02 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
Mittelwert					$1,75 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$
Standardabweichung					$2,00 \cdot 10^{-17}$

Über alle Proben gemittelt ergibt sich somit eine Permeabilitätskonstante $k_g = 1,73 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ für den SC-SCC.

Mit diesen beiden Mittelwerten aus der Permeabilität und der Chloridmigration ist es nun möglich, eine Einstufung in die Klassen nach *Baroghel-Bouny* [50] vorzunehmen. In der folgenden Tabelle 16 ist ein Auszug der veröffentlichten Klassifizierung, reduziert auf die Einteilung für die beiden durchgeführten Untersuchungen, dargestellt.

Tabelle 16 Klassen bezüglich der potentiellen Dauerhaftigkeit gegen Korrosionsangriff mit den dazugehörigen Messverfahren (Mittelwerte aus mindestens 3 Betonproben die bis zu 90 Tage im Wasserbad optimal nachbehandelt wurden) [50]

„potentielle“ Dauerhaftigkeit →	Klassierung				
	Sehr niedrig (VL)	Niedrig (L)	Mittel (M)	Hoch (H)	Sehr hoch (VH)
Chloriddiffusionskoeffizient (Migrationsprüfung unter einem elektrischen Feld) $D_{\text{app(mig)}} (10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	> 50	10 - 50	5 - 10	1 - 5	< 1
Gaspermeabilität (gemessen an ofengetrockneten Proben; Sättigungsgrad = 0) $K_{\text{app(gas)}} (10^{-18} \text{ m}^2)$	> 1000	300 - 1000	100 - 300	30 - 100	< 30

Des Weiteren wird in der oben genannten Veröffentlichung davon berichtet, dass man unterschiedliche Betone mit diesen Verfahren getestet hat. Hierbei wurden nicht nur Labormischungen sondern auch Proben aus Bauwerken untersucht. Bei diesen Proben



ist auch ein Beton geprüft worden der mit einem w/z –Wert von 0,45 und einer Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen von 49,0 MPa etwa die gleichen Eigenschaften aufweist wie der SC-SCC. Sein Chloriddiffusionskoeffizient wurde ebenfalls mit dem Test nach NT Build 492 gemessen und liegt mit $1,5 \cdot 10^{-12}$ m²/s etwas niedriger aber immer noch in der Klasse H. Seine Gaspermeabilitätskonstante liegt dafür mit $2,71 \cdot 10^{-16}$ m² etwas höher aber ebenfalls in der Klasse M. In beiden Mischungen ist Flugasche enthalten welche sich positiv auf die die Chloridmigration auswirkt. Allerdings ist der Gehalt an Flugasche in der SC-SCC Mischung geringer, was für die leicht höheren Werte spricht. Die niedrigere Gaspermeabilitätskonstante des SC-SCCs lässt sich dadurch begründen, dass ihm kein Luftporenmittel beigemischt wurde. Letztendlich konnte mit diesen Versuchen und mit den Laborversuchen von *Baroghel-Bouny* gezeigt werden, dass der SC-SCC auch wenn er nicht mit Normzement hergestellt wurde doch eine vergleichbare Performance bringt wie ein normativer Beton mit gleichwertiger Druckfestigkeit.

5 Balkenversuche

In dem folgenden Kapitel wird versucht, die Erkenntnisse aus Kapitel 3 mit dem SC-SCC zu validieren. Bei diesen Versuchen wurden Stahldrahtfasern der Firma KrampeHarex verwendet. Alle Fasern sind vom Typ „mit Endverankerung“ aber in unterschiedlichen Dimensionen. Zum Einsatz kamen: DE 60/1,0 N; DE 60/0,8 N; DE 50/0,8 N und DE 35/0,8 N. Zur Nomenklatur ist festzuhalten, dass die ersten beiden Buchstaben für die Faserart und den Fasertyp stehen, die Zahl vor dem Querstrich bezeichnet die Faserlänge und die Zahl dahinter den Drahtdurchmesser in mm. Der Index N (normalfest) gibt Auskunft über die Stahlgüte. Bei allen Versuchen wurden von Anfang an 50 kg/m^3 eingesetzt und der Einfluss auf die Konsistenz und Verarbeitbarkeit untersucht. Zudem wurden die Einflüsse der Einfüllmechanismen auf die Faserorientierung untersucht. Für die Messung der Faserorientierung kam das Messgerät BSM 100 der Firma Hertz (s. Abbildung 89) zum Einsatz.



Abbildung 89 Messgerät BSM 100 der Firma Hertz



Abbildung 90 Hergestellte Fasserketten mit je 20 Fasern zur Kalibrierung

Dieses wurde zuvor vorschriftsmäßig kalibriert. Dabei fiel auf, dass die gemessene Faserorientierung sehr gut reproduzierbar war. Allerdings war die gemessene Fasermenge eher ungenau. Auf Nachfrage beim Hersteller wurde mitgeteilt, dass dies an unterschiedlichen Stahlgüten liegen könnte. Da die verwendeten Fasern allerdings alle aus derselben Charge stammen, konnte dies nicht der Grund sein. Auch nach dem Einsetzen eines Korrekturfaktors, war keine reproduzierbare Messung möglich. Auch Versuche nur mit Fasern, in Form von Ketten (s. Abbildung 90), und Sand brachte keine wiederholbaren Ergebnisse. Aus diesem Grund wurden die gemessenen Fasermengen gemittelt und gleich der rezeptierten Fasermenge gesetzt. Auf Basis dieses Verhältnisses wurden die einzelnen Messergebnisse berechnet.



5.1 Übersicht über die Balkenversuche

Um eine Veränderung der Festigkeit durch die Faserorientierung feststellen zu können, wurden mit dem in Kapitel 4 beschriebenen SCC und Fasern 150 mm x 150 mm x 700 mm große Balken produziert, und nach 7 Tagen die äquivalente Biegezugfestigkeit nach EN 12390-5 im Zwei-Punkt-Verfahren gemessen. Nach der Messung wurden diese Balken in Würfel mit 150 mm Kantenlänge zersägt und die Faserorientierung mit dem BSM 100 gemessen.

Es wurden insgesamt sechs verschiedene Mischungen verwendet, die sich lediglich durch die Fasergrößen und –gehalte unterschieden. In Tabelle 17 sind diese aufgeführt.

Tabelle 17 Übersicht der verwendeten Rezepturen für die Balkenversuche

	Art der Faser	Menge
Rezeptur 1	DE 60/1,0 N	50 kg/m ³
Rezeptur 2	DE 60/0,8 N	50 kg/m ³
Rezeptur 3	DE 50/0,8 N	50 kg/m ³
Rezeptur 4	DE 30/0,8 N	50 kg/m ³
Rezeptur 5	DE 60/0,8 N	65 kg/m ³
Rezeptur 6	DE 60/1,0 N	65 kg/m ³

Auch wurde für die Überprüfung der Effekte, die bei den ersten beiden Untersuchungen festgestellt wurden, eine doppelt so lange Balkenform gebaut, um bestätigen zu können, dass diese Effekte auch auf längeren Distanzen beständig sind.

Für die Versuche, bei denen die Balkenformen über eine Rinne befüllt wurden, kam dieselbe Konstruktion zum Einsatz wie schon bei den Untersuchungen in Kapitel 3 (s. Abbildung 25). Lediglich eine Rinne mit größerem Rohrdurchmesser (20 cm) wurde verwendet.

Für die Einfüllversuche mit dem Trichter wurde dieser so gebaut, dass er an den Stegen der Metallschalung festgeklemmt werden konnte und mit einem Schieber zu öffnen war.

Im Folgenden sind nun die durchgeführten Versuche, über die Produktionsverfahren gegliedert aufgeführt.

Die Einteilung des Koordinatensystems für die Faserorientierung wurde wie folgt festgelegt:

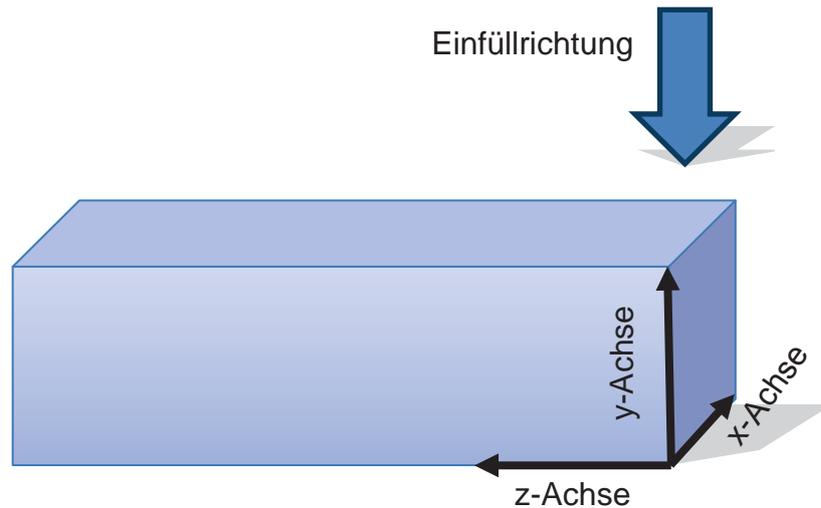


Abbildung 91 Fertlegung des Koordinatensystems

5.2 Befüllen des Balkens über eine Rinne am Ende

Diese Versuche wurden mit allen vier Fasertypen mit einer Dosierung von 50 kg/m^3 durchgeführt. Des Weiteren wurden Versuche mit den am besten zu verarbeitenden Fasern (DE 60/1,0 N und DE 60/0,8 N) mit einer Dosierung von 65 kg/m^3 angeschlossen. Aus einer Mischung wurden immer zwei Balken betoniert. Das verwendete Einfüllverfahren wird in Abbildung 92 gezeigt.



Abbildung 92 Versuchsanordnung zum Einfüllen des Betons über eine Rinne am Ende der Balkenform



5.2.1 Faserorientierung

In folgender Tabelle 18 ist aus den einzelnen Messprotokollen, die im Anhang zu finden sind, lediglich die Orientierung in Fließrichtung (z-Achse) aufgenommen worden. Der Farbverlauf von rot (Minimum 33 %) über gelb (Mittelwert 50 %) nach grün (Maximum 66 %) soll zur besseren Beurteilung dienen.

Die Vergrößerung des Fließmaßes bei Rezeptur 3 und Rezeptur 4 ist zum Einen durch eine längere Mischzeit zum Einbringen der Fasern, zum Andern aber auch durch ein, vor allem bei Rezeptur 4 auftretendes, Separieren von Leim und Gesteinskörnung – bedingt durch das Sperren der Fasern, hervorgerufen worden. Des Weiteren ist bei diesen Untersuchungen auffällig, dass am Ende der Schalung die Fasern wieder stärker von der x-z- Ebene in die y- Richtung „aufgestellt“ werden. Dieser Effekt ist mit zunehmendem Fließmaß schwächer ausgeprägt. Bei allen Versuchen ist jedoch festzustellen, dass die Fasern doch eine Vorzugsrichtung in Fließrichtung aufweisen und sich die Fasern über den gesamten Probekörper homogen verteilen. Lediglich bei der Rezeptur 4-2 ist eine deutliche Abnahme der Fasergehalte mit fortschreitender Fließstrecke zu beobachten. Dieser Effekt liegt am Sperren der Fasern, was schon zuvor beim Messen des Fließmaßes bemerkt worden war. Durch die hohe Anzahl von Fasern bilden sich leicht Agglomerate, die einen Materialtransport behindern und somit zu einem Anhäufen von Fasern und Grobkorn führen. Ein weiterer Effekt dieses Verhaltens zeigt sich, wenn man die Verteilung der Fasermenge über die beiden Balken betrachtet. Während bei den anderen Rezepturen die Fasermenge der beiden korrespondierenden Balken annähernd gleich ist, zeigt sich bei Rezeptur 4 ein starker Unterschied zwischen Balken 1 (37 kg/m^3) und Balken 2 (63 kg/m^3).

In Tabelle 19 sind analog zu Tabelle 18 die Messergebnisse der Versuche mit dem erhöhten Fasergehalt (65 kg/m^3) dargestellt. Bei diesen beiden Mischungen war auffällig, dass sich die Rezeptur 6 besser verarbeiten ließ als Rezeptur 5, die beim Setzfließmaß einen leichten Hügel bildete. Beide Mischungen wurden länger gemischt als die Rezepturen 1 bis 4. Die Mischdauer dieser beiden Rezepturen war jedoch gleich lang. Auffällig ist hier der Rückgang des Fließmaßes durch die dünneren Fasern. Es ist anzunehmen, dass hier eine kritische Anzahl von Fasern, wie auch in Rezeptur 4, erreicht wurde und somit die Konsistenz stark beeinflusst wird.

Tabelle 18 Messwerte der Faserorientierung in Fließrichtung und kumulierte Fasergehalte mit Faserdosierung von 50 kg/m³(am Rand befüllte Balkenform)

Proben	Fließmaß	Mittlerer Fasergehalt im Bauteil	Faserorientierung in Fließrichtung			
			Fasergehalt			
			Würfel 1	Würfel 2	Würfel 3	Würfel 4
Rezeptur 1-1	64 cm	51 kg/m ³	61%	62%	53%	52%
			57 kg/m ³	51 kg/m ³	55 kg/m ³	41 kg/m ³
Rezeptur 1-2	64 cm	49 kg/m ³	64%	57%	54%	42%
			59 kg/m ³	49 kg/m ³	40 kg/m ³	48 kg/m ³
Rezeptur 1-3	66 cm	50 kg/m ³	58%	62%	56%	43%
			48 kg/m ³	50 kg/m ³	56 kg/m ³	46 kg/m ³
Rezeptur 1-4	66 cm	50 kg/m ³	58%	55%	53%	42%
			57 kg/m ³	60 kg/m ³	43 kg/m ³	41 kg/m ³
Rezeptur 2-1	63 cm	57 kg/m ³	51%	49%	48%	40%
			54 kg/m ³	58 kg/m ³	64 kg/m ³	51 kg/m ³
Rezeptur 2-2	63 cm	43 kg/m ³	61%	50%	45%	43%
			35 kg/m ³	36 kg/m ³	47 kg/m ³	56 kg/m ³
Rezeptur 3-1	68 cm	47 kg/m ³	57%	45%	50%	50%
			46 kg/m ³	50 kg/m ³	42 kg/m ³	49 kg/m ³
Rezeptur 3-2	68 cm	53 kg/m ³	47%	43%	45%	47%
			53 kg/m ³	61 kg/m ³	50 kg/m ³	49 kg/m ³
Rezeptur 4-1	69 cm	37 kg/m ³	54%	52%	57%	51%
			42 kg/m ³	39 kg/m ³	34 kg/m ³	35 kg/m ³
Rezeptur 4-2	69 cm	63 kg/m ³	56%	53%	55%	50%
			79 kg/m ³	84 kg/m ³	52 kg/m ³	35 kg/m ³

Tabelle 19 Messwerte der Faserorientierung in Fließrichtung und kummulierte Fasergehalte mit Faserdosierung von 65 kg/m³(am Rand befüllte Balkenform)

Proben	Fließmaß	Mittlerer Fasergehalt im Bauteil	Faserorientierung in Fließrichtung			
			Fasergehalt			
			Würfel 1	Würfel 2	Würfel 3	Würfel 4
Rezeptur 5-1	64 cm	60 kg/m ³	49%	46%	43%	46%
			54 kg/m ³	64 kg/m ³	61 kg/m ³	62 kg/m ³
Rezeptur 5-2	64 cm	70 kg/m ³	53%	56%	51%	46%
			50 kg/m ³	76 kg/m ³	68 kg/m ³	84 kg/m ³
Rezeptur 6-1	70 cm	70 kg/m ³	59%	48%	40%	44%
			62 kg/m ³	88 kg/m ³	71 kg/m ³	60 kg/m ³
Rezeptur 6-2	70 cm	60 kg/m ³	45%	41%	39%	42%
			54 kg/m ³	65 kg/m ³	63 kg/m ³	57 kg/m ³

5.2.2 Äquivalente Biegezugfestigkeit

Exemplarisch für die hier durchgeführten Messungen der äquivalenten Biegezugfestigkeiten für die Rezeptur 1 ist das Kraft-Durchbiegung-Diagramm der 2. Betonage in Abbildung 93 zu sehen. Die dazugehörige Auswertung nach ÖVBB Richtlinie „Faserbeton“ Stand 2009 zeigt Tabelle 20.

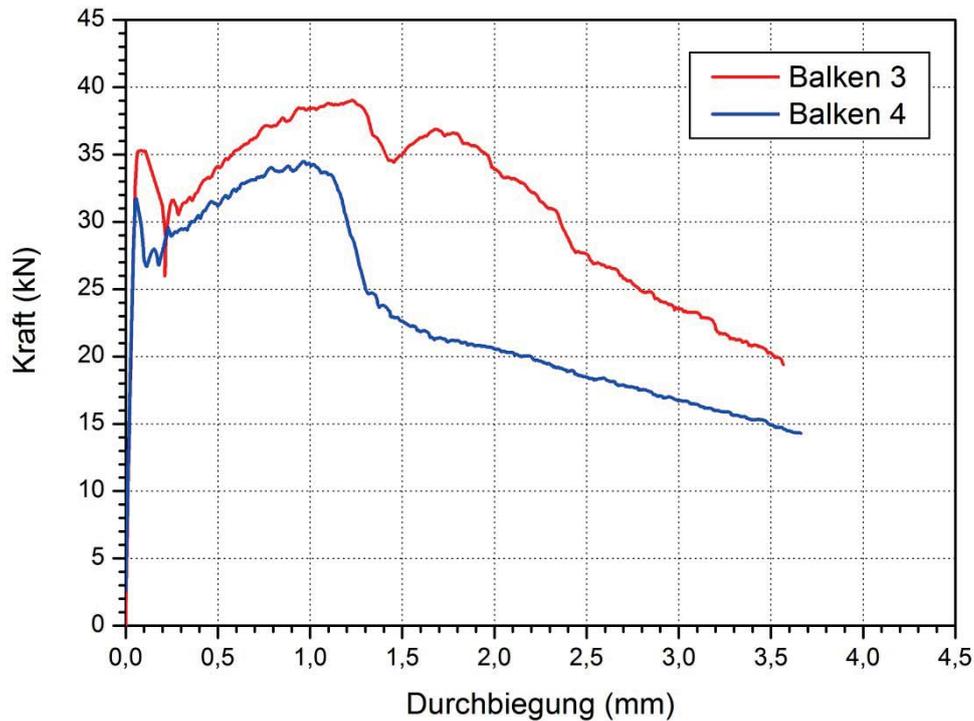


Abbildung 93 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 1-3 und Rezeptur 1-4

Tabelle 20 Auswertung des Versuchs mit Rezeptur 1-3 und Rezeptur 1-4 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken 3	35,3	4,71 BZ 6,0	34,1	4,55 G Sonderklasse	83,3	33,30	4,44 T Sonderklasse
Balken 4	31,7	4,23 BZ 6,0	31,2	4,16 G Sonderklasse	60,2	24,07	3,21 T Sonderklasse

Trotz identischer Mischung sind die Unterschiede im Nachbruchverhalten deutlich zu sehen und wirken sich dann auch in der Tragsicherheit aus. Dennoch liegt die maximal aufnehmbare Last in beiden Fällen über der Kraft des Erstrisses. Deutlicher ist dagegen der Unterschied zwischen den beiden Kurven bei der Rezeptur 2 in Abbildung 94 mit der dazugehörigen Auswertung in Tabelle 21.

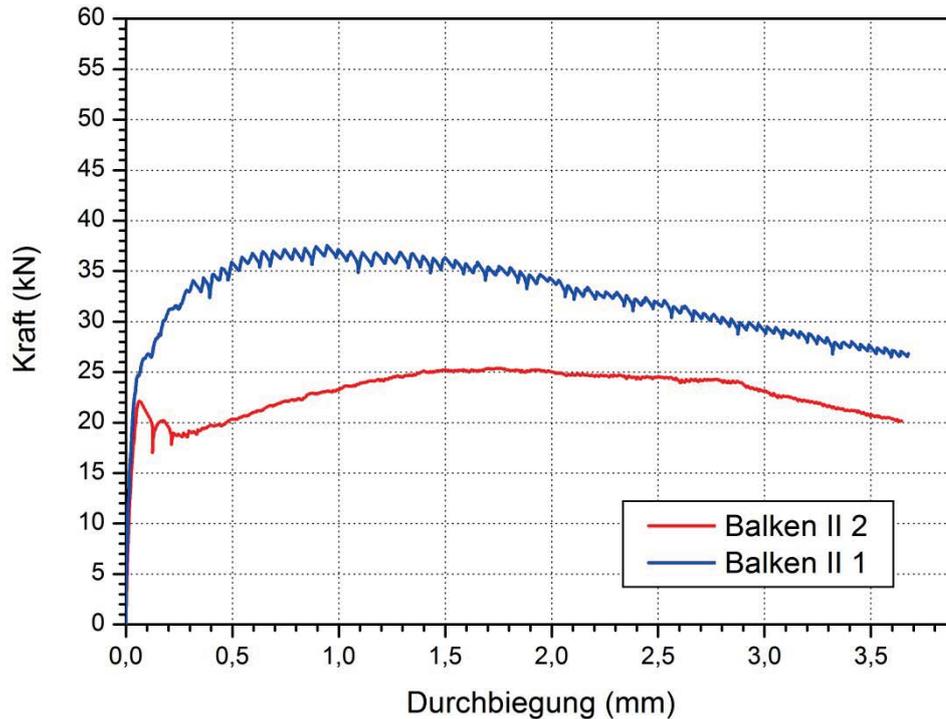


Abbildung 94 Kraft – Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 2-1 und Rezeptur 2-2

Tabelle 21 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 2-1 und Rezeptur 2-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken II-1	24,7	3,29 BZ 4,5	35,9	4,79 G Sonderklasse	85,7	34,26	4,57 T Sonderklasse
Balken II-2	22,1	2,95 BZ 3,0	20,3	2,71 G Sonderklasse	59,9	23,96	3,20 T Sonderklasse

Hier ist sowohl die Gebrauchstauglichkeit als auch die Tragsicherheit, die durch das Nachrissverhalten des Faserbetons bestimmt wird, im Vergleich zur Rezeptur 1 zurückgegangen. Dieser Trend setzt sich bei den Messungen an den Balken mit der Rezeptur 3 fort und wird in Abbildung 95 und Tabelle 22 gezeigt.

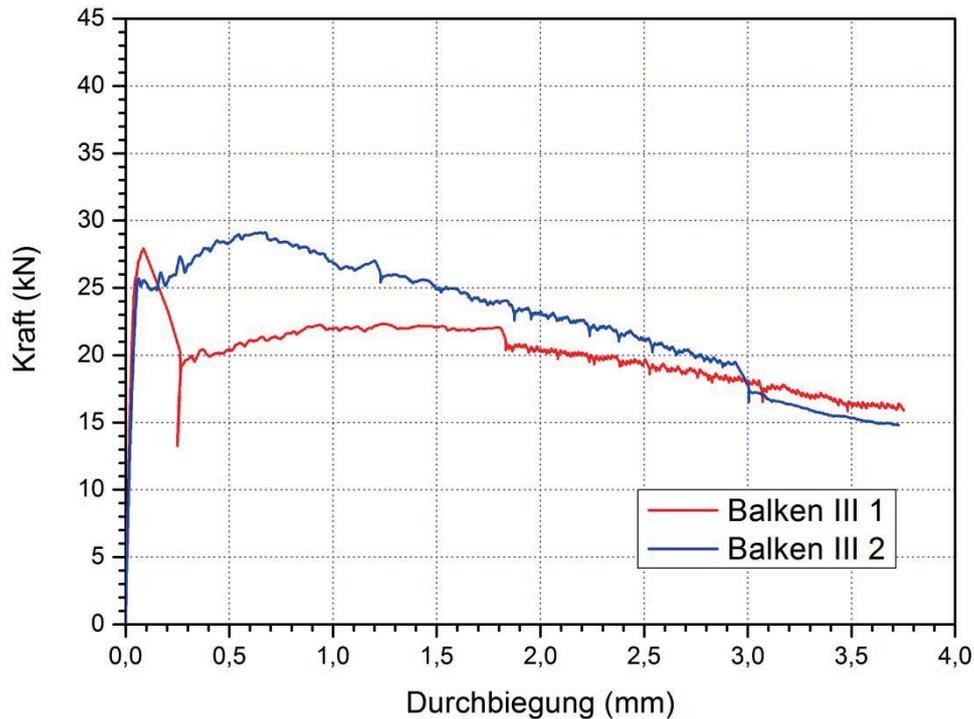


Abbildung 95 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 3-1 und Rezeptur 3-2

Tabelle 22 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 3-1 und Rezeptur 3-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken III-1	27,9	3,73 BZ 4,5	20,4	2,73 G Sonderklasse	51,8	20,73	2,76 T Sonderklasse
Balken III-2	25,7	3,42 BZ 4,5	28,4	3,78 G Sonderklasse	60,3	24,10	3,21 T Sonderklasse

Es ist besonders auffällig, dass die Arbeitslinie des Balken III-1 ihre maximal aufnehmbare Last bereits beim Erstriss erreicht hat. Obwohl alle Rezepturen die gleiche Dosis mit 50 kg/m³ besitzen, tritt hier erstmals ein Verhalten ein, wie es von einem Beton mit unterkritischem Volumen zu erwarten wäre. Gleichzeitig ist festzuhalten, dass der Balken II-2, obwohl er sowohl einen niedrigeren mittleren Fasergehalt als auch im Bruchbereich befindlichen geringeren Fasergehalt aufweist, dieses Nachbruchverhalten nicht zeigt.

Die Steigerung dieses Phänomens wird nur noch durch das Nachrissverhalten von Balken IV-2 unterboten. Allerdings konnte durch einen Rechnerabsturz während der Messung nicht die komplette Arbeitslinie von Balken IV-2 aufgenommen werden. Somit ist eine Betrachtung von gemittelten Werten über eine Mischung nicht möglich. Die gra-

fische und numerische Auswertung ist der folgenden Abbildung 96 und Tabelle 23 zu entnehmen.

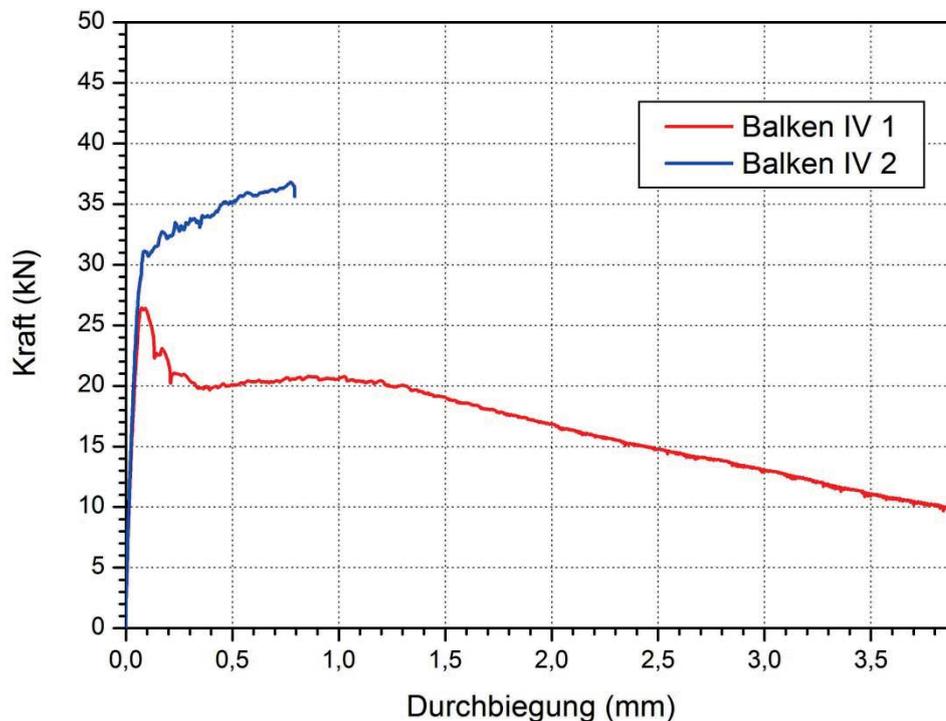


Abbildung 96 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 4-1 und Rezeptur 4-2

Tabelle 23 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 4-1 und Rezeptur 4-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken IV-1	26,4	3,52 BZ 4,5	20,1	2,68 G Sonderklasse	42,9	17,17	2,29 T Sonderklasse
Balken IV-2	31,1	4,15 BZ 4,5	35,1	4,68 G Sonderklasse			

Allerdings passt die vorhandene Arbeitslinie des Balken IV-1 zum sich in den vorangegangenen Versuchen abzeichnenden Trend. Es lässt sich aus dieser Versuchsreihe feststellen, dass mit Reduzierung der Faserlänge eine eindeutige Verschlechterung des Nachrissverhaltens bewirkt wird. Obwohl die eingebrachte Menge bei allen Mischungen gleich war, konnte dennoch unterschiedliches Verhalten festgestellt werden. Die Unterschiede im Riss- und Nachrissverhalten der Balken aus ein und derselben Mischung ist teilweise so deutlich, dass es schwierig scheint, eine Beurteilung über dieses Prüfverfahren in Klassen ohne ausreichende Statistik durchzuführen.

Auch sollte der Begriff vom kritischen Volumen an den Spezifikationen der Faser festgemacht werden. Eine alleinige Angabe einer Menge ist nach diesen Ergebnissen als unseriös anzusehen.

Balken mit erhöhtem Fasergehalt:

In den nun folgenden Versuchen wurden die Balken mit erhöhtem Fasergehalt getestet. Neben der Verarbeitbarkeit von SCC mit Fasergehalten von 65 kg/m^3 sollte ebenfalls gezeigt werden, dass durch die Steigerung des Fasergehaltes um 30 % eine deutliche Verbesserung im Nachrissverhalten zu erzielen ist.

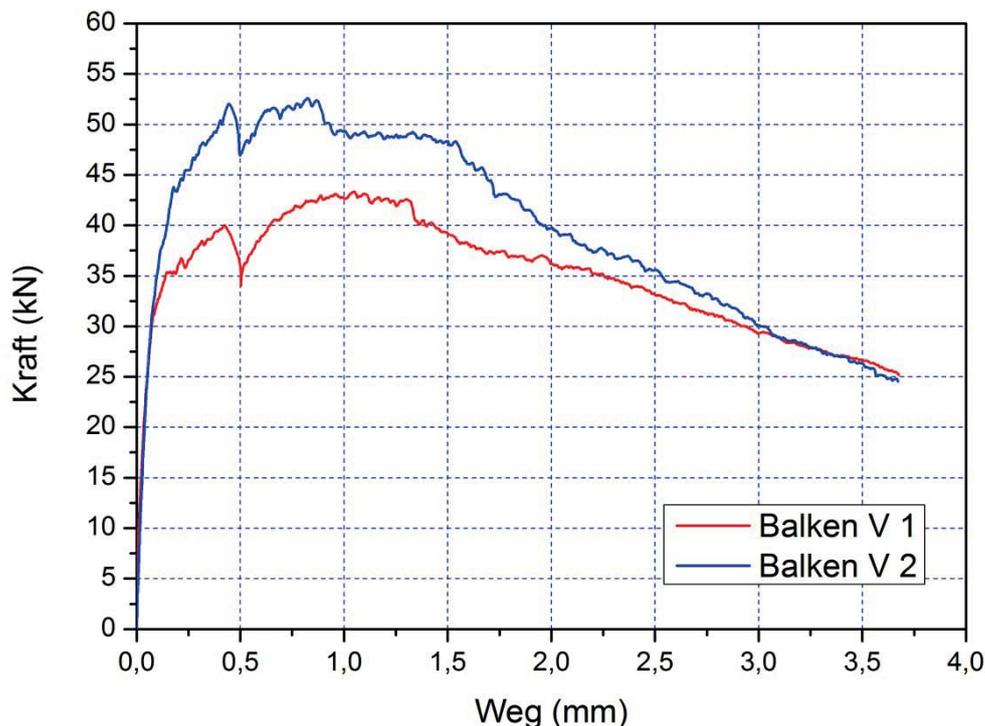


Abbildung 97 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 5-1 und Rezeptur 5-2

Tabelle 24 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 5-1 und Rezeptur 5-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken V-1	35,3	4,71 BZ 6,0	35,7	4,76 G Sonderklasse	93,0	37,22	4,96 T Sonderklasse
Balken V-2	43,8	5,84 BZ 6,0	47,0	6,26 G Sonderklasse	106,8	42,74	5,70 T Sonderklasse

Wie in Tabelle 24 und Abbildung 97 ersichtlich ist, konnte dies mit der Mischung 5 gezeigt werden. Sowohl in der Gebrauchstauglichkeit als auch in der Tragsicherheit ist

eine eindeutige Verbesserung zu erkennen. Obwohl diese Mischung eine schlechtere Verarbeitbarkeit besaß als die Mischung mit den DE 60/1,0 N Fasern, war die Performance besser.

Überraschenderweise war mit Mischung 6 keine Steigerung, sondern sogar eine Verschlechterung festzustellen. Dies wird durch die Messergebnisse in Abbildung 98 und Tabelle 25 belegt.

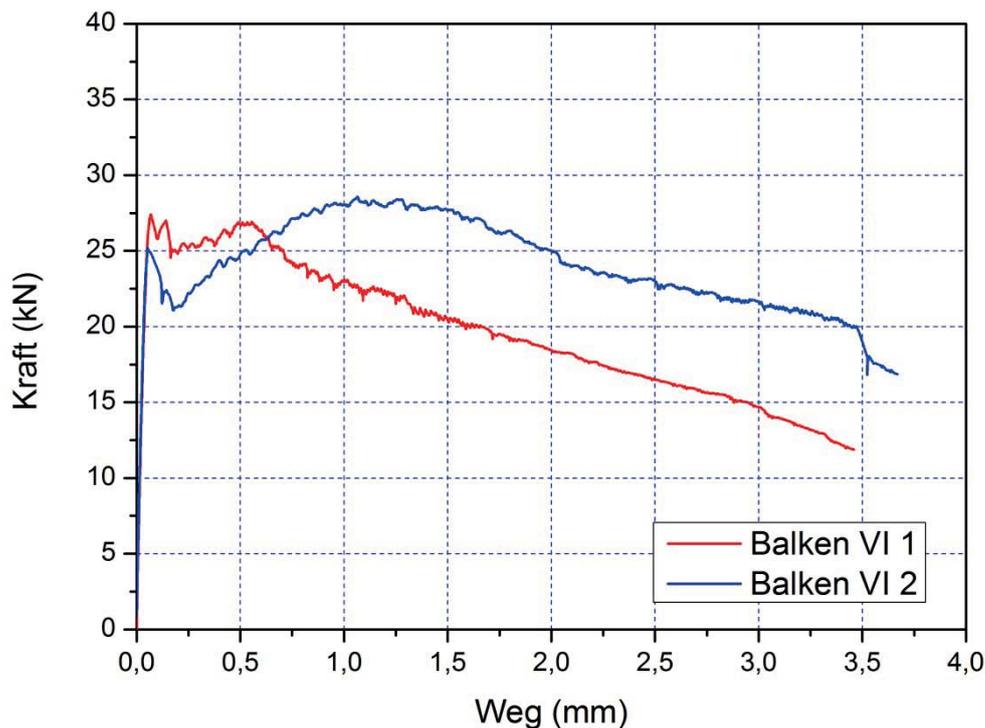


Abbildung 98 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 6-1 und Rezeptur 6-2

Tabelle 25 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 6-1 und Rezeptur 6-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken VI-1	27,4	3,65 BZ 4,5	26,7	3,56 G Sonderklasse	68,0	27,19	3,63 T Sonderklasse
Balken VI-2	25,2	3,36 BZ 4,5	24,8	3,31 G Sonderklasse	63,6	25,42	3,39 T Sonderklasse



Zum Abschluss dieser Serie bleibt festzuhalten, dass bei den Faserdosierungen von 50 kg/m³ mit steigender Faseranzahl ein Untermischen in den SCC schwieriger wurde. Auch sanken mit abnehmender Faserlänge die Nachrissfestigkeit und damit die Tragsicherheit. Durch die Steigerung der Faserzugabemenge verlängerte sich die Einmischdauer und damit vergrößerte sich auch das Setzfließmaß. Allerdings war der erwartete Festigkeitszuwachs nicht immer sicher zu erreichen. Trotz guter Verarbeitbarkeit trat unerwarteter Weise auch eine Verschlechterung auf.

5.3 Befüllen des Balkens über eine Rinne in der Mitte

Dieser Versuch wurde ebenfalls mit allen vier Fasergrößen durchgeführt. Diese Art der Betonage wurde gewählt, weil dies zum einen die übliche Produktionsweise von Tübbing darstellt und zum anderen hiermit untersucht werden kann, ob das Aufstellen der Fasern durch das Anstoßen an der Endplatte oder durch eine anfängliche Störung beim Eingießen hervorgerufen worden ist. Abbildung 99 zeigt exemplarisch den Produktionsvorgang eines Prüfbalkens.



Abbildung 99 Betonage der Balkenform über die Rinne in die Mitte der Form

5.3.1 Faserorientierung

In Tabelle 26 ist wieder lediglich die Orientierung in Fließrichtung (z-Achse) aufgenommen worden.

Die Rezeptur 1-1 und 1-2 wurde wegen zu geringen Fließmaßes wiederholt. Dennoch konnte an dieser Mischung gut festgestellt werden, dass bei steiferen Mischungen eine bessere Homogenisierung der Fasern stattfindet. Allerdings ist auch zu sehen, dass mit einem niedrigen Fließmaß im Randwürfel eine fast vollständige Isotropie erzeugt wird. Dies bedeutet, dass ein steiferer Beton den Einfluss der Wand weiter in das Bauteil einträgt und dieser Effekt der „aufgestellten“ Fasern zunimmt. Zudem ist auffällig, dass

der Eingussbereich mit einer erhöhten Fasermenge ausgestattet ist, und man fast von Inhomogenitäten reden kann. Allerdings ist dies sicherlich der kleinen Dimension der Balkenform geschuldet. Wie in Abbildung 99 ebenfalls gut zu sehen ist, bildet sich ein Schüttberg, von dem der Beton sich durch das Gefälle zu seiner Umgebung ausbreitet. Da das Gefälle bei sehr fließfähigen Betonen eine gewisse Ausbreitung benötigt, um mit ausreichender Kraft auf den Beton einwirken zu können und ihn somit zum Fließen zu bringen, war dieser Effekt bei allen Rezepturen außer bei 1-1 & 1-2 auch so zu erwarten. Die schlechte Verarbeitbarkeit der Rezeptur 4 zeigte sich auch in diesem Versuch. Allerdings waren bei dieser Produktionsweise die negativen Effekte durch die Halbierung der Fließstrecke nicht so stark festzustellen wie beim vorangegangenen Versuch mit dem Eingießen am Ende der Form.

Tabelle 26 Messwerte der Faserorientierung in Fließrichtung und kumulierte Fasergehalte mit Faserdosierung von 50 kg/m³ (mittig gefüllte Balkenform)

Proben	Fließmaß	Mittlerer Fasergehalt im Bauteil	Faserorientierung in Fließrichtung			
			Fasergehalt			
			Würfel 1	Würfel 2	Würfel 3	Würfel 4
Rezeptur 1-1	58 cm	50 kg/m ³	42%	56%	53%	39%
			41 kg/m ³	52 kg/m ³	55 kg/m ³	52 kg/m ³
Rezeptur 1-2	58 cm	50 kg/m ³	42%	54%	59%	42%
			40 kg/m ³	59 kg/m ³	56 kg/m ³	44 kg/m ³
Rezeptur 1-3	67 cm	40 kg/m ³	44%	54%	53%	47%
			26 kg/m ³	55 kg/m ³	54 kg/m ³	25 kg/m ³
Rezeptur 1-4	67 cm	60 kg/m ³	42%	55%	51%	46%
			49 kg/m ³	84 kg/m ³	71 kg/m ³	36 kg/m ³
Rezeptur 1-5	64 cm	53 kg/m ³	44%	55%	51%	36%
			42 kg/m ³	55 kg/m ³	63 kg/m ³	54 kg/m ³
Rezeptur 1-6	64 cm	47 kg/m ³	46%	56%	53%	37%
			34 kg/m ³	51 kg/m ³	59 kg/m ³	42 kg/m ³
Rezeptur 2-1	68 cm	46 kg/m ³	49%	54%	58%	50%
			42 kg/m ³	55 kg/m ³	52 kg/m ³	34 kg/m ³
Rezeptur 2-2	68 cm	54 kg/m ³	44%	54%	57%	45%
			55 kg/m ³	68 kg/m ³	51 kg/m ³	44 kg/m ³
Rezeptur 3-1	68 cm	54 kg/m ³	49%	60%	60%	44%
			51 kg/m ³	67 kg/m ³	60 kg/m ³	37 kg/m ³
Rezeptur 3-2	68 cm	46 kg/m ³	41%	50%	56%	47%
			48 kg/m ³	50 kg/m ³	55 kg/m ³	32 kg/m ³
Rezeptur 4-1	70 cm	59 kg/m ³	39%	54%	54%	44%
			49 kg/m ³	70 kg/m ³	73 kg/m ³	46 kg/m ³
Rezeptur 4-2	70 cm	41 kg/m ³	39%	48%	53%	47%
			32 kg/m ³	44 kg/m ³	48 kg/m ³	38 kg/m ³

5.3.2 Äquivalente Biegezugfestigkeit

Nachfolgend sind die durchgeführten Messungen der äquivalenten Biegezugfestigkeiten für die Rezeptur 1 in Form des Kraft-Durchbiegung-Diagramms in Abbildung 100 bis Abbildung 102 dargestellt. Die dazugehörige Auswertung nach ÖVBB Richtlinie „Faserbeton“ Stand 2009 sind jeweils unterhalb des dazugehörigen Diagramms in Tabelle 27 bis Tabelle 29.

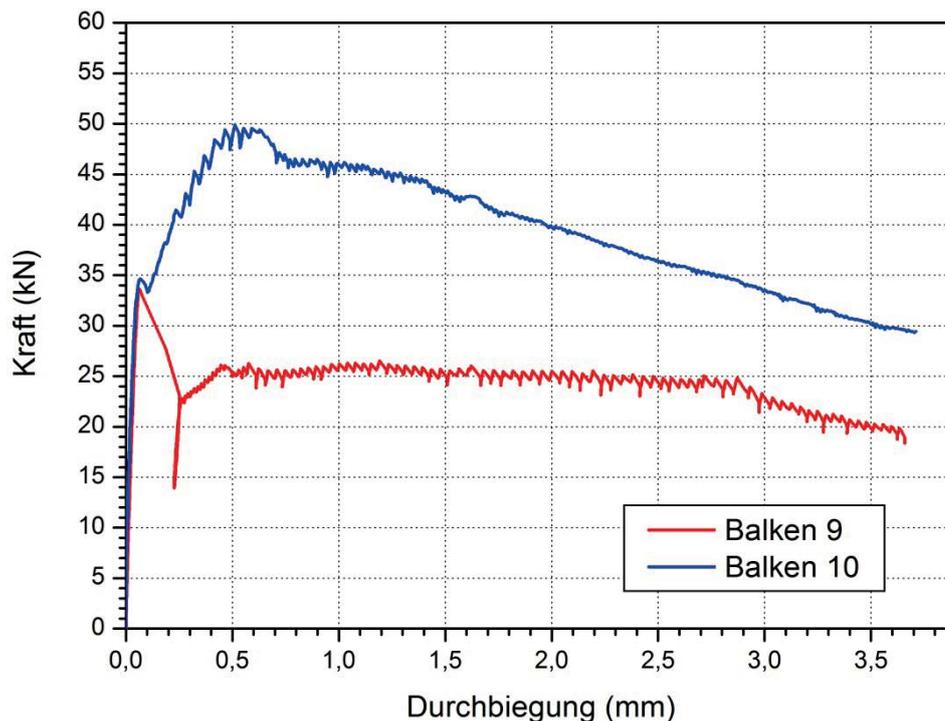


Abbildung 100 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 1-1 und Rezeptur 1-2

Tabelle 27 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 1-1 und Rezeptur 1-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken 9	33,7	4,49 BZ 6,0	25,0	3,34 G Sonderklasse	62,8	25,14	3,35 T Sonderklasse
Balken 10	34,6	4,61 BZ 6,0	48,7	6,49 G Sonderklasse	103,5	41,38	5,52 T Sonderklasse

Auffällig bei dieser Messung ist, dass bei relativ gleichen Proben so unterschiedliches Nachrissverhalten festzustellen ist. Die aufgenommene Last beim Erstriss ist bei beiden Balken gleich hoch, allerdings bildet sich bei Balken 9 lediglich ein Riss aus, der plötz-

lich stark aufgeht, während sich bei Balken 10 von Anfang an zwei Risse bilden, von denen sich einer zum Hauptriss ausbildet. Es ist davon auszugehen, dass das schlagartige Brechen des Balkens 9 eine so starke Belastung darstellt, dass dies im Nachrissverhalten nicht mehr zu korrigieren ist. Ein Grund für dieses Verhalten ist aus den Untersuchungen nicht zu erkennen.

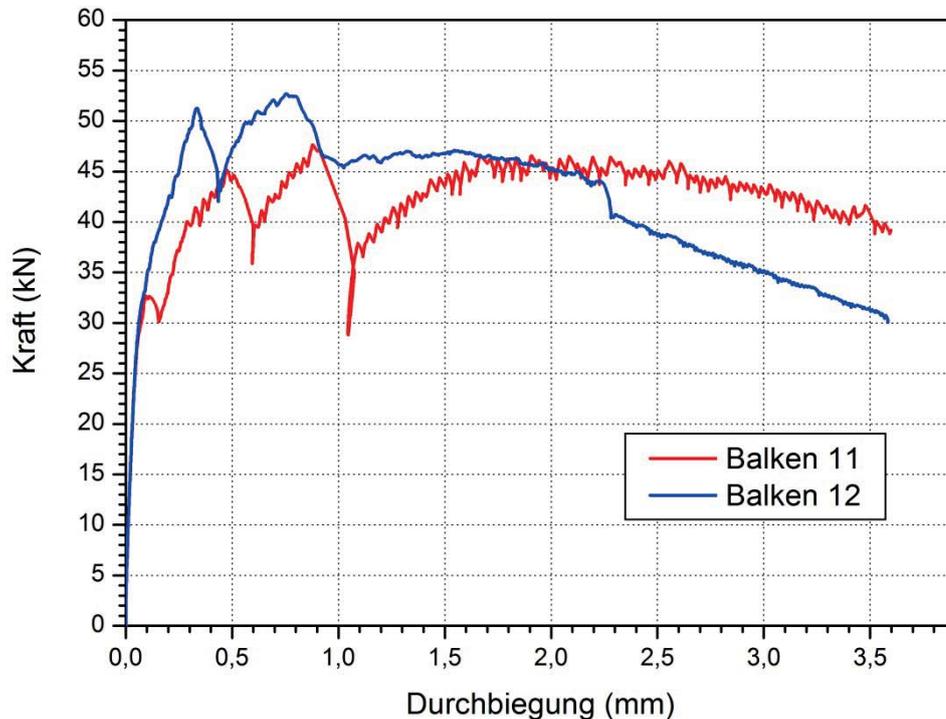


Abbildung 101 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 1-3 und Rezeptur 1-4

Tabelle 28 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 1-3 und Rezeptur 1-4 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken 11	32,7	4,36 BZ 6,0	44,3	5,90 G Sonderklasse	109,9	43,96	5,86 T Sonderklasse
Balken 12	31,2	4,16 BZ 4,5	47,3	6,31 G Sonderklasse	110,8	44,31	5,91 T Sonderklasse

Aus den Auswertungen von Balken 11 und Balken 12 ist eine deutlichere Steigerung der Gebrauchstauglichkeit gegenüber den Versuchen mit dem Einfüllverfahren am Ende festzustellen. In den Graphen aus Abbildung 101 ist deutlich zu erkennen, wenn sich im Biegezugbereich ein neuer Riss bildet. Beide Balken bilden wie gewünscht mehrere

Risse und erreichen damit eine gewünschte Steigerung von Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit.

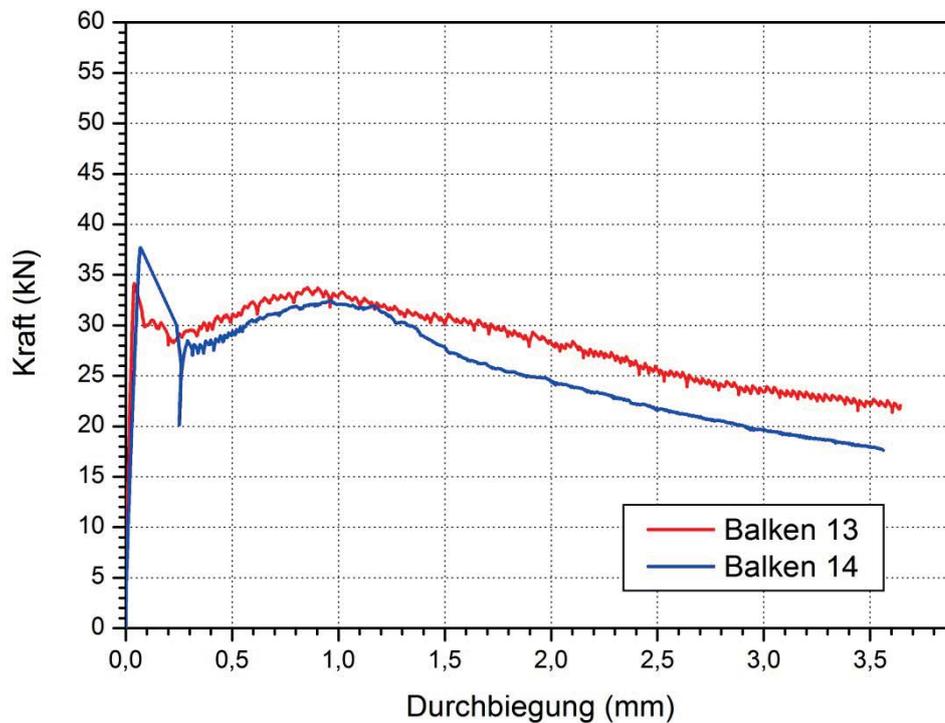


Abbildung 102 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 1-5 und Rezeptur 1-6

Tabelle 29 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 1-5 und Rezeptur 1-6 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken 13	34,1	4,55 BZ 6,0	30,9	4,12 G Sonderklasse	72,8	29,11	3,88 T Sonderklasse
Balken 14	37,7	5,03 BZ 6,0	29,2	3,89 G Sonderklasse	65,8	26,30	3,51 T Sonderklasse

Die Messung der Balken 13 und 14 zeigt ein Bruchverhalten, das im starken Gegensatz zu den vorangegangenen Messungen (Balken 11 und 12) steht. Obwohl alle vier Ausgangskörper annähernd gleich sind, weisen sie stark unterschiedliche Arbeitslinien auf. Hier liegt wieder das Bruchverhalten eines Balkens mit unterkritischem Faservolumen vor. Auch wenn am Balken 14 ein plötzliches Versagen festzustellen ist, weist dies Balken 13 nicht auf und zeichnet dennoch den vergleichbaren Verlauf im Nachrissverhalten.

Ein deutlich einheitlicheres Bild zeigt dagegen die Messung der Rezeptur 2-1 und 2-2, die in Abbildung 103 dargestellt und in Tabelle 30 ausgewertet ist.

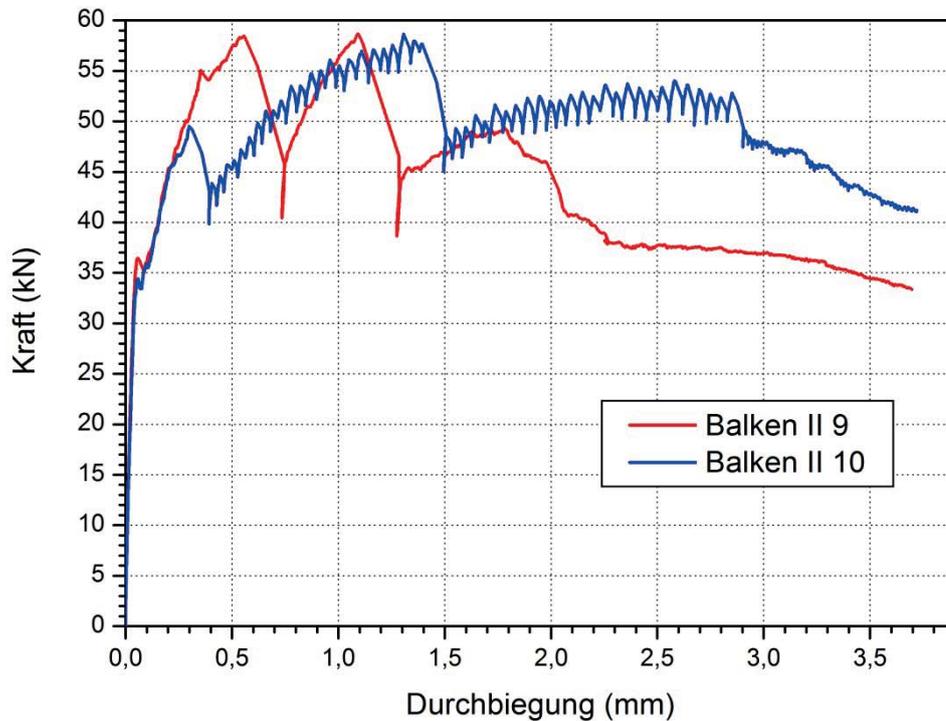


Abbildung 103 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 2-1 und Rezeptur 2-2

Tabelle 30 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 2-1 und Rezeptur 2-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken II-9	36,5	4,86 BZ 6,0	57,4	7,65 G Sonderklasse	114,0	45,58	6,08 T Sonderklasse
Balken II-10	34,4	4,59 BZ 6,0	45,3	6,04 G Sonderklasse	130,5	52,20	6,96 T Sonderklasse

Hier wird das gewünschte Bruchverhalten zielsicher erreicht und das plötzliche Versagen tritt erst mit der weiteren Rissbildung auf, was allerdings zu einem Absenken der aufnehmbaren Last führt, welche weit über der des Erstrisses liegt. Es ist auffallend, wie der Werkstoff Faserbeton es schafft, diese Schwächung wieder gut zu machen und auf das ursprüngliche Niveau der Last vor dem plötzlichen Versagen zurückzufinden. Dies ist das angestrebte Verhalten für die späteren Tübbingversuche.

Ein durchaus gleichwertiges Ergebnis zeigt die Auswertung der Rezeptur 3-1 und 3-2 in Abbildung 104 mit der dazugehörigen Auswertung in Tabelle 31. Jedoch ist das Leistungsniveau ein wenig geringer, was durch die reduzierte Faserlänge bedingt ist.

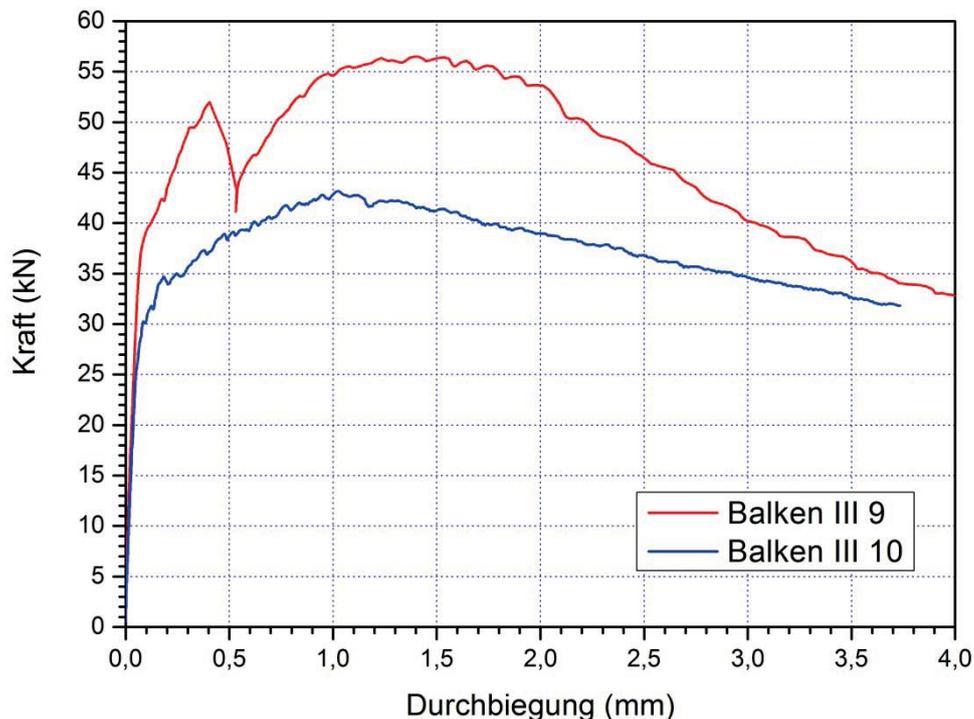


Abbildung 104 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 3-1 und Rezeptur 3-2

Tabelle 31 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 3-1 und Rezeptur 3-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken III-9	42,4	5,66 BZ 6,0	47,9	6,39 G Sonderklasse	127,7	51,08	6,81 T Sonderklasse
Balken III-10	34,7	4,63 BZ 6,0	38,8	5,17 G Sonderklasse	98,6	39,45	5,26 T Sonderklasse

Auch bei diesen Versuchen kam es zu einem plötzlichen Versagen, welches aber keine gravierenden Folgen für die Performance des Balkens hatte. Auch hier konnte nach dem Riss wieder Last aufgenommen und das ursprüngliche Lastniveau sogar noch übertroffen werden.

Als letzte Auswertung dieser Versuchsreihe werden die Ergebnisse der Balken aus Rezeptur 4-1 und 4-2 in Abbildung 105 und Tabelle 32 dargestellt.

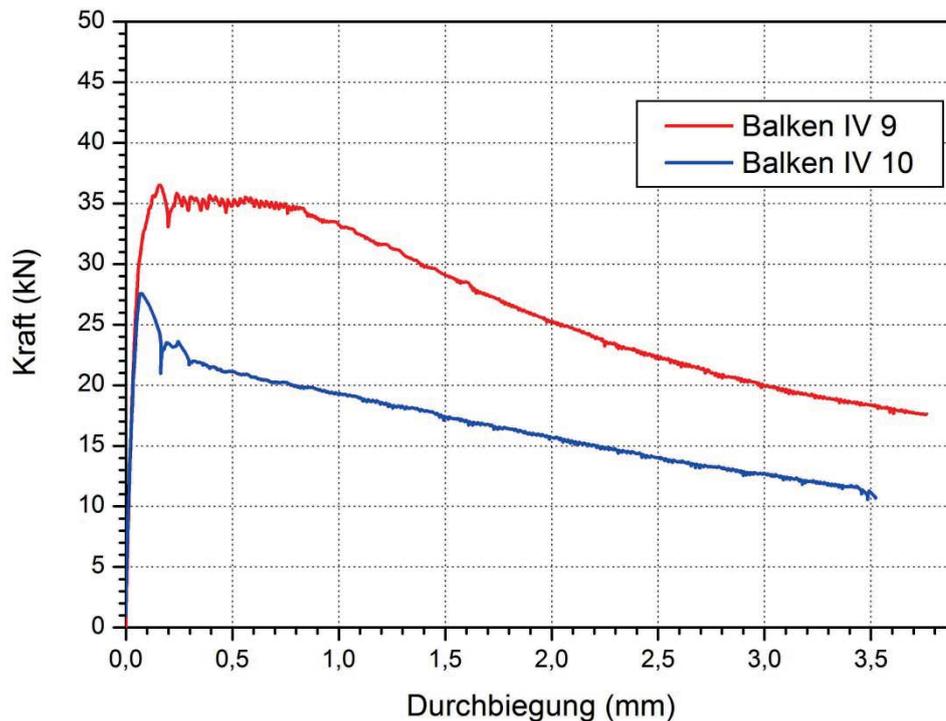


Abbildung 105 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 4-1 und Rezeptur 4-2

Tabelle 32 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 4-1 und Rezeptur 4-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken VI-9	35,7	4,75 BZ 6,0	34,8	4,64 G Sonderklasse	68,9	27,56	3,67 T Sonderklasse
Balken VI-10	27,6	3,68 BZ 4,5	21,1	2,81 G Sonderklasse	41,6	16,63	2,22 T Sonderklasse

Trotz einer hohen Dosierung und einer guten Orientierung im Bruchbereich konnte auch in dieser Versuchsserie kein überkritisches Bruchverhalten mit der kurzen Faser erreicht werden. Ebenso blieb diese Rezeptur, welche zudem noch eine schlechtere Verarbeitbarkeit als die anderen Rezepturen besaß, weit hinter den Ergebnissen der Anderen zurück. Aber auch die Rezeptur 3 konnte die Ergebnisse der Rezepturen 1 und 2 nicht erreichen und wurde daher in den weiteren Versuchen nicht mehr berücksichtigt. Auch in dieser Versuchsserie war festzustellen, dass mit der Reduzierung der Faserlänge auch das Arbeitsvermögen sinkt. Allerdings konnte durch alle Versuche gezeigt werden, dass das Anstoßen des Betonflusses an den Endplatten der Schalung zu einem Aufstellen der Fasern führt und somit zu einer weitgehenden Isotropie am Rand



der Balken. Zusätzlich konnte mit dieser Versuchsserie gezeigt werden, dass, selbst wenn die Einfüllrichtung rechtwinklig zur Fließrichtung in der Schalung steht, sich dennoch eine Vorzugsrichtung in z-Achse des Balkens ausbildet, vorausgesetzt man verhindert eine Ausbreitung in Einflussrichtung.

5.4 Befüllen des Balkens über eine Rinne in die Schalung

In der nun beschriebenen Versuchsserie kamen lediglich die Rezepturen 1 und 2 zum Einsatz. Mit dieser Betonage sollte untersucht werden, ob es möglich ist, einen Betonstrom, in dem die Fasern orientiert sind (Beton in der Rinne, vergleiche Abbildung 31) in die Form einzuleiten. Hierfür wurden eigens Schalungen mit einer Rampe gebaut, welche in Abbildung 106 zu sehen ist. Was bei dieser Art der Produktion auffiel, war, dass beim Befüllen der Schalung auf der Rampe ein gewisses Komprimieren des Betonflusses festzustellen war. Dies zeigte sich durch das Ausbilden einer wellenförmigen Struktur auf der Oberfläche. Dies ist auch in Abbildung 107 deutlich zu erkennen.

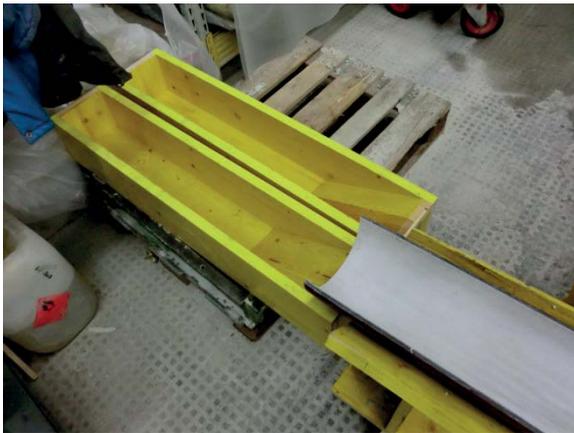


Abbildung 106 Versuchsanordnung zum Füllen der Balkenform mit „Einleitungsgefälle“



Abbildung 107 Betonage dieser Balken

5.4.1 Faserorientierung

Wie bereits in den vorangegangenen Versuchen wurden in der nachfolgenden Tabelle 33 die Faserorientierung in der Z-Achse sowie die Fließmaße dokumentiert.

Bei diesen Versuchen ist auffällig, dass es bei weitem keine so hohen Orientierungswerte mehr gab wie in den zuvor erläuterten Versuchen. Vielmehr herrscht weitgehende Isotropie vor. Durch die Beobachtungen während der Betonage ist jedoch festzustellen, dass der Massestrom im Balken eine langsamere Geschwindigkeit aufwies als auf der Rampe. Dieses Abbremsen führte zu dem gleichen Effekt wie am Ende des Balkens, die Fasern stellten sich gut sichtbar auf. Das Phänomen des abgebremsten Materialstroms wurde bereits bei den Versuchen mit der Ersatzflüssigkeit festgestellt. Es zeigt

sich, dass dieser Effekt auch beim faserbewehrten selbstverdichteten Beton eintritt. Auch wenn der Effekt bei der Ersatzflüssigkeit ein zweidimensionaler war, ist er hier dreidimensional festzustellen. Auch wird deutlich, dass der Verlust der Faserorientierung durch das Fließen in der Form nicht mehr rückgängig gemacht werden kann und über die gesamte Länge des Bauteils bestehen bleibt. Es konnte somit gezeigt werden, dass die zuvor in der Rinne geschaffene Orientierung nicht in das Bauteil überbracht werden kann, wenn die Fließgeschwindigkeit des Massestroms nicht konstant gehalten wird. Somit ist ebenfalls gezeigt worden, dass das Aufstellen der Faser am Ende der Schalung nicht durch das Anstoßen der Fasern an der Wand erzeugt wurde sondern über das aufgrund des Abbremsens des Materials erfolgte.

Tabelle 33 Messwerte der Faserorientierung in Fließrichtung und kumulierte Fasergehalte mit Faserdosierung von 50 kg/m³ (über Rampe gefüllte Balkenform)

Proben	Fließmaß	Mittlerer Fasergehalt im Bauteil	Faserorientierung in Fließrichtung			
			Fasergehalt			
			Würfel 1	Würfel 2	Würfel 3	Würfel 4
Rezeptur 1-1	62 cm	42 kg/m ³	45%	32%	37%	41%
			45 kg/m ³	45 kg/m ³	39 kg/m ³	41 kg/m ³
Rezeptur 1-2	62 cm	58 kg/m ³	59%	52%	37%	47%
			60 kg/m ³	59 kg/m ³	54 kg/m ³	58 kg/m ³
Rezeptur 1-3	62 cm	53 kg/m ³	49%	35%	38%	33%
			83 kg/m ³	49 kg/m ³	43 kg/m ³	37 kg/m ³
Rezeptur 1-4	62 cm	47 kg/m ³	30%	32%	32%	33%
			46 kg/m ³	53 kg/m ³	43 kg/m ³	46 kg/m ³
Rezeptur 2-1	65 cm	41 kg/m ³	49%	50%	42%	39%
			33 kg/m ³	38 kg/m ³	42 kg/m ³	50 kg/m ³
Rezeptur 2-2	65 cm	59 kg/m ³	32%	22%	20%	38%
			65 kg/m ³	58 kg/m ³	58 kg/m ³	56 kg/m ³

5.4.2 Äquivalente Biegezugfestigkeit

Beispielhaft für die hier durchgeführten Messungen der äquivalenten Biegezugfestigkeiten für die Rezeptur 1 ist das Kraft-Durchbiegung-Diagramm der Rezeptur 1-3 und 1-4 in Abbildung 108 dargestellt. Die dazugehörige Auswertung befindet sich in Tabelle 34 unterhalb des Diagramms.

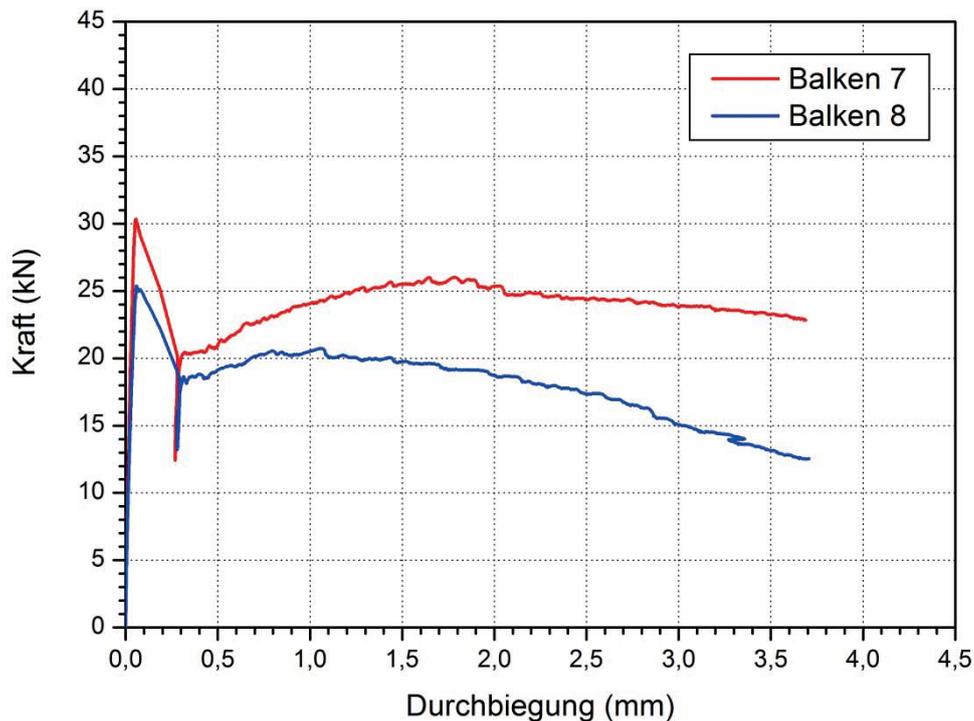


Abbildung 108 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 1-3 und Rezeptur 1-4

Tabelle 34 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 1-3 und Rezeptur 1-4 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken 7	30,4	4,05 BZ 6,0	21,0	2,80 G Sonderklasse	61,2	24,46	3,26 T Sonderklasse
Balken 8	25,4	3,38 BZ 4,5	19,2	2,56 G Sonderklasse	47,1	18,84	2,51 T Sonderklasse

In der Auswertung der Balken 7 und 8 wird eine Arbeitslinie gezeigt, die einem unterkritischen Faservolumen zugeschrieben werden kann. Zudem ist wiederholt das plötzliche Versagen nach dem Erstriss festzustellen.

An dieser Stelle soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass bei den vier geprüften Balken der Rezeptur 1, der Balken 6 der Rezeptur 1-1 eine Arbeitslinie mit überkritischem Volumen aufwies. Auch seine Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit war mit den vom Rand befüllten Probekörpern vergleichbar. (s. Anhang)

Im Folgenden ist nun die Arbeitslinie und dazugehörige Auswertung der Balken II-5 und II-6 aus der Rezeptur 2-1 und 2-2 zu sehen.

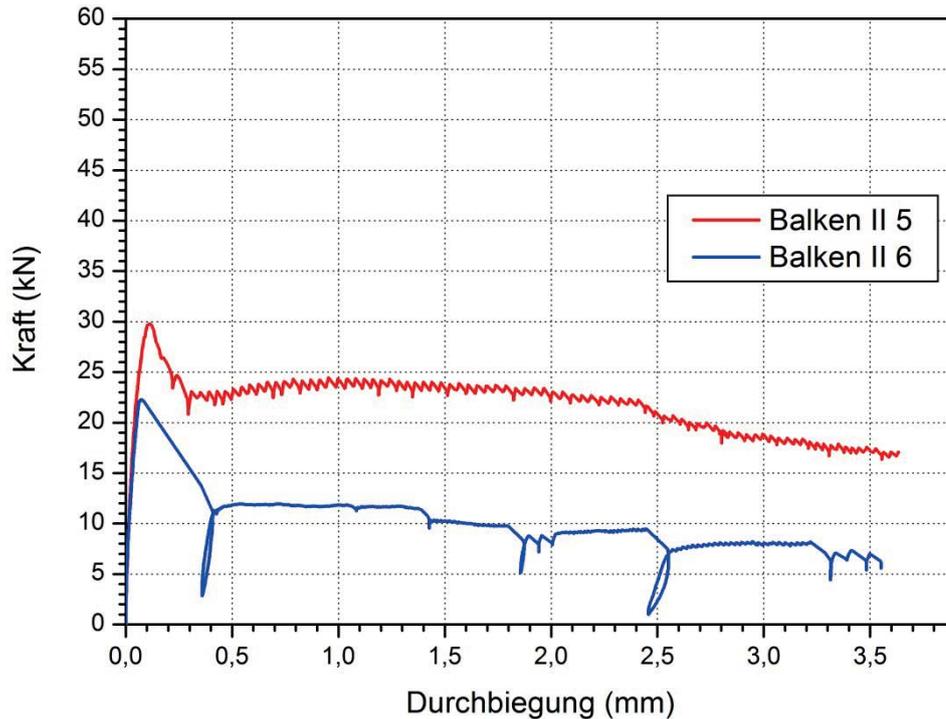


Abbildung 109 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 2-1 und Rezeptur 2-2

Tabelle 35 Auswertung des Versuches mit Rezeptur 2-1 und Rezeptur 2-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken II-5	29,8	3,97 BZ 4,5	22,7	3,03 G Sonderklasse	56,0	22,41	2,99 T Sonderklasse
Balken II-6	22,3	2,97 BZ 3,0	11,8	1,58 G 4	25,0	10,01	1,33 T 4

Auch in diesem Versuch wurde dasselbe Arbeitsvermögen wie bei der vorangegangenen Auswertung festgestellt.

Es zeigt sich ebenfalls durch diese Versuche, dass die Arbeitslinie nicht nur vom Faser-
volumen sondern auch von der Faserorientierung abhängt. Auch ist festzuhalten, dass
die Arbeitslinie des Balkens 6 als Ausreißer zu werten ist, weil alle restlichen fünf Bal-
ken ein einheitliches Verhalten aufwiesen. Da nach diesen Versuchen belegt war, dass
diese Art der Befüllung für die Tübbingung nicht in Frage kam, wurden die Untersuchun-
gen auf diesem Gebiet mit weiteren Mischungen nicht fortgeführt.



5.5 Befüllen eines doppelt so langen Balken

Für den folgenden Versuch wurde eine Balkenform mit den Maßen 15 cm x 15 cm x 140 cm angefertigt welche in Abbildung 110 zu sehen ist. Diese Versuche wurden mit der Rezeptur 2 durchgeführt. Mit diesem Versuch sollte gezeigt werden, dass sich durch eine längere Fließstrecke keine Veränderungen ergeben und die Beobachtungen aus 0. und 5.3 auch für größere Dimensionen Gültigkeit haben. Es wurden daher zwei derartige Balken hergestellt. Der Balken L1 wurde dabei vom Ende befüllt und Balken L2 von der Mitte.



Abbildung 110 Befüllung der doppelt so langen Balkenform mit der Rinne am Ende

5.5.1 Faserorientierung

In Tabelle 36 sind in gewohnter Weise die Orientierung in Fließrichtung (z-Achse) sowie das Fließmaß und die Faserverteilung dieser Versuche festgehalten. Da der produzierte Balken vor der äquivalenten Biegezugprüfung halbiert werden musste, soll an dieser Stelle erwähnt werden, wo sich in diesen beiden Balken Wand und Einguss befunden haben. „Balken lang 1“ wurden am Würfel 1 von Balken L 1-1 gefüllt und endete am Würfel 4 vom Balken L 1-2. Der „Balken lang 2“ wurde dagegen im Bereich von Würfel 4 von Balken L 2-1 und Würfel 1 von Balken L 2-2 befüllt.

Tabelle 36 Messwerte der Faserorientierung in Fließrichtung und kumulierte Fasergehalte mit Faserdosierung von 50 kg/m³ (Lange Balkenform)

Proben	Fließmaß	Mittlerer Fasergehalt im Bauteil	Faserorientierung in Fließrichtung			
			Fasergehalt			
			Würfel 1	Würfel 2	Würfel 3	Würfel 4
Balken L 1-1	69 cm	48 kg/m ³	60%	62%	63%	65%
			48 kg/m ³	48 kg/m ³	51 kg/m ³	44 kg/m ³
Balken L 1-2	69 cm	52 kg/m ³	58%	54%	57%	46%
			45 kg/m ³	52 kg/m ³	61 kg/m ³	50 kg/m ³
Balken L 2-1	69 cm	49 kg/m ³	44%	56%	58%	62%
			43 kg/m ³	48 kg/m ³	51 kg/m ³	54 kg/m ³
Balken L 2-2	69 cm	51 kg/m ³	53%	48%	55%	51%
			58 kg/m ³	56 kg/m ³	47 kg/m ³	43 kg/m ³

Es ist deutlich sichtbar, dass sich beim „Balken lang 2“ ebenfalls eine homogene Faser-
verteilung über die ganze Länge ergibt und sich auch keine Anhäufungen der Fasern in
der Mitte ergeben. Mit diesem Ergebnis wird die Beobachtungen aus den Kapiteln 5.2
und 5.3 bestätigt.

5.5.2 Äquivalente Biegezugfestigkeit

Im Anschluss sind nun die durchgeführten Messungen der äquivalenten Biegezugfes-
tigkeiten mit dazugehöriger Auswertung in Abbildung 111 mit Tabelle 37 und Abbildung
112 mit Tabelle 38 zu sehen.

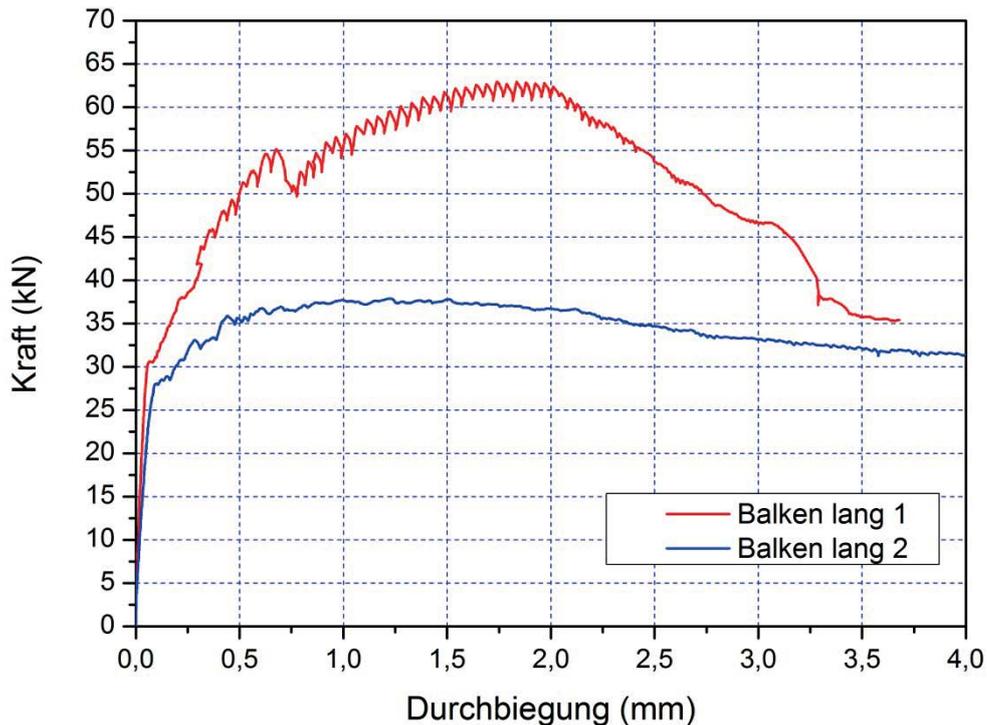


Abbildung 111 Kraft-Durchbiegungsdiagramm von Balken lang 1 und Balken lang 2

Tabelle 37 Auswertung des Versuches mit Rezeptur Balken L 1-1 und Balken L 1-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken lang 1	30,7	4,09 BZ 4,5	50,1	6,69 G Sonderklasse	141,1	56,46	7,53 T Sonderklasse
Balken lang 2	28,0	3,73 BZ 4,5	35,4	4,72 G Sonderklasse	106,9	42,75	5,70 T Sonderklasse

An Hand dieser Prüfung ist deutlich zu erkennen, dass eine hohe Faserdichte keinen alleinigen Einfluss auf die Nachrisseigenschaften hat. So weist doch Balken L 1-2 eine höhere Faserdichte im Versagensbereich von 7 kg/m³ auf und zeigt dennoch eine 30 % niedrigere Tragsicherheit. Auch muss festgehalten werden, dass trotz gleicher Produktionsbedingungen dennoch so große Unterschiede auftraten. Die einzige Erklärung für diesen Unterschied kann nur in der Faserorientierung liegen, da diese nämlich in der Bruchzone von „Balken lang 1“ um etwa 7 % -Punkte besser ist, als bei „Balken lang 2“.

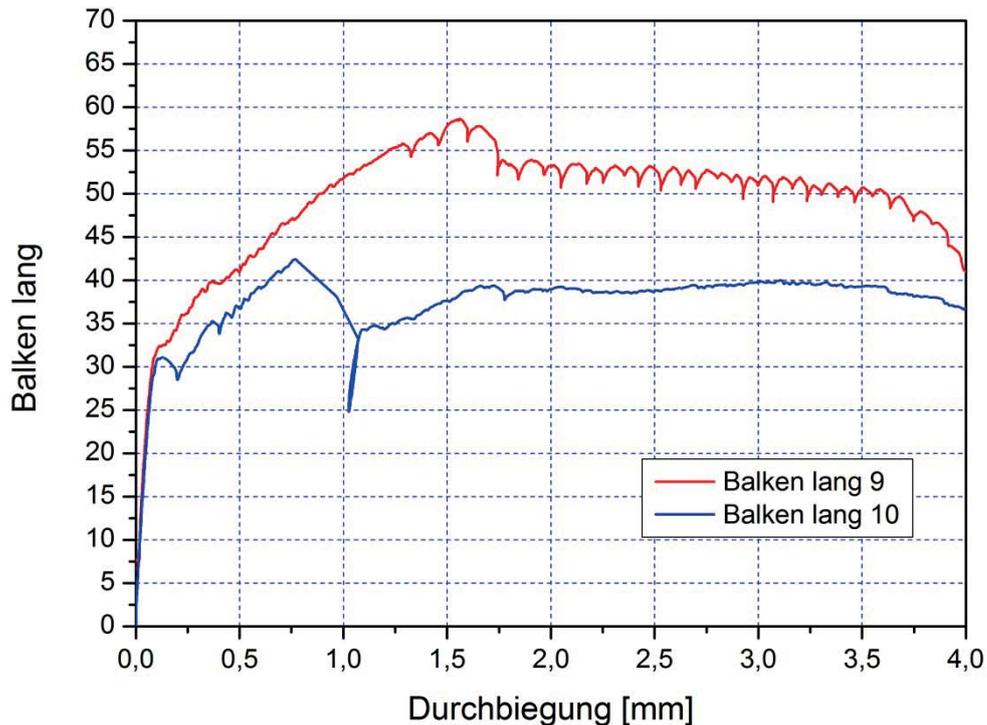


Abbildung 112 Kraft-Durchbiegungsdiagramm von Balken lang 9 und Balken lang 10

Tabelle 38 Auswertung des Versuches mit Rezeptur Balken L 2-1 und Balken L 2-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken lang 9	32,4	4,32 BZ 6,0	41,0	5,47 G Sonderklasse	156,6	62,62	8,35 T Sonderklasse
Balken lang 10	30,9	4,12 BZ 4,5	36,8	4,90 G Sonderklasse	115,9	46,35	6,18 T Sonderklasse

Bei der Befüllung des Balkens in der Mitte zeigte sich dagegen ein anderes Bild. Hier waren die Werte vergleichbarer und die Arbeitslinien bis zum plötzlichen schlagartigem Versagen bei der zweiten Hauptrissöffnung im „Balken lang 10“ als durchaus gleichwertig zu betrachten. Lediglich dieses plötzliche Versagen führte dazu, dass das Arbeitsvermögen von „Balken lang 10“ nicht mehr an die Werte des „Balken lang 9“ heran reichte. Aber auch mit dieser Betonage muss festgestellt werden, dass dieses teilweise spröde Brechen allein durch die Rezeptur, Fasermenge und Orientierung der Fasern nicht zu verhindern ist. Was genau der Auslöser dieses Bruchverhaltens ist, konnte mit diesen Untersuchungen nicht festgestellt werden.



5.6 Befüllen des Balkens über einen Trichter am Ende

Bei dem folgend beschriebenen Versuch kam der Trichter zum Einsatz, welcher das Befüllen des Balkens in Anlehnung des L-Box Versuchs aus Kapitel 3.3.3 ermöglichen sollte. Wie in der Abbildung 113 zu sehen ist, wurde der Trichter mit Beton der Rezeptur 2 gefüllt und der Balken durch Ziehen des Schiebers auf einmal befüllt (s. Abbildung 114). Allerdings war bei dieser Versuchsreihe der Trichterinhalt größer als das Balkenvolumen, wodurch es zu einem Überschwappen und einem Rückschlag ähnlich dem Versuch aus Kapitel 3.3.3 kam.

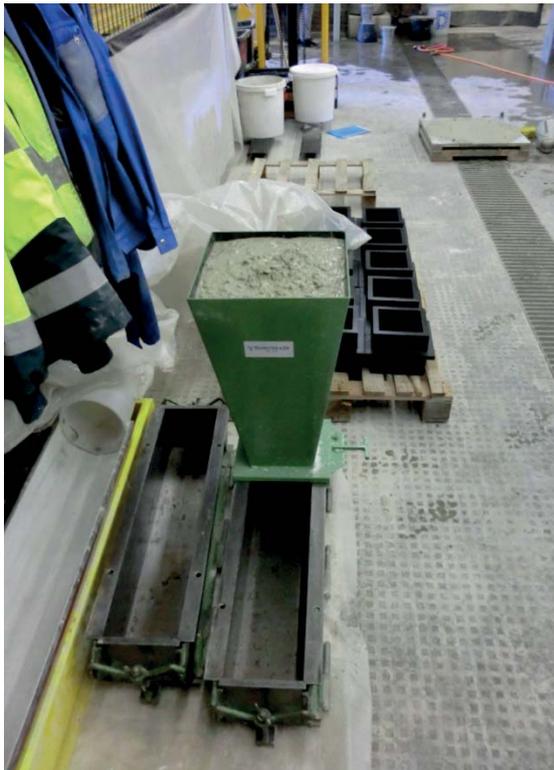


Abbildung 113 Vor dem Befüllung der Balkenform mit dem Trichter am Ende



Abbildung 114 Befüllung der Balkenform mit dem Trichter am Ende

5.6.1 Faserorientierung

Nachfolgend sind in Tabelle 39 die Auswertungen der Faserorientierung und -menge sowie das Fließmaß aufgeführt.

Tabelle 39 Messwerte der Faserorientierung in Fließrichtung und kumulierte Fasergehalte mit Faserdosierung von 50 kg/m³ (am Ende mit Trichter gefüllte Balkenform)

Proben	Fließmaß	Mittlerer Fasergehalt im Bauteil	Faserorientierung in Fließrichtung			
			Fasergehalt			
			Würfel 1	Würfel 2	Würfel 3	Würfel 4
Balken T-1	68 cm	49 kg/m ³	52%	57%	52%	56%
			42 kg/m ³	51 kg/m ³	55 kg/m ³	47 kg/m ³
Balken T-2	68 cm	51 kg/m ³	49%	56%	46%	47%
			47 kg/m ³	56 kg/m ³	50 kg/m ³	50 kg/m ³

Bei dieser Auswertung ist festzustellen, dass das Überschwappen des Betons durch den zu stark gefüllten Trichter zu einer Verschlechterung der Faserorientierung geführt hat. Zugleich werden aber dadurch die Erkenntnisse aus dem Kapitel 3.3.3 bestätigt. Allerdings wurde auf eine Wiederholung der Versuche verzichtet, da trotzdem eine Orientierung beobachtet werden konnte und diese in den Tübbingversuchen noch weiter validiert werden kann.

5.6.2 Äquivalente Biegezugfestigkeit

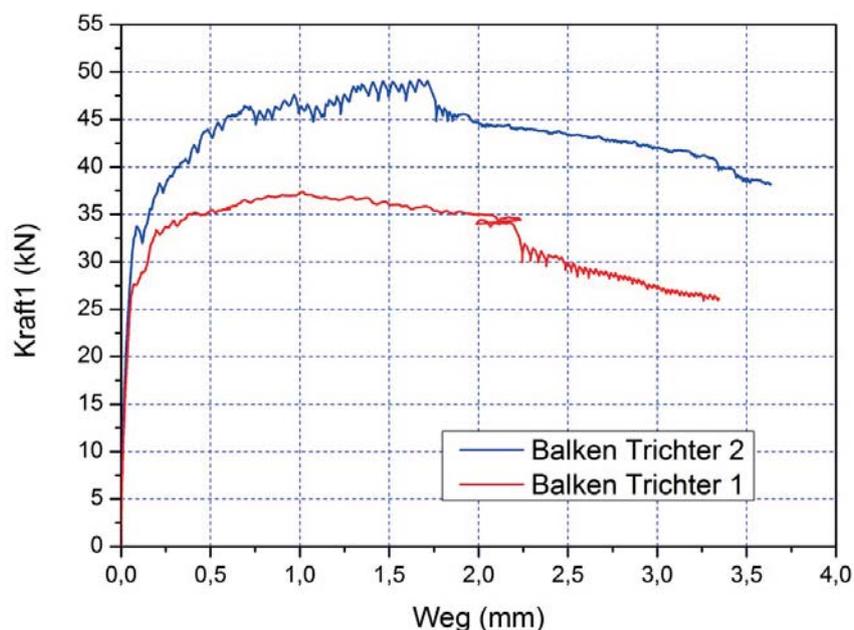


Abbildung 115 Kraft-Durchbiegungsdiagramm des Balkens mit dem Trichter am Ende gefüllt



Tabelle 40 Auswertung des Versuches mit Rezeptur Balken T-1 und Rezeptur Balken T-2 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	F _{1. Riss} [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			F _{0,5 mm} [kN]	f _{eqms} [N/mm ²]	A _{0,5-3,0 mm}	F _{0,5-3,0 mm} [kN]	f _{eqmu} [N/mm ²]
Balken T-1	27,6	3,67 BZ 4,5	35,4	4,72 G Sonderklasse	84,7	33,88	4,52 T Sonderklasse
Balken T-2	33,7	4,50 BZ 6,0	43,5	5,80 G Sonderklasse	113,5	45,38	6,05 T Sonderklasse

Bemerkenswert ist bei diesem Versuch, dass Balken T-2 im Vergleich zu Balken T-1 mit schlechteren Orientierungswerten bei gleicher mittleren Faserdichte im Würfel 2 und Würfel 3 bessere Performance liefert. Im Allgemeinen ist festzuhalten, dass mit der Trichterfüllung, trotz des Schwappens, die besten Gebrauchstauglichkeiten und Tragsicherheiten von vom Rand befüllten Stahlbalkenschalungen mit der Fasermenge von 50 kg/m³ erreicht wurden.

5.7 Befüllen des Balkens über einen Trichter in der Mitte

Beim letzten Versuch mit den Balkenschalungen wurde der Trichter mittig aufgesetzt. Diesmal wurde der Füllgrad des Trichters so gewählt, dass sich die Schalung vollständig füllte, es aber zu keinem Überschwappen kam. Abbildung 116 und Abbildung 117 zeigt dies. Auch bei diesem Versuch kam die Betonrezeptur 2 zum Einsatz.



Abbildung 116 Befüllen der Balkenform über den Trichter in der Mitte



Abbildung 117 Befüllte Balkenform mit dem Trichter in der Mitte

5.7.1 Faserorientierung

Wie in der Auswertung dieses Versuches bezüglich der Faserorientierung und der Faserdichte in Tabelle 41 deutlich wird, wurden durch dieses Verfahren die besten Orientierungswerte in den mittig befüllten Schalungen erzielt. Zudem sind die Faserorientie-

rungen an den Randwürfeln um einiges gerichteter als beim Befüllen mit der Rinne. Damit ist festzustellen, dass eine schnelle Befüllung, über beispielsweise einen Trichter, das geeignetste Verfahren zur Erzielung einer guten Faserorientierung und zum Minimieren des isotropen Bereichs am Ende der Schalung ist.

Tabelle 41 Messwerte der Faserorientierung in Fließrichtung und kumulierte Fasergehalte mit Faserdosierung von 50 kg/m^3 (mittig mit Trichter gefüllte Balkenform)

Proben	Fließmaß	Mittlerer Fasergehalt im Bauteil	Faserorientierung in Fließrichtung			
			Fasergehalt			
			Würfel 1	Würfel 2	Würfel 3	Würfel 4
Balken T-9	66 cm	55 kg/m^3	52%	60%	63%	53%
			47 kg/m^3	63 kg/m^3	63 kg/m^3	45 kg/m^3
Balken T-10	66 cm	45 kg/m^3	55%	62%	67%	55%
			49 kg/m^3	39 kg/m^3	45 kg/m^3	49 kg/m^3

5.7.2 Äquivalente Biegezugfestigkeit

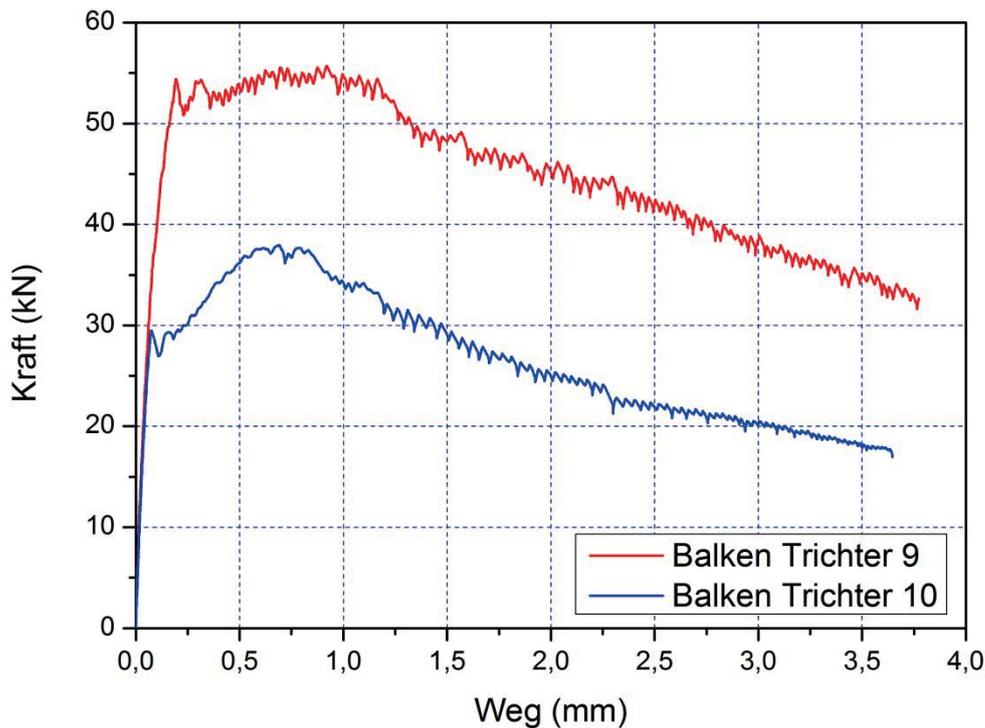


Abbildung 118 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Balken mit dem Trichter Mittig gefüllt



Tabelle 42 Auswertung des Versuches mit Rezeptur Balken T-9 und Rezeptur Balken T-10 nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)

	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit TG		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken T-9	52,1	6,95 BZ 6,0	53,4	7,11 G Sonderklasse	118,6	47,43	6,32 T Sonderklasse
Balken T-10	29,5	3,94 BZ 4,5	36,2	4,83 G Sonderklasse	96,9	38,75	5,17 T Sonderklasse

Bemerkenswert ist bei dieser Auswertung, dass der Balken T-9 die höchste Biegezugfestigkeit aller untersuchten Balken aufweist. Da beide Balken aus derselben Mischung stammen und im selben Alter geprüft wurden, ist dieser Unterschied nicht erklärbar. Allerdings ist auch zu sehen, dass hier beide Graphen dieselben Charakteristiken aufweisen und quasi parallel laufen.

5.8 Ergebnisse und Schlussfolgerung

Nach den Balkenversuchen mit der einheitlichen SCC-Mischung und Stahlfasern, von gleichem Typ aber unterschiedlicher Dimension, bleibt folgendes festzuhalten:

- Eine höhere Faseranzahl führt zu längeren Mischzeiten.
- Es gibt anscheinend eine kritische Faseranzahl, bei deren Überschreitung es unweigerlich zum Sperren durch die Fasern kommt und Inhomogenität entsteht.
- Wenn sich eine Faserorientierung gebildet hat, dann wird sie durch Veränderungen in der Fließgeschwindigkeit wieder zunichte gemacht. Die Fortpflanzung dieses Effektes ist durch die Fließfähigkeit und somit auch von der Betoniergeschwindigkeit abhängig. Je schneller der Vorgang abläuft, desto geringer wird dieser Effekt in das Bauteil hineinverlängert.
- Es konnte gezeigt werden, dass es eine eindeutige Faserorientierung bei fließfähigen selbstverdichtenden Faserbetonen gibt.
- Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass das Nachrissverhalten von Faserbeton nicht allein vom Fasergehalt abhängt sondern auch von der Dimension der Faser. Je geringer die Faserlänge ist, desto schlechter ist das Arbeitsvermögen nach dem Erstriss. Dies kann in Abbildung 119 gesehen werden

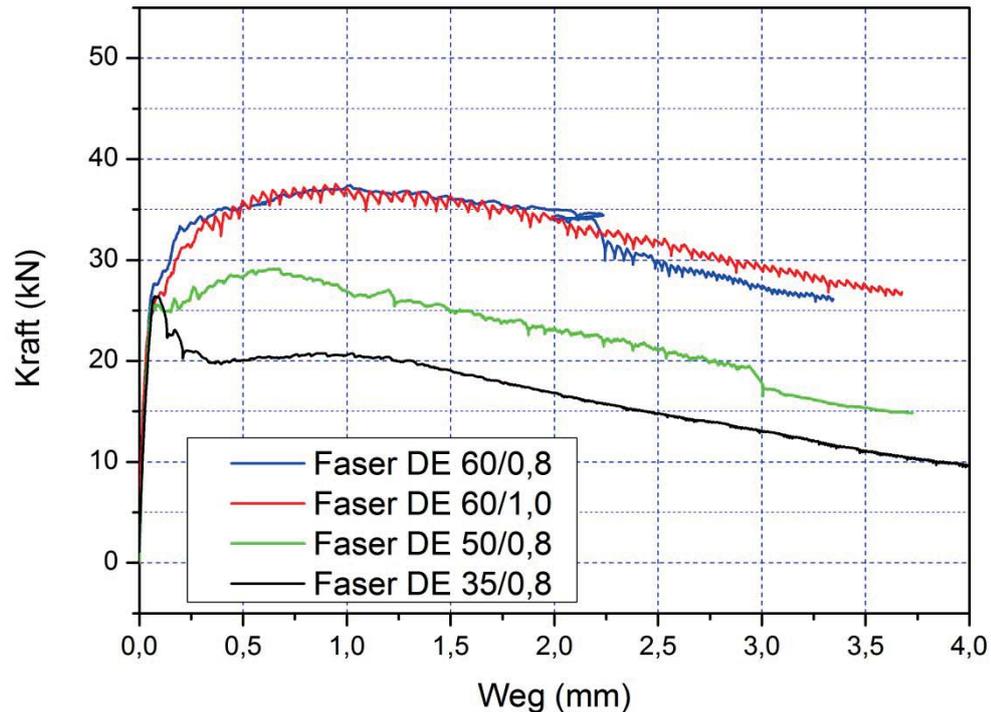


Abbildung 119 Einfluss der Faser-Formgebung auf die äquivalente Biegezugfestigkeit bei gleicher Grundbetonrezeptur und gleichem Einfüllort bei einer Faserdosierung von 50 kg/m³

- Eine Beurteilung von Faserbeton in Klassen ist schwierig und kann, wenn überhaupt, nur über eine ausreichend hohe Anzahl von Prüfkörpern erfolgen.
- Die Bezeichnung „kritisches Volumen“ ist nach diesen Untersuchungen eine nicht nachvollziehbare Bezeichnung um eine Arbeitslinie zu charakterisieren. Vielmehr ist die Anzahl der Fasern mit der Orientierung und nicht die Faserdichte entscheidend für den zu erwartenden Kurvenverlauf.
- Die Problematik von plötzlicher Risserweiterung und damit die Beeinflussung der Kraft-Dehnungskurve bei der äquivalenten Biegezugprüfung im Zwei-Punkt-Verfahren ist durch Rezeptur, Faserorientierung und Produktionsweise nicht steuerbar.
- Die Versuche haben ebenfalls gezeigt, dass die Richtung des Einfüllvorganges eher nicht entscheidend für die spätere Faserorientierung ist. Wichtiger ist, dass das Fließen im Bauteil nur in der gewünschten Richtung der Faserorientierung möglich ist. (Band-Anguss)
- Das Abbremsen des Materialstroms führt zu Faserisotropie, welche durch nachträgliches längeres ungehindertes Fließen nicht mehr aufgelöst werden kann. Eine Behinderung des Materialstromes ist daher zu vermeiden.



- Auch konnte gezeigt werden, dass die Faserorientierung im fließenden Beton über längere Strecken konstant bestehen bleibt.
- Fließstrecken nach dem Eingussbereich müssen lang genug sein, damit sich keine Faseranhäufung bilden und keine Inhomogenitäten entstehen können.
- Bei diesen Untersuchungen konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden, dass die Faserorientierung einen größeren Einfluss auf das Nachrissverhalten hat als der Fasergehalt.
- Es hat sich bei den Versuchen gezeigt, dass es vorteilhafter ist, die Formen mit Vorrichtungen zu befüllen, die ein schnelles Füllen der Schalungen ermöglichen. Die schnelle Befüllung ist einer langsamen kontinuierlichen Befüllung vorzuziehen.

In den anschließenden Produktionen der Kleintübbinge werden die Erkenntnisse dieser Untersuchungen Berücksichtigung finden. So werden diese ausschließlich mit Vorrichtungen befüllt, die ein schnelles Einbringen des FRSCC (fiber-reinforced self compacting concrete) ermöglichen.

6 Kleintübbingserie

In diesem Kapitel wird über die Produktion und die Prüfungen im adaptierten Zwei-Punkt- Biegezugverfahren berichtet. Als Tübbingform wurde eine Verkleinerung der in Brixlegg produzierten Tübbinge aus dem FFG-Projekt Nr. 813678 gewählt, welche mit einer 43 I Mischung zu produzieren war. Die produzierten Tübbinge besaßen einen Innenradius von 150 cm, eine Höhe von 15 cm und eine Breite von 20 cm und schlossen einen Winkel von $39,7^\circ$ ein.

Für die Tübbingproduktion wurden zwei verschiedene Tübbingformen von der Firma DOKA bestellt. Die Tübbingschalung 1 (s. Abbildung 120) wurde inspiriert von der Veröffentlichung von der CBE Groupe in der BFT International [54] als „stehende“ Schalung und die Tübbingschalung 2 (s. Abbildung 121) als „liegende“ Schalung – standardmäßige Produktionsform – geliefert.



Abbildung 120 Tübbingschalung 1



Abbildung 121 Tübbingschalung 2

Die Tübbingschalung 1 wurde zusätzlich mit Plexiglaswänden ausgestattet, um den Produktionsvorgang besser beobachten zu können. Alle Tübbinge wurden über einen Vorratsbehälter, vergleichbar mit dem Trichter aus den Kapiteln 5.6 und 5.7, gefüllt. Als Beton kam dieselbe SCC –Mischung wie in Kapitel 4.3 zum Einsatz. Für die Tübbingproduktion wurde den Betonmischungen 2,8 kg Fasern des Typs DE 60/1,0 N der Firma KrampeHarex zugegeben. Dies entspricht einer Dosierung von 65 kg/m^3 . Die Wahl fiel auf Grund der, in den vorangegangenen Versuchen erwiesenen, guten Verarbeitbarkeit auf diese Faser. Zudem war das Arbeitsvermögen der dünneren Faser vergleichsweise zu niedrig, als dass die schlechtere Verarbeitbarkeit, auch im Hinblick auf einen späteren Feldversuch, gerechtfertigt gewesen wäre.

Nach der Produktion wurden die Tübbinge nach 7 bzw. 28 Tagen auf der Hydropulsanlage der Universität Innsbruck, welche eine Nennkraft von 1600 kN hat, geprüft. Die



durchgeführten Scheiteldruckversuche wurden, mit einer Geschwindigkeit von 0,3mm/min, Weg-gesteuert gefahren. Um eine optimale Einleitung in die Lager zu ermöglichen wurden in der Schlosserei der Firma Schretter & Cie zwei Auflager gefertigt, die mit dem Prüfrahen verschraubt wurden. Die Zwischenräume zwischen Auflager und Tübbing-Stirnseite wurde vor der Prüfung mit SupraCem 45-Suspension vergossen, um eine optimale Einleitung der Normalkraft in das Lager gewährleisten zu können. In Abbildung 122 ist ein solch eingebauter Tübbing vor der Prüfung gezeigt.

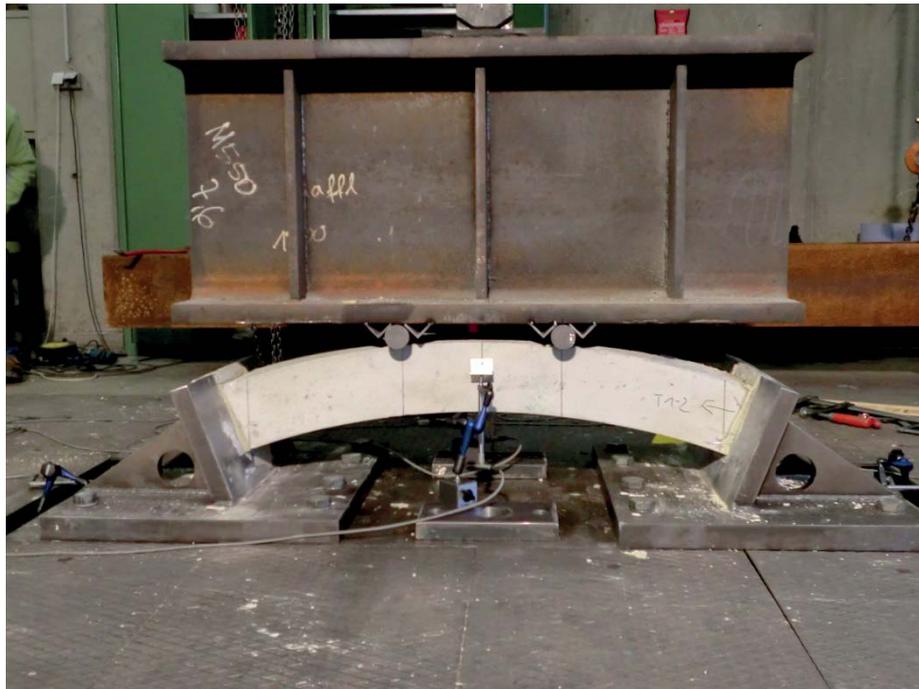


Abbildung 122 Eingebauter Tübbing T1-2 vor der Prüfung

Auf diese Weise wird der Einbauzustand des Tübbings in einer Tunnelröhre simuliert. Über einen senkrechten Stahlträger ist der Pressenkolben mit einer Traverse verbunden, die dafür sorgt, dass die Last in die Drittelpunkte des Tübbings eingeleitet wird.

Am Ende der Widerlager wurden induktive Wegaufnehmer angebracht, um gegebenenfalls horizontale Verschiebungen aufnehmen zu können. In der Tübbingmitte wurden die vertikalen Verschiebungen gemessen.

Wie bereits erwähnt, erfolgte das Aufbringen der Belastung Weg-gesteuert, d.h. die Pressenkraft wurde durch die Software so gesteuert, dass der Maschinenweg stets 0,3 mm pro Minute betrug. Die Tübbinge wurden solange belastet, bis diese keine höhere Kraft mehr aufnehmen konnten und zu Bruch gingen. Wenn das Versagen nicht schlagartig erfolgte und die Wegaufnehmer dies erlaubten, wurde die Verformung bis zu einer Unterschreitung von 100 kN weitergefahren. Damit konnte das Nachrissverhalten beurteilt werden. Ein Versuch dauerte somit bis zu 80 Minuten.

Auf diese Art wurden insgesamt 15 Tübbinge getestet.



Nach der Prüfung wurden die Tübbinge, wie in Abbildung 123 zu sehen ist, zersägt, um mit dem BSM 100 die Faserorientierung, analog zu den Messungen in Kapitel 5, feststellen zu können. Die dazugehörigen Messprotokolle sind im Anhang zu finden.



Abbildung 123 Tübbing nach Prüfung zersägt um die Faserorientierung zu messen

In den nun folgenden Kapiteln wird im Detail auf die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung der Tübbinge, unterteilt nach Produktionsart und Alter, eingegangen.

6.1 Tübbingschalung 1

Die in diesem Kapitel beschriebenen Ergebnisse stammen alle von Tübbingen, die mit der stehenden Schalung nach Abbildung 120 produziert wurden. Über die Plexiglaswände konnte der Befüllungsvorgang beobachtet werden. In Abbildung 124 ist dieser Vorgang in einer Bildfolge von links oben nach rechts unten festgehalten.

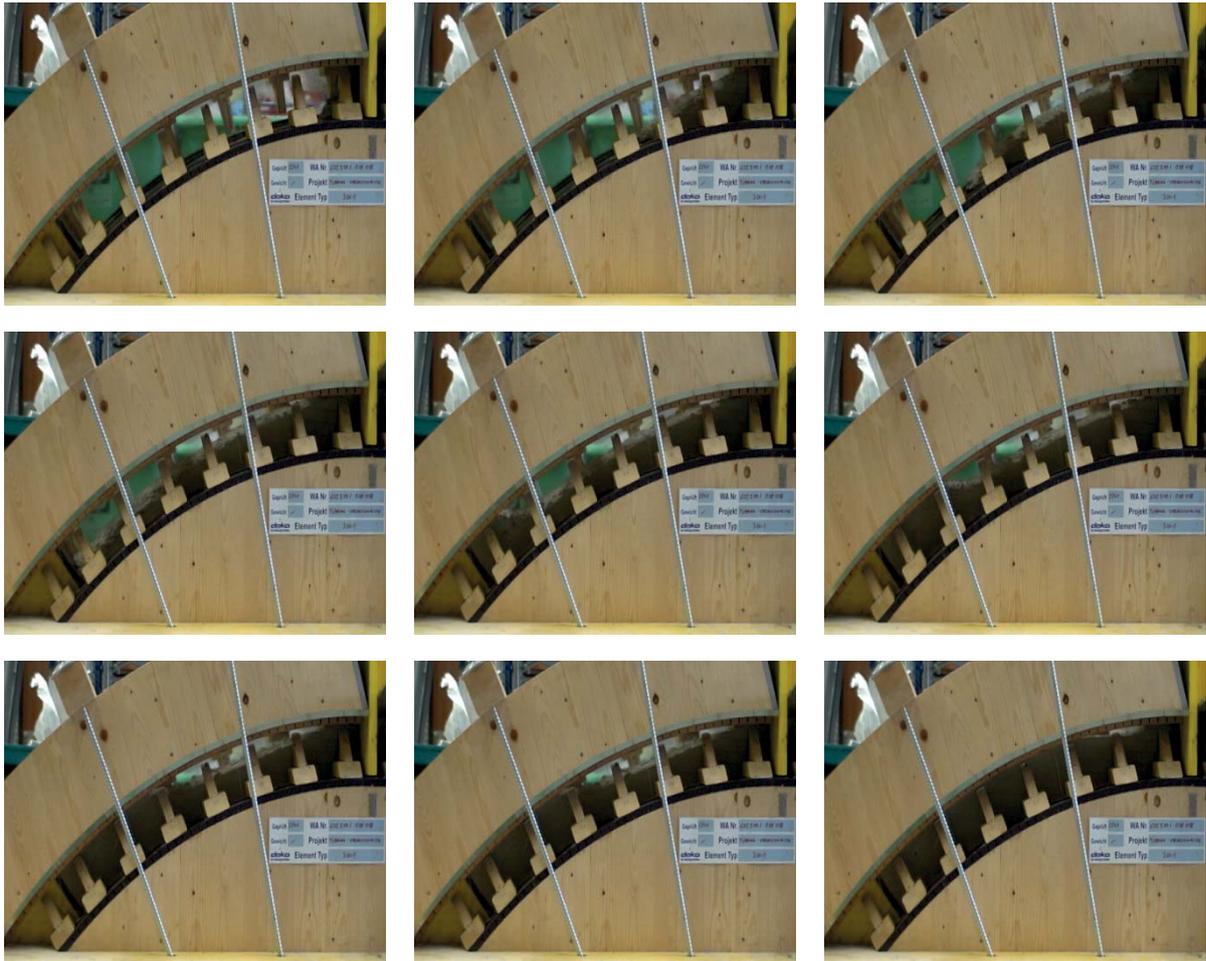


Abbildung 124 Befüllen der Tübbingschalung 1

Auch wenn diese Befüllung die Vermutung nahelegt, dass die Fasern im Prüfbereich eher horizontal (parallel zur Einfülllebene) liegen müssten, so ist dem nicht so. Es hat sich gezeigt, dass sich über den gesamten Querschnitt eine gute Faserorientierung in Fließrichtung (parallel zur Schalungsoberfläche) gebildet hat und lediglich der untere Bereich an der Wand eine Isotropie aufwies.

Die ersten drei Tübbinge, die in diesem Verfahren hergestellt wurden, sind im Alter von 7 Tagen geprüft worden. Im Folgenden werden nun die Kraft-Dehnungsdiagramme dieser Prüfungen mit einem Foto und dem Rissbild zum Zeitpunkt des Versagens gezeigt.

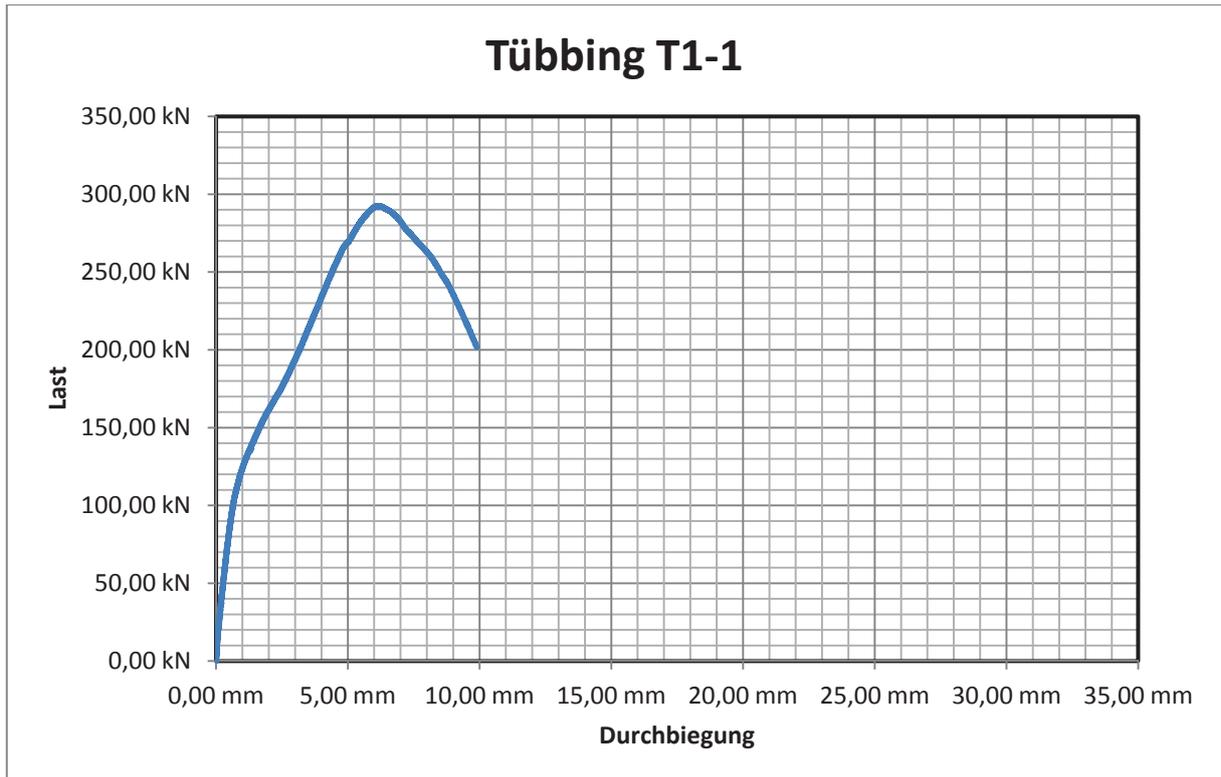


Abbildung 125 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T1-1

Bei dem oben abgebildeten Diagramm (Abbildung 125) sind deutlich drei Bereiche zu erkennen die an die Bereiche in Abbildung 12 erinnern. So wäre demnach der Anstieg bis zu ca. 100 kN durch die Betonfestigkeit gegeben und der Rest des Anstiegs würde damit das Ausziehverhalten der Fasern widerspiegeln.

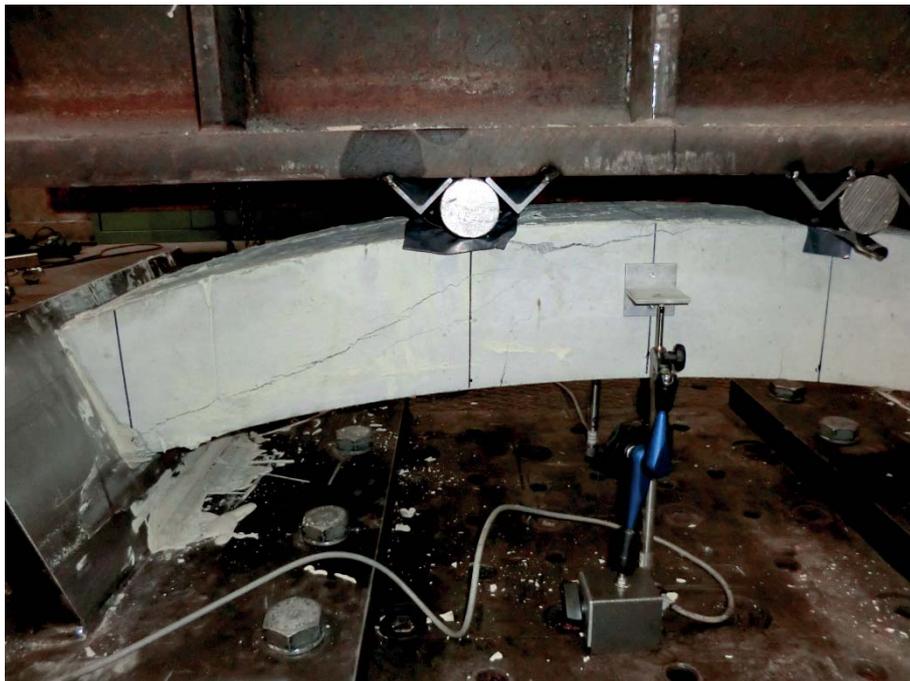


Abbildung 126 Foto des Bruchbildes von Tübbing T1-1



Das Bruchbild dieses Versuches (Abbildung 126) war dagegen nicht so erwartet worden. Der Riss aus dem Druckbereich des Auflagers in die Einleitung war zuvor bei den Prüfungen im FFG-Projekt Nr. 813678 nicht aufgetreten.

Durch die Prüfung des Tübbing T1-2 sollte festgestellt werden, ob es sich dabei um einen Einzelfall oder um einen systematischen Effekt handelte.

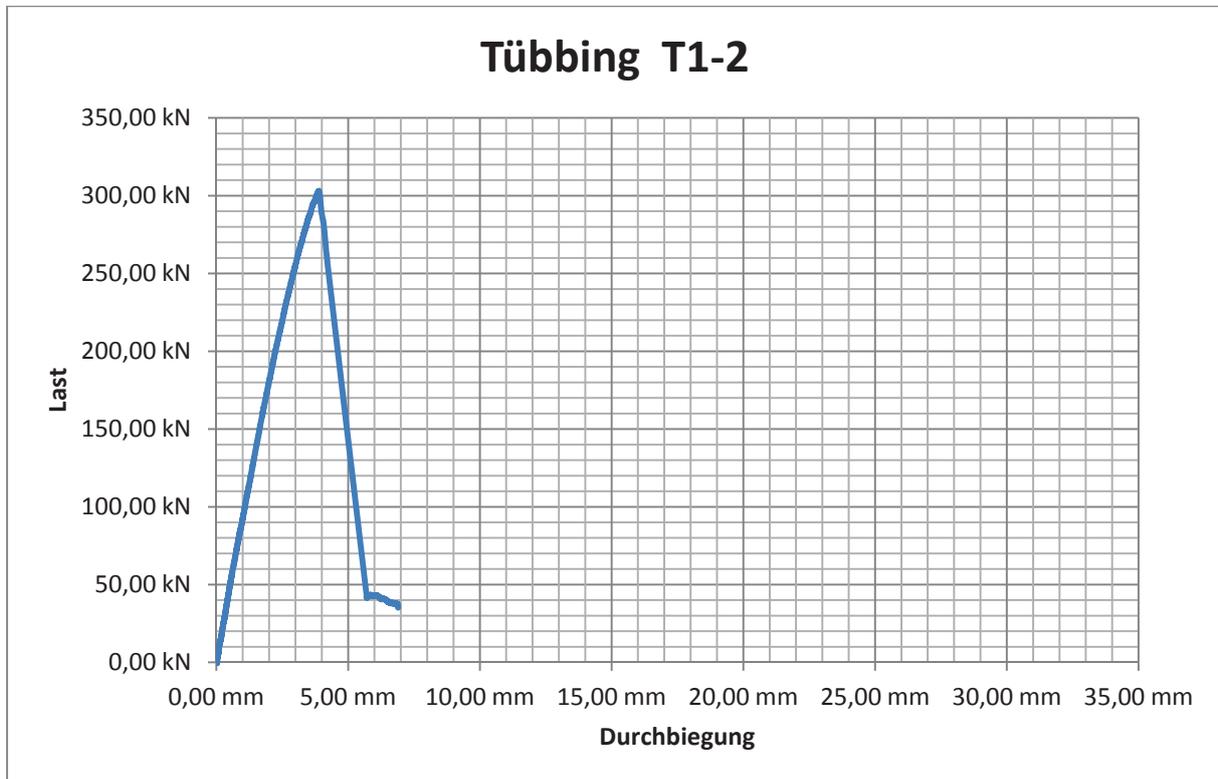


Abbildung 127 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T1-2

Die Arbeitslinie von Tübbing T1-2 (Abbildung 127) war nicht mit der von Tübbing T1-1 vergleichbar. Hier trat kein kontinuierliches, sondern ein plötzliches mit lautem Knall einhergehendes Versagen ein. Das Bruchbild ist in Abbildung 128 zu sehen.



Abbildung 128 Foto des Bruchbildes von Tübbing T1-2

Eine Gemeinsamkeit der beiden Prüfungen war, dass bei beiden Tübbingen der entscheidende Versagensriss vom Druckbereich des Auflagers zum Lasteintrag führte.

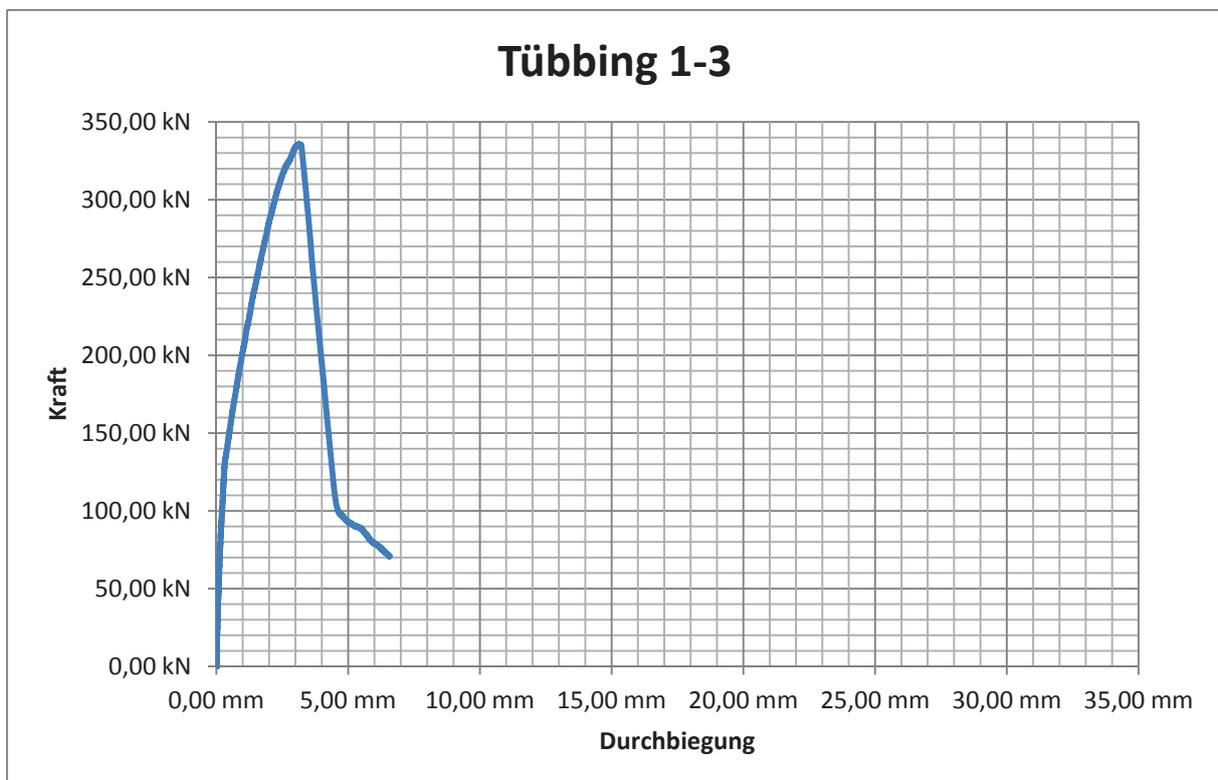


Abbildung 129 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T1-3

Wichtig war beim Versuch des Tübbings T1-3 herauszufinden, welches Versagen signifikant sein würde. Es zeigte sich hier das gleiche Bruchverhalten wie bei Tübbing T1-2.



Abbildung 130 Foto des Bruchbildes von Tübbing T1-3

Nach diesem Versuch wurde beschlossen, die restlichen beiden Tübbinge einer längeren Reifezeit von insgesamt 28 Tagen zu unterziehen, um herauszufinden, ob dieses Bruchverhalten die Folge von unzureichender Festigkeit war.

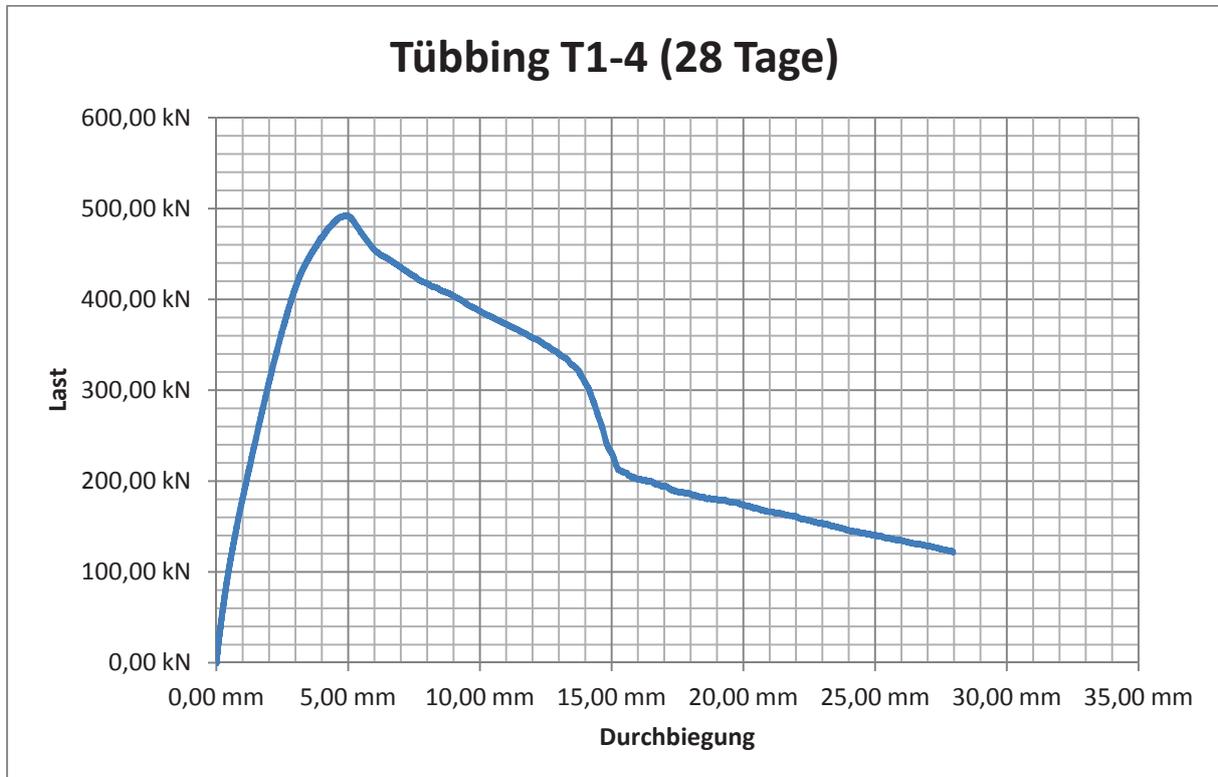


Abbildung 131 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T1-4

Wie sich bei Untersuchung des Tübbings T1-4 zeigte, war anscheinend eine bessere Nachrissfestigkeit des Bauteils gegeben, jedoch war auch hier ein Riss vom Lager zum

Lasteintrag festzustellen. Es muss konstatiert werden, dass durch die längere Reifezeit dieser Riss nicht verhindert werden konnte. Gleichzeitig trat auch ein Quer-Riss durch das Bauteil im mittleren Drittel auf. Zum ersten Mal war ein Versagen im mittleren Bauteildrittel zu sehen, wie es ursprünglich, analog zur äquivalenten Biegezugfestigkeitsprüfung, erwartet worden war.



Abbildung 132 Foto des Bruchbildes von Tübbing T1-4

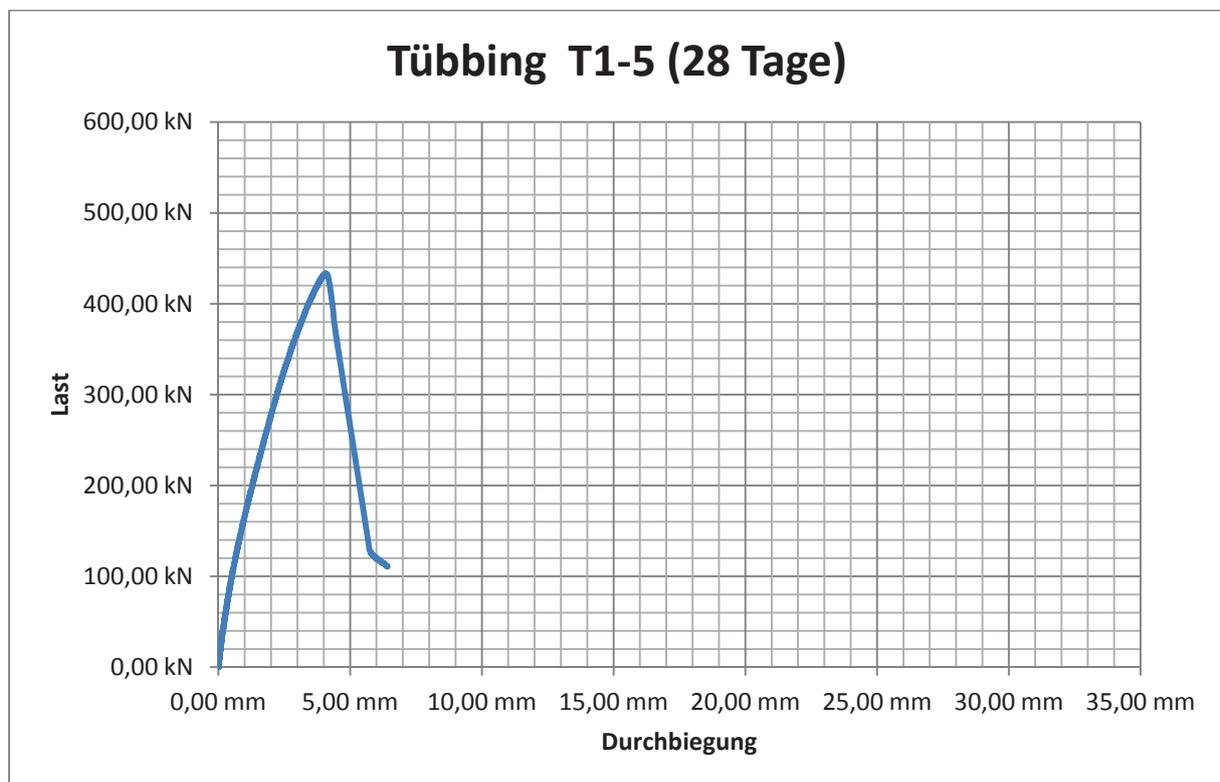


Abbildung 133 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T1-5



Durch die letzte Prüfung dieser Tübbingserie sollte Gewissheit erlangt werden, ob die Nachrissfestigkeit durch eine längere Reifezeit erzwungen werden kann.



Abbildung 134 Foto des Bruchbildes von Tübbing T1-5

Die Ergebnisse des Tübbings T1-5 zeigten, dass die maximale Kraftaufnahme mit längerer Reifezeit, wie zu erwarten war, anstieg, das Auftreten der Rissverläufe aber dennoch gleich blieb.

Zusammenfassend kann nach diesen Versuchen festgehalten werden, dass alle Tübbinge dieser Prüfserie einen Riss vom Auflager in die lasteintragende Rolle ausgebildet hatten, der in der Mehrzahl der Versuche zu einem schlagartigen Versagen der Bauteile führte. Auch eine längere Reifezeit konnte diesen Effekt nicht beheben. Zudem war auffällig, dass dieser Riss immer an dem Auflager passierte, wo sich der Frischbeton-Einguss befand. In diesem Bereich lag stets eine Vorzugsrichtung der Faser in Fließrichtung vor (siehe Messprotokolle im Anhang). Durch die nachfolgenden Untersuchungen mit Tübbingschalung 2 sollte geklärt werden, ob dieses Versagen ein Effekt der Faserorientierung ist.

Zudem ist nach diesen Untersuchungen festzuhalten, dass die Tübbinge mit zwei Ausnahmen, Tübbing T1-1 und Tübbing T1-4, ein schlechtes Nachrissverhalten aufwiesen. Die Arbeitslinie von Tübbing T-1 ist allerdings stark unterschiedlich zu den restlichen Versuchen. Hier wird die maximale Kraft bei einer Durchbiegung von 6 mm aufgenommen, während die anderen Proben diese zwischen 3 mm und 5 mm Durchbiegung erreichen. Auch fielen diese Bauteile dadurch positiv auf, dass es kein schlagartiges Versagen gab sondern sich ein gutes Nachrissverhalten ausbildete.



Bei den Graphen zur Festigkeitsprüfung der Tübbinge T1-1 und T1-3 war ebenfalls festzustellen, dass diese unter Last zwei unterschiedliche Steigungswinkel aufwiesen. Wie bereits bei Versuch T1-1 beschrieben, erinnert dies stark an die Abbildung 12. Das würde bedeuten, dass bei einer Last von ca. 130 kN einen Riss im Beton zu erkennen sein müsste. Die restliche flachere Steigung müsste durch das Ausziehen der Fasern entstanden sein. Dies konnte explizit im Versuch T1-3 nicht festgestellt werden.

Für die drei nach sieben Tagen geprüften Tübbing bleibt festzuhalten, dass diese eine mittlere Maximalkraft 310 kN bei einer mittleren Durchbiegung von 4,38 mm erreicht haben.

6.2 Tübbingschalung 2

In diesem Kapitel werden die Prüfungen von 10 Tübbingen vorgestellt, die mit der „liegenden“ Schalung aus Abbildung 121 produziert wurden. Hier fand die Befüllung ebenfalls über einen mit einem Schieber versehenen Vorratsbehälter statt (s. Abbildung 135 und Abbildung 136)



Abbildung 135 Befüllter Vorratsbehälter

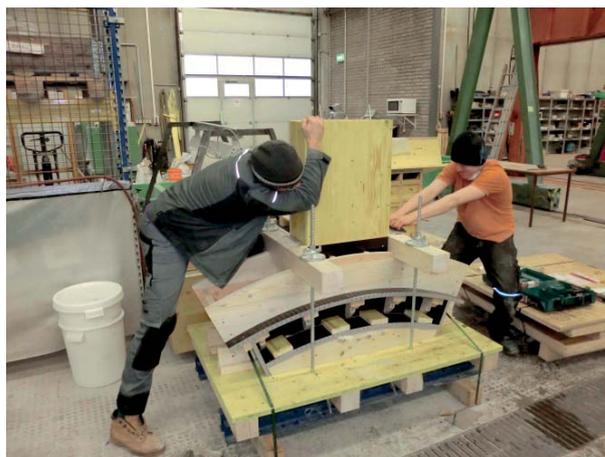


Abbildung 136 Befüllen der „liegenden“ Tübbingschalung 2

Die Tübbinge wurden in zwei Serien unterteilt. Die erste Serie wurde im Alter von sieben Tagen geprüft und besteht aus den Tübbingen T2-1 bis T2-6. Die restlichen Tübbinge wurde im Alter von 28 Tagen der Prüfung unterzogen. Im Folgenden werden für jeden Tübbing die Diagramme der Festigkeitsmessung und darunter eine Fotografie des Tübbings bei Beendigung der Prüfung gezeigt. Auf diesem Foto ist das jeweilige Rissbild der Tübbinge zu sehen.

Nach der Festigkeitsprüfung wurden auch diese Tübbinge zersägt, um mit dem BSM 100 die Faserorientierung messen zu können. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind in den Messprotokollen im Anhang zu finden.

Bei der Prüfung des Tübbings T2-1 ist festzuhalten, dass hier kein plötzliches Lastversagen festzustellen war. Die zum Bruch führende Zone war hier nicht wie in den Versu-



chen mit der Tübbingschalung 1 durch einen Riss vom Lager in die Lasteintragszone gekennzeichnet, sondern durch einen mittigen Quer-Riss. Es ist aber deutlich sichtbar, dass der linke untere Auflagebereich, die Druckzone, eine deutliche Schädigung aufweist und sich ein Riss Richtung Einleitung gebildet hat, dieser aber nicht aufgegangen ist.

Auffällig bei dieser Prüfung war die hohe Durchbiegung, die erreicht werden konnte bis die aufnehmbare Last wieder auf 100 kN gesunken war. Wie in Abbildung 138 deutlich zu sehen ist, hat sich die Bogenform des Tübbings fast in einen Balken umgeformt. Allerdings sollte sich herausstellen, dass dieser Prüftübbing die mit Abstand größte Verformbarkeit aufwies.

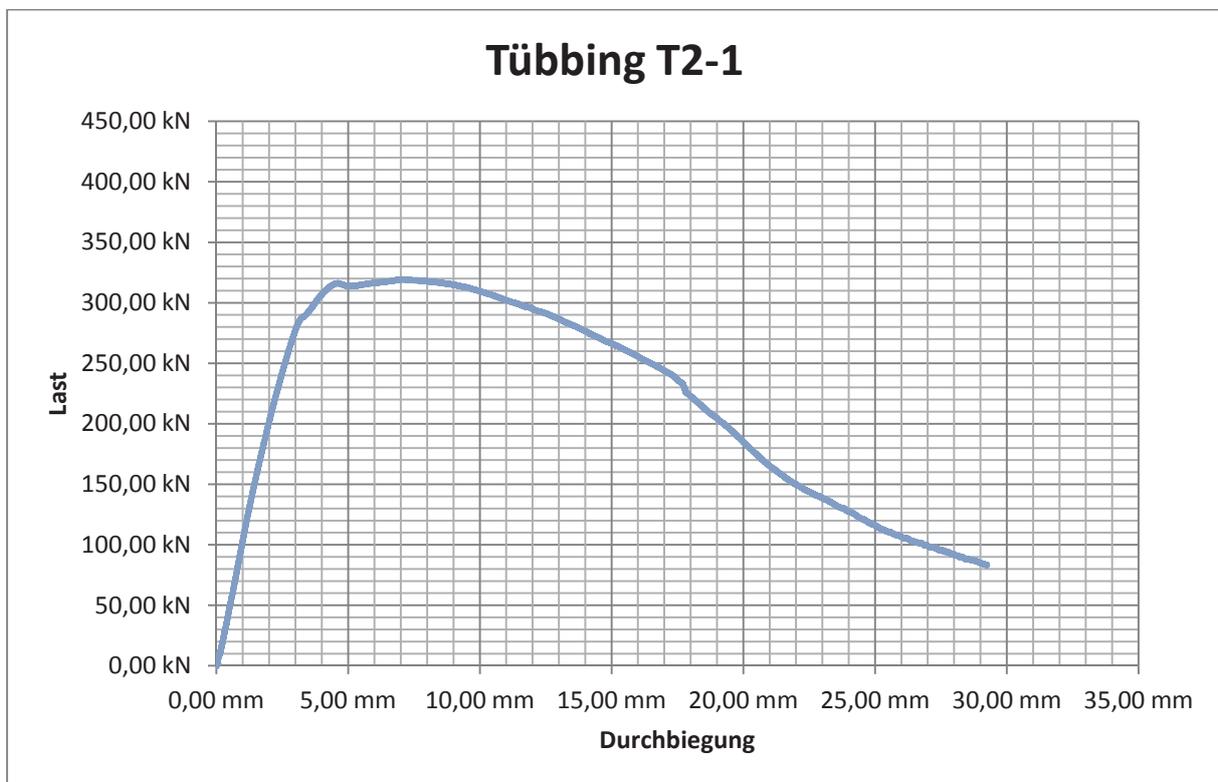


Abbildung 137 Kraft-Dehnungsdiagramm vom Tübbing T2-1



Abbildung 138 Foto des Bruchbildes von Tübbing T2-1

Beim Tübbing T2-2 sind zwei Risse in Richtung Auflager festzustellen. Wobei der Größe vom Auflager in die Bruchzone reicht. Der Abfall von der Maximallast wurde durch das Abbrechen der Scholle zwischen den Einleitungspunkten verursacht. Es ist aber deutlich in Abbildung 139 zu sehen, dass nach dem Abfall noch eine kleine Steigerung der Last möglich war.

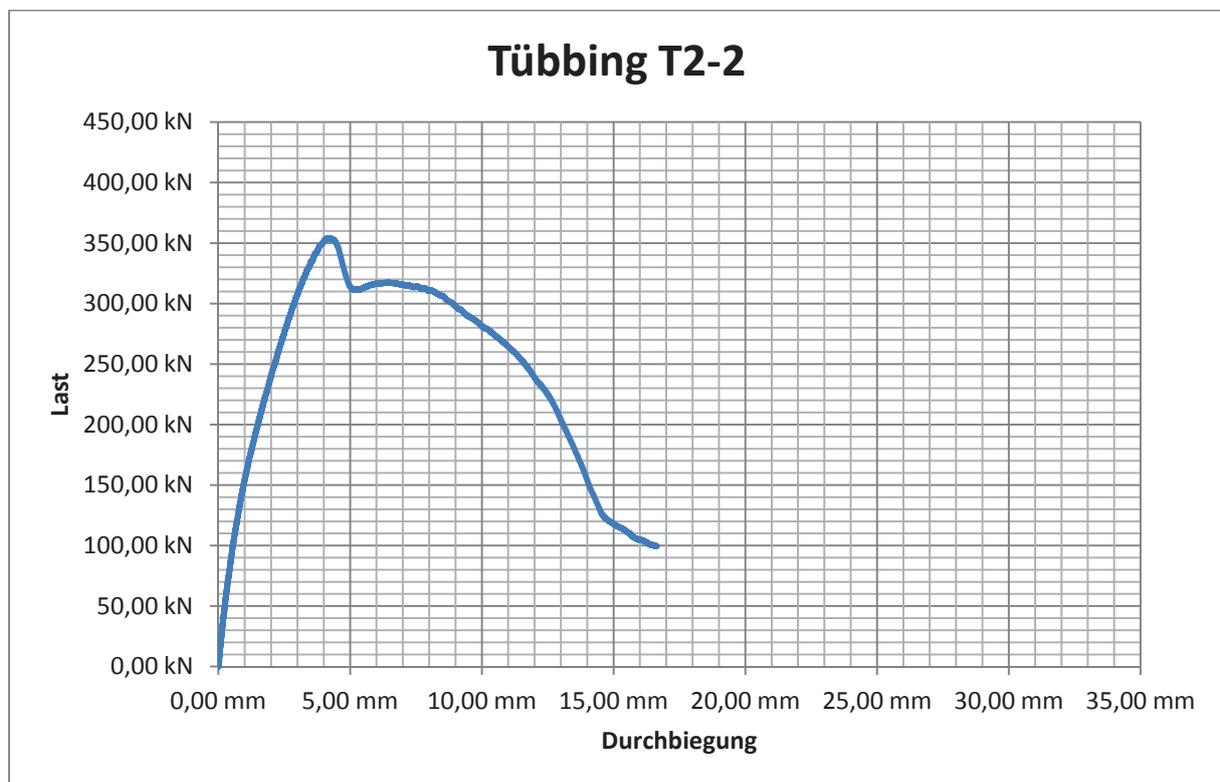


Abbildung 139 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T2-2



Abbildung 140 Foto des Bruchbildes von Tübbing T2-2

Bei Tübbing T2-3 führte wieder ein Riss vom Auflager zum Einleitungspunkt zum entscheidenden Versagen. Allerdings ist es nicht ein Einzelriss sondern eine stark verzweigte Rissfront. Auch ist am Messdiagramm zu sehen, dass zum einen eine hohe Maximallast erreicht wurde, bevor das System kollabierte, zum anderen eine Steigerung der Last nach dem Erstriss festzustellen ist.

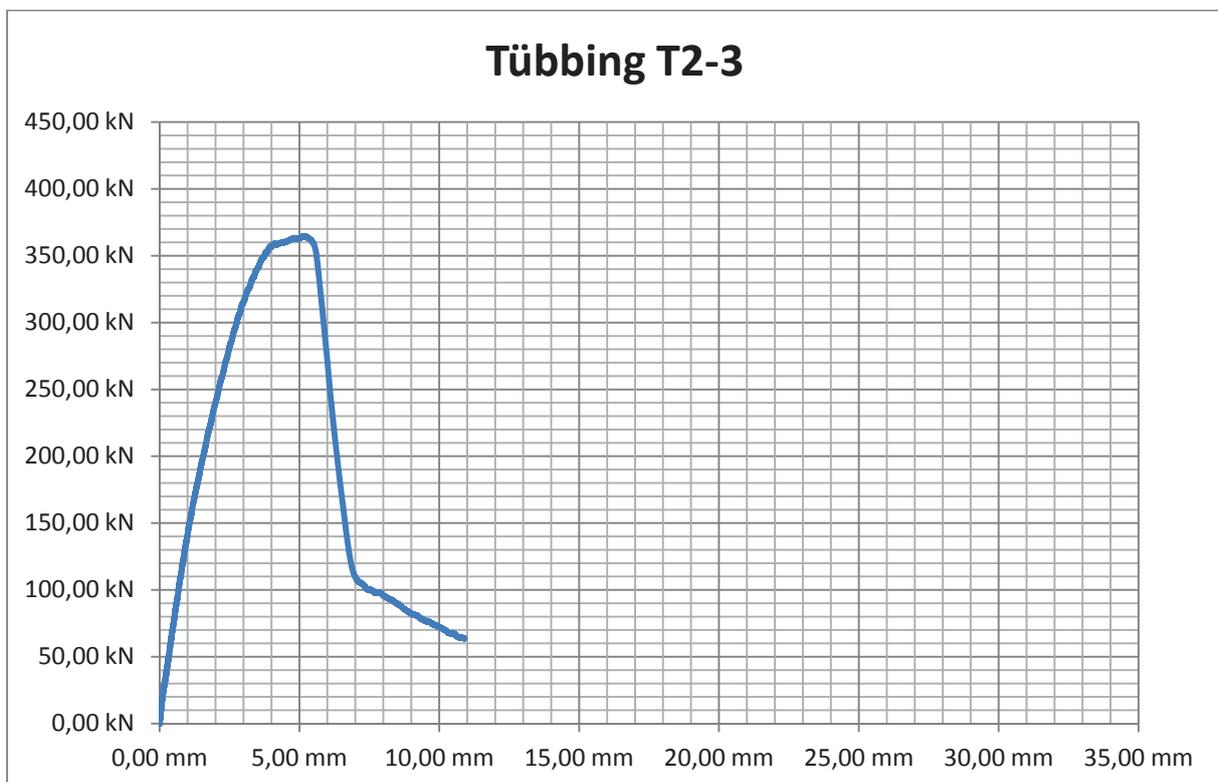


Abbildung 141 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T2-3



Abbildung 142 Foto des Bruchbildes von Tübbing T2-3

Bei Tübbing T2-4 wurde wieder das angestrebte Bruchverhalten erreicht. Die entscheidende Bruchzone war zwischen den Einleitungspunkten festzustellen. Dadurch konnte wieder eine gute Nachrissfestigkeit erreicht werden. Die ermittelten Werte sind vergleichbar mit denen von Tübbing T2-1.

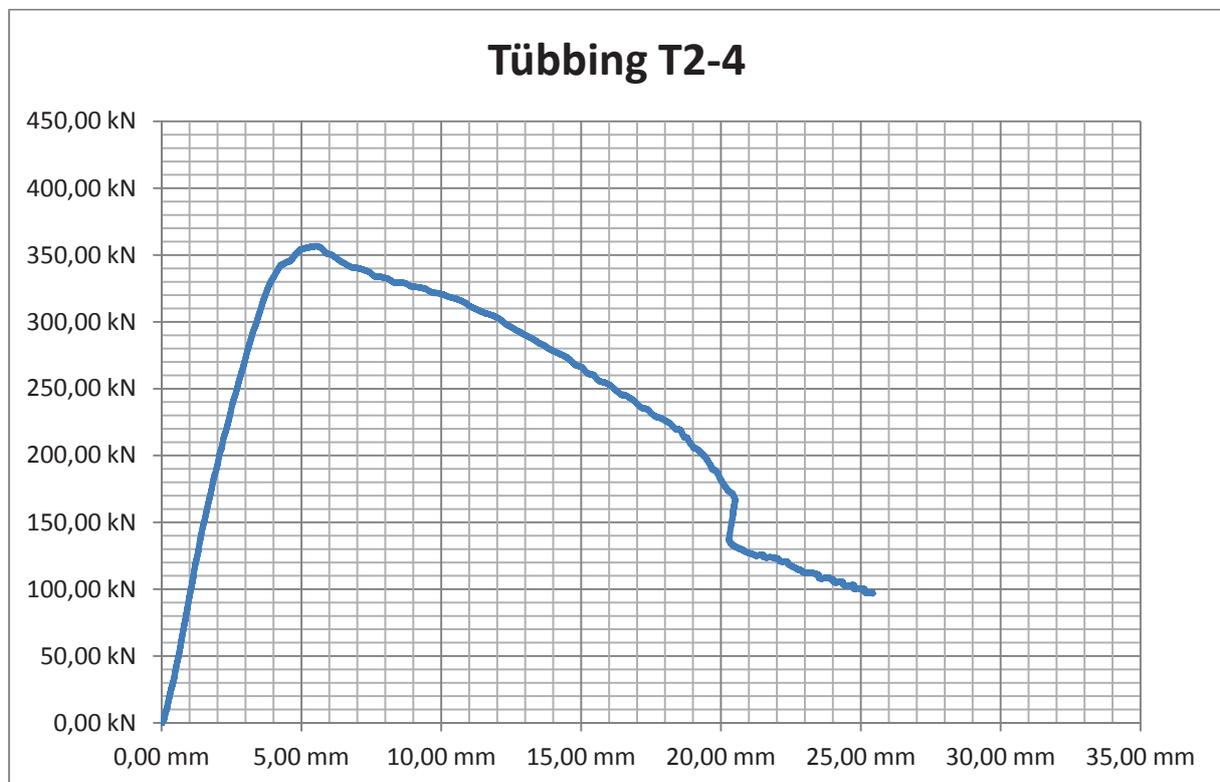


Abbildung 143 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T2-4



Abbildung 144 Foto des Bruchbildes von Tübbing T2-4

Der Tübbing T2-5 erreichte von allen am siebten Tag geprüften Bauteilen die höchste Lastaufnahme. Bestimmend war einmal mehr ein Riss vom Auflager zum rechten Einleitungsbereich. Was bei dieser Prüfung jedoch auffällt, ist, dass sich ebenfalls ein Riss aus der Druckzone des Tübbings in Richtung des linken Druckbereichs gebildet hat. Zudem ist das Versagen nicht so durchschlagend wie bei den Tübbingen aus der Serie 1. Es konnte sich noch eine Durchbiegung von knapp 10 mm ausbilden, bevor die Prüfung abgebrochen wurde.

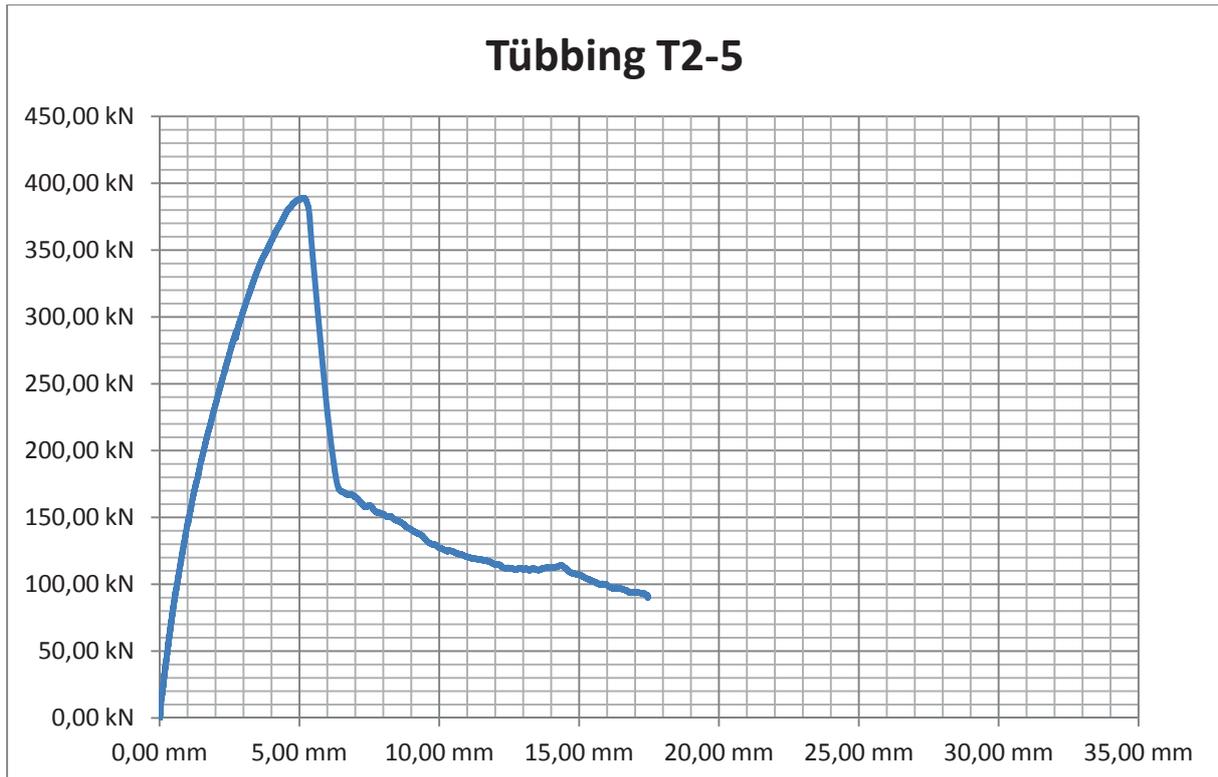


Abbildung 145 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T2-5



Abbildung 146 Foto des Bruchbildes von Tübbing T2-5



Der Tübbing T2-6 zeigte wieder das gewünschte Versagensbild. Die Zone zwischen den Krafteinleitungspunkten war für das Versagen des Bauteils ausschlaggebend. Bei dieser Prüfung war kein durchgängiger Riss vom Auflager zur Lasteintragung festzustellen. Somit war eine gute Tragfähigkeit des Systems nach dem Erstriss erreicht worden.

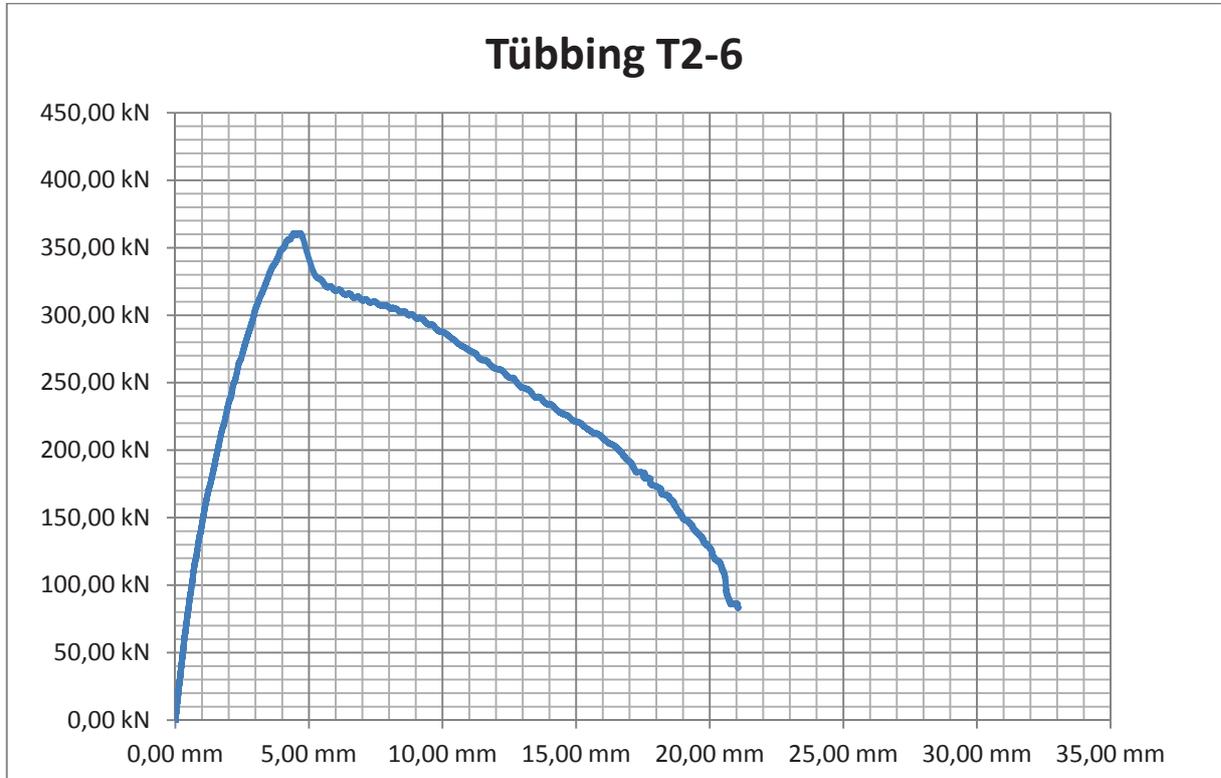


Abbildung 147 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T2-6



Abbildung 148 Foto des Bruchbildes von Tübbing T2-6

Die nun folgende 28-Tage Prüfung des Tübbings T2-7 lieferte erwartungsgemäß eine höhere Festigkeit. Hier trat das Versagen zwischen den Lasteintragsbereichen auf. Das Niveau der Nachrissfestigkeit war hier sehr hoch und ließ erst nach, als sich eine durchgängige Rissfront gebildet hatte.

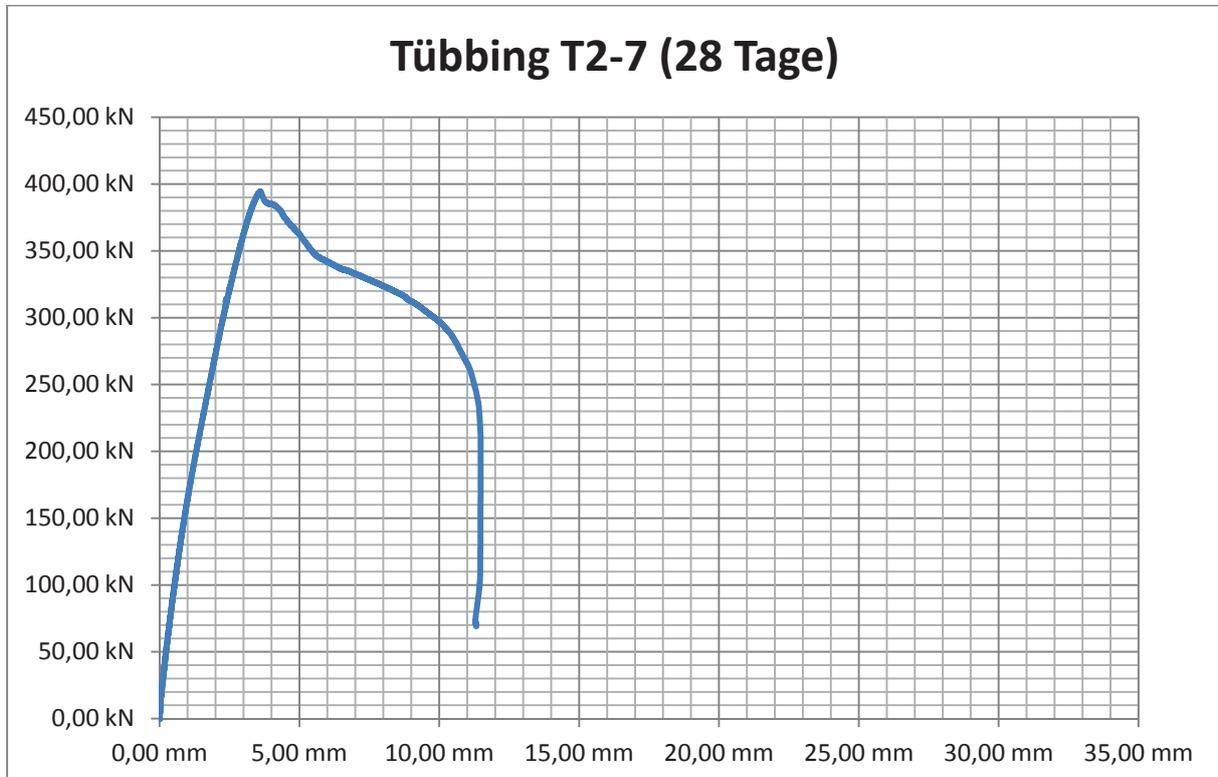


Abbildung 149 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T2-7



Abbildung 150 Foto des Bruchbildes von Tübbing T2-7



Der Tübbing T2-8 brach ebenfalls im gewünschten mittleren Drittel. Auch die Nachrissfestigkeit zeigte ein ähnliches Verhalten wie beim Tübbing T2-7. Dies ist durch das ähnliche Rissverhalten zu erklären, denn auch hier trat kein Riss vom Lager zum Einleitungsbereich auf.

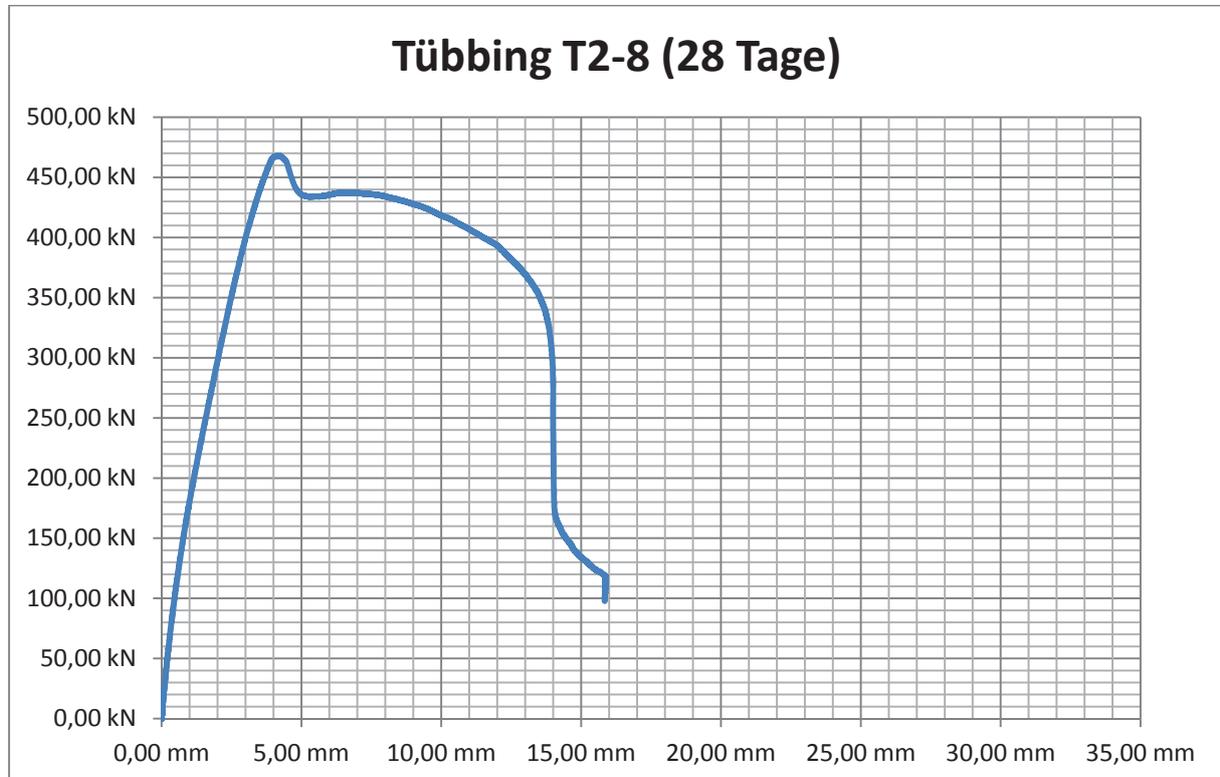


Abbildung 151 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T2-8



Abbildung 152 Foto des Bruchbildes von Tübbing T2-8

Beim Tübbing T2-9 lag eine Vorschädigung vor. Dennoch wurde dieser Tübbing geprüft, um Erkenntnisse darüber zu gewinnen wie sich ein solcher Schaden auf die Festigkeit auswirkt. Auffällig war hier der flachere Anstieg der Kurve und die große Durchbiegung bei maximaler Last. Dieser Kurvenverlauf erinnert sehr stark an die Prüfung des Tübbings T1-1. Sicherlich war das Auftreten der Versagensrissfront in der Mitte durch die Vorschädigung begünstigt worden.

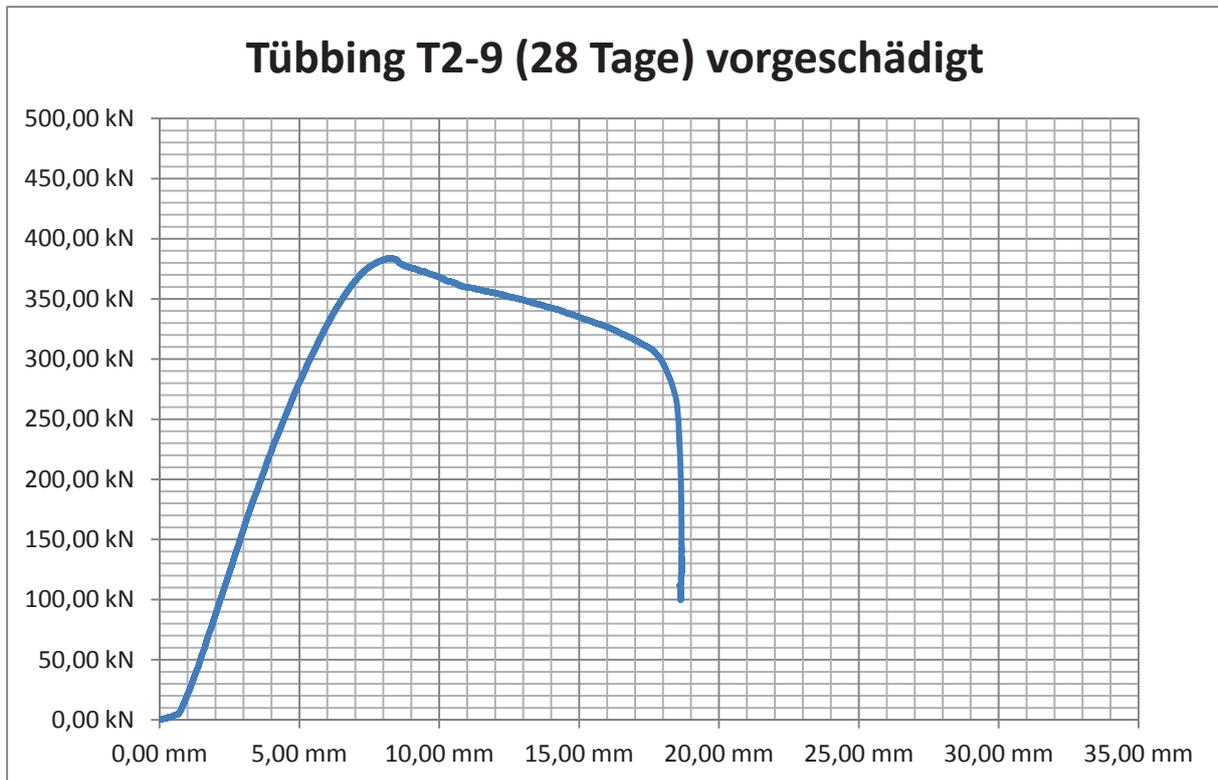


Abbildung 153 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T2-9



Abbildung 154 Vorschädigung des Tübbings T2-9 (Querriss in der Mitte)

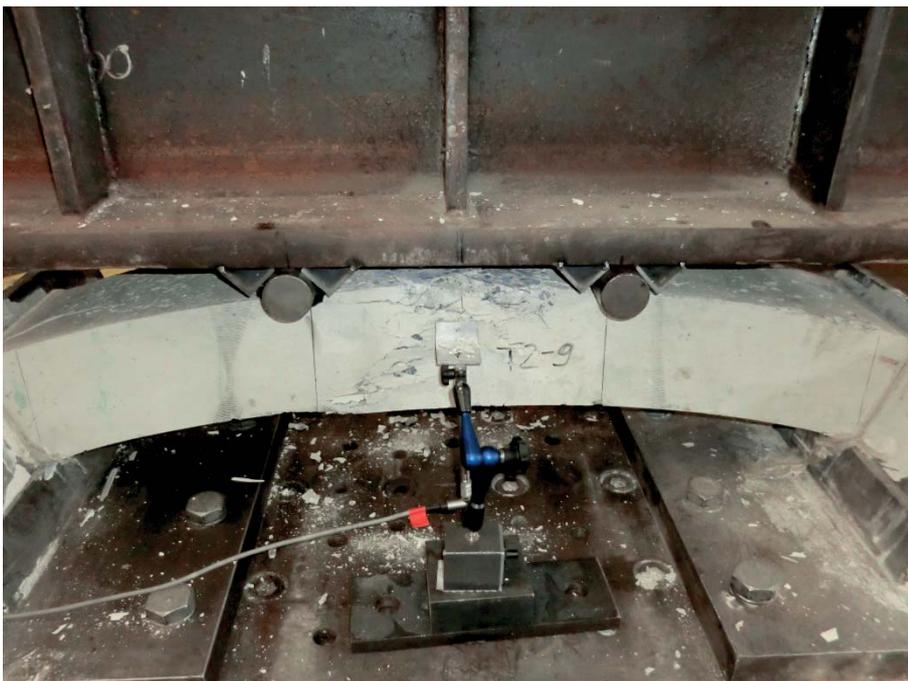


Abbildung 155 Foto des Bruchbildes von Tübbing T2-9

Als letzter Tübbing dieser Serie wurde T2-10 geprüft. Auch hier traten erwartungsgemäß höhere Festigkeiten als bei den vorangegangenen 7-Tage Prüfungen auf. Der Versagensbereich lag auch hier in der Mitte des Bauteils. Eine Rissbildung vom Rand aus war ebenfalls nicht festzustellen.

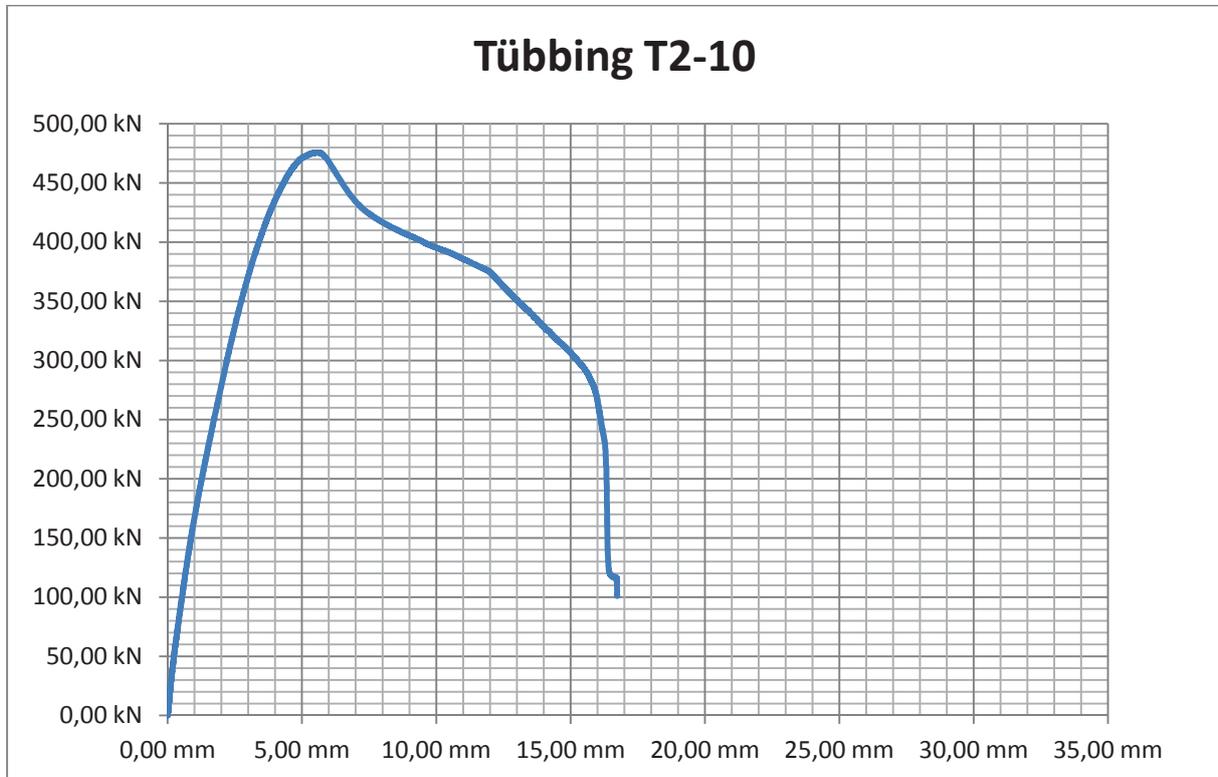


Abbildung 156 Kraft-Dehnungsdiagramm von Tübbing T2-10



Abbildung 157 Foto des Bruchbildes von Tübbing T2-10



Zum Abschluss der Prüfserie „Tübbingschalung 2“ bleibt festzuhalten, dass jeder Tübbing eine Nachrissfestigkeit aufwies. Selbst die Tübbinge T2-3 und T2-5 die durch den Hauptbruch vom Lager weg einen hohen Lastabfall verzeichneten, waren dennoch in der Lage auf niedrigem Niveau Last aufzunehmen und diese durch weitere Durchbiegung zu reduzieren. Dennoch bleibt die Erkenntnis, dass liegend betonierte Tübbinge eher zum gewünschten Versagen im mittleren Drittel neigen.

Eine eindeutige Korrelation zwischen Bruchverhalten und Fasergehalt konnte nicht festgestellt werden. Lediglich beim T2-3 war die Faserorientierung im Würfel 3-6 mit 16,8 % in Y-Richtung deutlich unter den sonst üblichen Werten am Eckwürfel. Dieser Effekt wird als Ursache für den hier auftretenden Riss gesehen.

Bei Tübbing T2-5 lagen die Werte der Faserorientierung im üblichen Bereich. Jedoch wurde hier eine Maximallast erreicht, die ca. 10 % über der mittleren Last der anderen Probekörper lag. Daher ist es denkbar, dass diese hohe Last zu dem schlagartigen Versagen geführt hat. Trotzdem konnte hier der Abfall der Lastaufnahme früher gestoppt und eine deutlich größere Durchbiegung erreicht werden als bei T2-3. Zusätzlich trat bei T2-5 noch ein Riss unterhalb der linken Lasteintragsrolle auf.

In der Abbildung 158 sind alle Lastkurven der Probekörper mit dem Prüfalter von 7 Tagen eingetragen. Hier ist gut zu erkennen, dass alle Probekörper eine Nachrissfestigkeit besaßen.

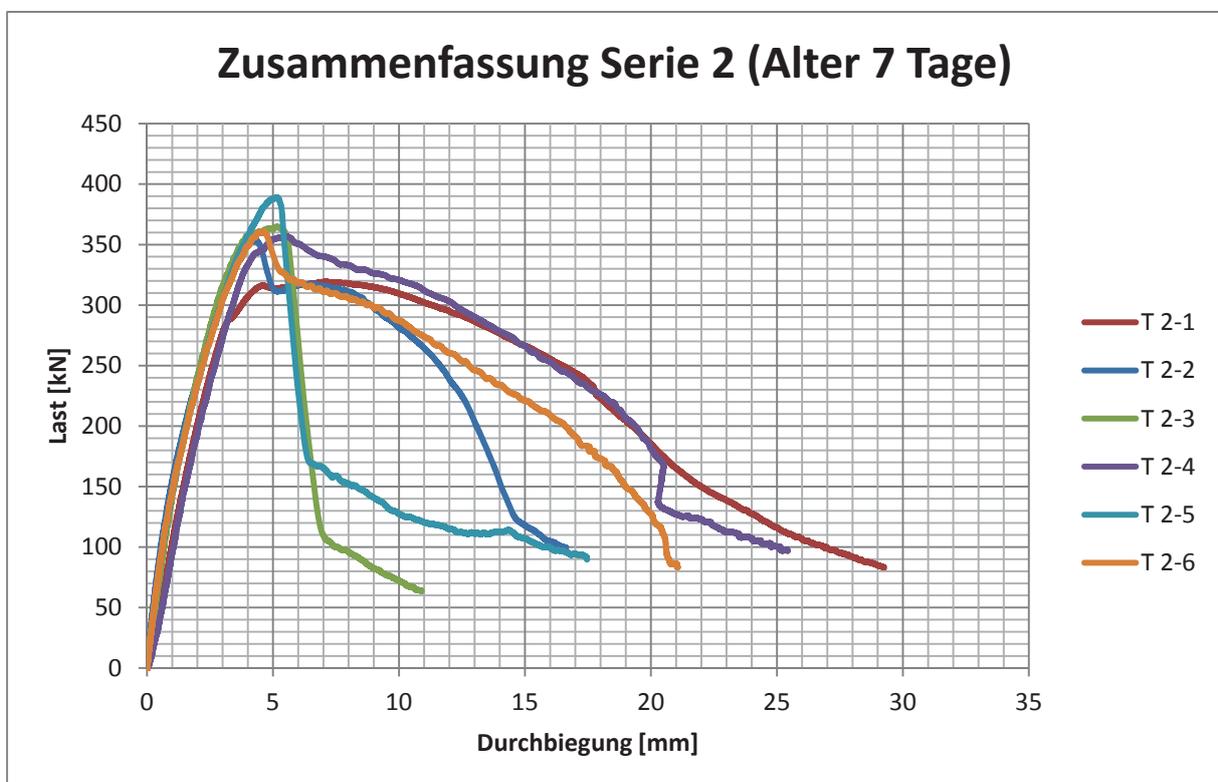


Abbildung 158 Zusammenfassung der Serie 2 – Alter 7 Tage



Wie deutlich zu erkennen ist, gibt es kein einheitliches Nachrissverhalten. Die unterschiedlichen Lastverläufe sind weder durch die Fasermenge noch durch die Faserorientierung zu erklären. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass alle Prüfungen, mit Ausnahme von T2-3 und T2-5, ein gutes Nachrissverhalten aufweisen. Teilweise führten die großen Durchbiegungen dazu, dass die Tübbinge nach der Prüfung schon fast Balken gleichen.

Es scheint eine gewisse Abhängigkeit des Nachrissverhaltens von der Höhe des Erstrisses zu bestehen. Die zwei Tübbinge mit der höchsten Erstriss-Festigkeit (T2-3 und T2-5) zeigten ein mäßiges Nachrissverhalten.

Ein anderes Bild zeigt sich, wenn man sich die Zusammenfassung für die 28 Tage alten Prüfkörper in Abbildung 159 ansieht. Hier haben alle Prüfkörper, selbst der Tübbing mit Vorschädigung, ein gutes Nachrissverhalten. Zudem ist auffällig, dass nicht mehr so hohe Durchbiegungen wie mit den Tübbingen, die nach sieben Tagen geprüft wurden, zu erreichen waren. Außerdem fällt auf, dass diese Tübbinge beim Erreichen ihrer maximalen Dehnbarkeit plötzlich versagen. Dies ist durch die vertikalen Lastabfälle am Ende der Kurven zu sehen.

Der vorgeschädigte Tübbing T2-9 zeichnet sich durch eine stärkere Dehnung während des Lastauftrages aus. Seine maximal aufnehmbare Last liegt erstaunlicherweise nicht einmal sehr viel niedriger als die der anderen Tübbinge. Auch das Nachrissverhalten ist ebenfalls gut mit den unbeschädigten Proben vergleichbar.

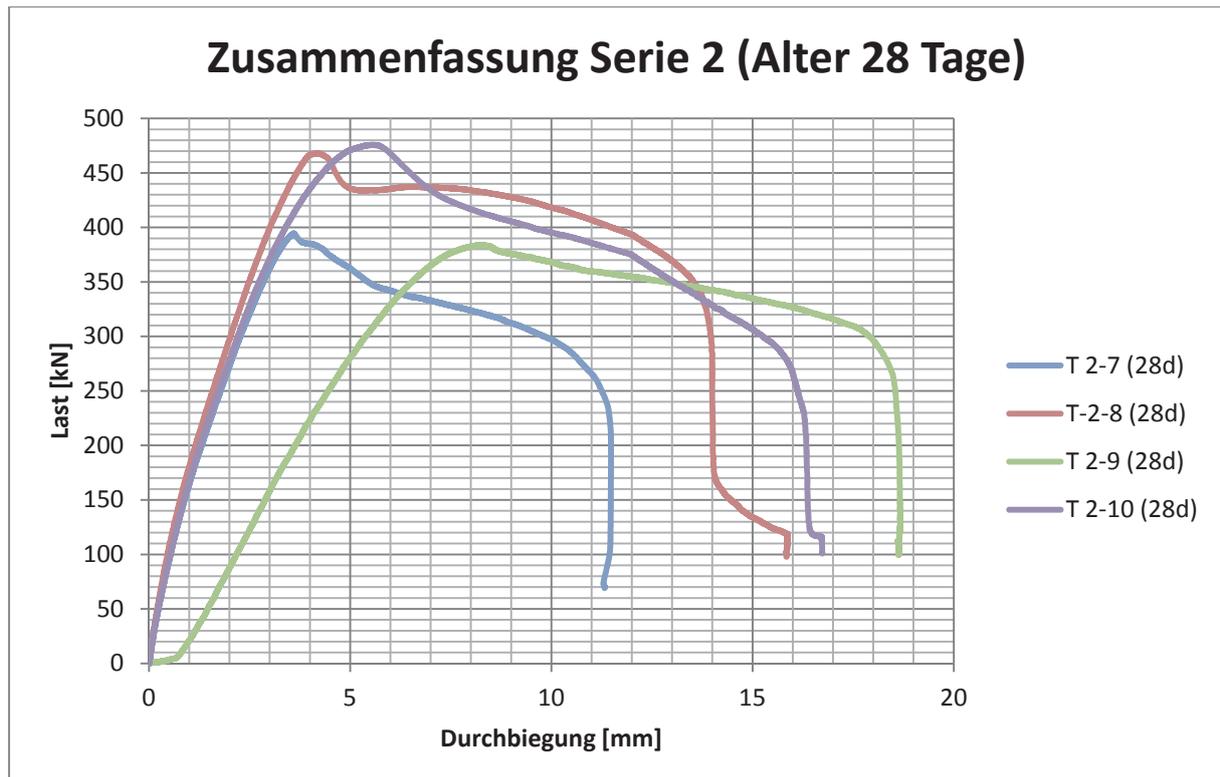


Abbildung 159 Zusammenfassung der Serie 2 – Alter 28 Tage

Abschließend kann man durchaus feststellen, dass die Produktionsweise der Tübbingserie 2 gute Werte lieferte.

6.3 Zusammenfassung und Resümee

In diesem Kapitel wurden Tübbinge mit der SCC-Rezeptur aus Kapitel 4 und 65 kg/m^3 Stahldrahtfasern der Firma KrampeHarex vom Typ DE 60/1,0 N in zwei unterschiedlichen Produktionsverfahren hergestellt. Ziel dieser Versuche war es, herauszufinden, welche Produktionsweise die geeignetere für die Tübbingproduktion ist. Aus den vorangegangenen Versuchen hatte sich das Befüllen der Schalungen über Vorratsbehälter mit Schieberöffnung als bestmögliche Art der Befüllung gezeigt, weshalb dieses Verfahren hier ausschließlich zum Einsatz kam.

Anhand der Festigkeitsprüfung zeigte sich, dass die mit der Tübbingschalung 2 (mittiger Einguss) liegend produzierten Probekörper im Mittel eine ca. 15% höhere Maximallast aushielten und eine ca. 20% höhere Dehnung in diesem Punkt aufwiesen. Auch war erwartungsgemäß bei den Tübbingen aus der Serie 1 einheitlich festzustellen, dass sich die Faserorientierung am Einfüllort mit Hauptorientierung in Fließrichtung negativ auf den Belastungsfall im Einbauzustand auswirkte. Im Allgemeinen trat hier der Riss auf, der zum schlagartigen Versagen führte.

Dieses charakteristische Versagen war in der Serie 2 die Ausnahme. Lediglich ein Tübbing dieser Serie besaß ausschließlich diesen Rissverlauf. Allerdings trat hier kein



schlagartiges Versagen wie in der Serie 1 auf. Die niedrige Faserorientierung in y-Achse am Randbereich wurde als maßgeblicher Einfluss, der zu diesem Verhalten geführt hatte, identifiziert.

In beiden Versuchsserien war jeweils ein Probekörper vorhanden, der durch seinen flachen Anstieg des Graphen im Belastungsfall auffiel. Dies war zum einen der Tübbing T1-1 und zum anderen der Tübbing T2-9. Allerdings ist nur von Tübbing T2-9 die Vorschädigung dokumentiert worden. Es ist nach diesen Versuchen aber davon auszugehen, dass auch bei Tübbing T1-1 eine Vorschädigung bestanden haben muss, die allerdings nicht bemerkt wurde.

Was diese Versuche ebenfalls gezeigt haben, ist das eine Verlängerung der Reifezeit von 7 auf 28 Tagen nicht automatisch dieselbe Steigerung der Maximallast bringt wie es die Erhöhung der Druckfestigkeit bei der Erstprüfung vermuten ließ. So war bei der Erstprüfung des Betons ein Zuwachs der Druckfestigkeit von ca. 30% festzustellen. Im Gegensatz dazu war bei der Serie 1 die maximal aufzunehmende Last bei den 28 Tage alten Probekörpern um ca. 50% größer und bei der Serie 2 nur um ca. 25 %.

Bei allen Versuchen, unabhängig von der Herstellung, konnte eine Vorzugsrichtung der Fasern in Fließrichtung festgestellt werden (siehe Tabelle 43). Anders als bei den Balken konnte in der Serie 2 keine gehäufte Fasermenge in der Mitte des Probekörpers gemessen werden. Damit konnte bestätigt werden, dass dies ein Effekt der Probekörpergröße war.

Tabelle 43 Messwerte der Faserorientierung in Fließrichtung und kumulierte Fasergehalte mit Faserdosierung von 65 kg/m³(Kleintübbingserie)

Proben	Faserorientierung in Fließrichtung					
	Fasergehalt					
	Würfel 1	Würfel 2	Würfel 3	Würfel 4	Würfel 5	Würfel 6
T1-1	45%	52%	52%	52%	53%	39%
	64 kg/m ³	83 kg/m ³	67 kg/m ³	75 kg/m ³	55 kg/m ³	46 kg/m ³
T1-2	53%	57%	58%	52%	52%	28%
	49 kg/m ³	83 kg/m ³	63 kg/m ³	64 kg/m ³	58 kg/m ³	73 kg/m ³
T1-3	52%	47%	50%	51%	50%	42%
	46 kg/m ³	63 kg/m ³	88 kg/m ³	88 kg/m ³	58 kg/m ³	48 kg/m ³
T1-4	49%	56%	nicht	58%	51%	nicht
	56 kg/m ³	53 kg/m ³	messbar	79 kg/m ³	72 kg/m ³	messbar
T1-5	61%	61%	61%	55%	51%	40%
	55 kg/m ³	68 kg/m ³	66 kg/m ³	66 kg/m ³	69 kg/m ³	68 kg/m ³
T2-1	42%	56%	60%	57%	54%	38%
	63 kg/m ³	67 kg/m ³	55 kg/m ³	62 kg/m ³	72 kg/m ³	72 kg/m ³
T2-2	37%	67%	nicht	nicht	68%	51%
	83 kg/m ³	56 kg/m ³	messbar	messbar	50 kg/m ³	71 kg/m ³
T2-3	33%	57%	62%	48%	nicht	53%
	80 kg/m ³	76 kg/m ³	55 kg/m ³	82 kg/m ³	messbar	83 kg/m ³
T2-4	46%	58%	60%	nicht	57%	51%
	64 kg/m ³	69 kg/m ³	61 kg/m ³	messbar	69 kg/m ³	62 kg/m ³
T2-5	49%	58%	61%	62%	60%	44%
	87 kg/m ³	71 kg/m ³	55 kg/m ³	53 kg/m ³	53 kg/m ³	70 kg/m ³
T2-6	52%	56%	nicht	nicht	61%	54%
	84 kg/m ³	78 kg/m ³	messbar	messbar	59 kg/m ³	65 kg/m ³
T2-7	45%	57%	nicht	57%	56%	35%
	63 kg/m ³	65 kg/m ³	messbar	64 kg/m ³	67 kg/m ³	67 kg/m ³
T2-8	46%	63%	58%	50%	55%	38%
	65 kg/m ³	64 kg/m ³	63 kg/m ³	66 kg/m ³	67 kg/m ³	65 kg/m ³
T2-9	32%	51%	46%	46%	57%	37%
	59 kg/m ³	65 kg/m ³	69 kg/m ³	69 kg/m ³	62 kg/m ³	66 kg/m ³
T2-10	35%	64%	nicht	nicht	62%	32%
	67 kg/m ³	63 kg/m ³	messbar	messbar	65 kg/m ³	66 kg/m ³

Für zukünftige Produktion von reinfaserbewehrten Tübbingem mit selbstverdichtendem Beton ist eindeutig die Produktionsweise nach der Serie 2 zu wählen.

7 Großtübbinge

Ziel der Versuche war es, den Beweis zu erbringen, dass ein SCC mit SupraCem 45 in einem Transportbetonwerk problemlos herzustellen ist. Weiters sollte gezeigt werden, dass im Anschluss daran in einer benachbarten Produktionshalle eine Tübblingproduktion realisierbar ist. Die Produktion der Tübbinge fand in einer Feldfabrik in Zams statt. Hier wurden auch die Tübbinge für den Druckstollen Kaunertal gefertigt. Diese Produktionsstätte war für diesen Versuch optimal geeignet, da das Transportbetonwerk TBA Zams in unmittelbarer Nähe lag und über nicht öffentliche Wege schnell erreichbar war. Dort wurden für dieses Projekt zwei Betonagen ermöglicht.

Da die Zusage zur Betonage erst 10 Tage vor dem Termin gegeben wurde, kam lediglich die vorhandene Einrichtung zur Anwendung und es wurde auf eine produktionsoptimierte Befüllung der Tübbinge verzichtet. Da auch eine Anlieferung mit der Gesteinskörnung aus den Versuchen nicht möglich war, wurde die Vorbereitungszeit dazu genutzt, mit den Gesteinskörnungen des Transportwerks eine angepasste neue Rezeptur zu erstellen. Diese ist in Tabelle 44 aufgeführt.

Tabelle 44 SCC Rezeptur für Betonage in Zams

AUSGANGSSTOFFE					
Stoff	Art	Hersteller	Gesteinskörnung	Art	Hersteller/Lieferant
Zement 1	SC 45	Schretter & Cie	0 / 4 mm	Sand	TBA Zams
Zusatzstoff 1	Hydraulit M	Schretter & Cie	4 / 8 mm	Splitt	TBA Zams
Zusatzmittel 1	C 323 Mix	BASF	8 / 16 mm	Splitt	TBA Zams
Zusatzmittel 2	Weinsäure	Jungbunzlauer			
STOFFRAUMRECHNUNG					
Gewählter w/z_{eq} -Wert	0,46			Dichte t/m^3	Stoffraum in dm^3/m^3
Wasser- incl. Zusatzmittelgehalt w_{eff}			226 kg/m^3		226
Zementgehalt 1			420 kg/m^3	: 2,960	142
Zusatzstoffgehalt 1	k-Wert 0,8		90 kg/m^3	: 2,630	34
anrechenbarer Zusatzstoffgeh.	$f = 0,25 \times CEM$		90 kg/m^3	 	
Luftporengehalt			1 Vol.-%	(x10)	10
Erforderlicher Zuschlaggehalt			1653 kg/m^3	 	588
Zusammensetzung für: 1,000 m^3					
Gesteinskörnung	Anteil Vol.-%	Stoffraum dm^3/m^3	Kornrohddichte kg/dm^3	Masse (GK trocken)	
0/4 mm Sand	40,0%	235	2,810	661 kg/m^3	
4/8 mm Splitt	30,0%	176	2,810	496 kg/m^3	
8/16 mm Splitt	30,0%	176	2,810	496 kg/m^3	
Summe	100,0%	580	 	1653 kg/m^3	
Zement 1 : SC 45					420 kg/m^3
Zusatzstoff 1: Hydralit M					100 kg/m^3
Wasser $_{eff}$. + Kernfeuchte:					226 kg/m^3
ZM1 : C 323 Mix	0,68 M.-% vom Zementgehalt				2,86 kg/m^3
ZM2 : Weinsäure	0,30 M.-% vom Zementgehalt				1,26 kg/m^3
Sollwert Frischbetonmasse (theoretisch)					2393 kg/m^3

Mit den verfügbaren Gesteinskörnungen war eine 4/8-Ausfallkörnung auf Grund des hohen Feinanteils des Sandes nur bedingt möglich. Deshalb wurde bei dieser Mischung die Zugabe des AHWZs um 10 % reduziert. Die Kornverteilung der Gesteinskörnung (Tabelle 45) und die verwendete Sieblinie (Abbildung 160) sind im Folgenden zu sehen.

Tabelle 45 Kornverteilung der Gesteinskörnung TBA Zams

Gesteinskörnungen			Kornverteilung, Siebweite [mm]									
			0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Art	Hersteller/Lieferant		Durchgang, M.-%									
0 / 4 mm	Sand	TBA Zams	13,1	18,8	26,9	39,3	63,8	99,6	100,0	100,0	100,0	100,0
4 / 8 mm	Splitt	TBA Zams	0,4				0,5	10,5	98,6	100,0	100,0	100,0
8 / 16 mm	Splitt	TBA Zams	0,8						3,1	29,3	100,0	100,0

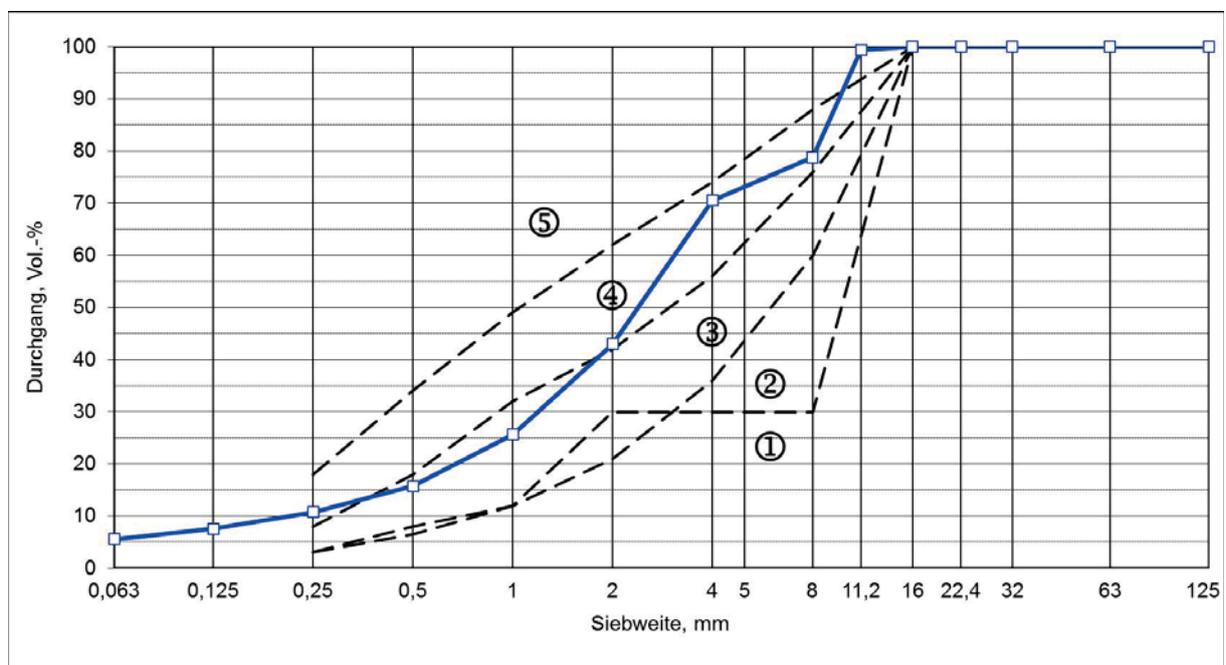


Abbildung 160 Sieblinie des SCC's für Tübbinproduktion in Zams

Mit diesem Beton wurde nur eine reduzierte Erstprüfung durchgeführt. In dieser wurden neben dem Setzfließmaß und der Frischbetonrohddichte lediglich die Druckfestigkeit und das E-Modul geprüft. Die Ergebnisse der Erstprüfung sind in Tabelle 46 zusammengefasst.

Tabelle 46 Ergebnisse der Erstprüfung „SCC Zams“

Setzfließmaß	730 mm
Rohdichte	2,419 t/m ³
Druckfestigkeit	
Alter	
6 Stunden	11,3 MPa
8 Stunden	12,6 MPa
7 Tage	42,2 MPa
28 Tage	51,0 MPa
E-Modul nach 28 Tagen	29790 N/mm ²

Die Spaltzugfestigkeit des Betons wurde nicht geprüft, da die Bauteile auf Grund der Temperaturmessung länger in der Schalung blieben und erst nach 24 Stunden ausgeschalt wurden. Da die Druckfestigkeit nach 6 Stunden vergleichbar hoch ist wie beim Beton aus Kapitel 4.3, ist davon auszugehen, dass auch dieser Beton ähnliche Zugfestigkeiten besitzt und es möglich gewesen wäre, nach fünf Stunden auszuschalen.

7.1 Betonage

Für die Versuchsbetonage wurde bereits einige Tage vorher Zement, Fasern, Verzögerer und Fließmittel zur Mischanlage geschickt. Am Tag des Versuches wurde die Rezeptur in die Mischanlagensteuerung eingegeben und der Zementbunker mit als Sackware geliefertem SupraCem 45 gefüllt. Um eine optimale Verzögerung zu garantieren, wurde der pulverförmige Verzögerer in den Wassertank mit der bereits abgewogenen Wassermenge gegeben und aufgelöst. Das Fließmittel wurde im Labor abgewogen und nach 20 Sekunden Mischzeit hinzugegeben. Die 1,5 m³ SCC wurde zwei Minuten lang im Wellenmischer gemischt bevor sie in den Transportmischer abgelassen wurden.

Die Fasern wurden im Anschluss händisch in den Transportmischer zugegeben. Der gesamte faserhaltige SCC wurde für fünf Minuten bei höchster Stufe im Fahrmischer gemischt und anschließend zur Feldfabrik geliefert.

Dort wurde der Beton in einen Transportkübel gefüllt. Hier zeigte sich die gute Fließeigenschaft des Betons zum ersten Mal. Nach Befüllen des Betonkübels wurde der LKW zur umgehenden Reinigung der Trommel zur Mischanlage zurück geschickt.

Mit Hilfe eines Lastenkrans wurde der Betonkübel über die Schalung gebracht und der Beton in die Schalung gefüllt. Um das von der Mannschaft befürchtete Überschwappen des Betons zu verhindern, wurde die Schalung nur langsam aber kontinuierlich befüllt. Dies ist in Abbildung 161 und Abbildung 162 zu sehen.



Abbildung 161 Befüllen der Schalung (1/2)



Abbildung 162 Befüllen der Schalung (2/2)

Abbildung 161 zeigt, dass die Trichteröffnung etwa nur halb so breit wie der Tübbing war. Der Beton machte während des Befüllvorgangs einen guten und stabilen Eindruck. Dennoch forderten die Arbeiter der Feldfabrik den 2. SCC ein wenig steifer zu liefern, da er ihnen zu dünn erschien. Um einen zweiten Tübbing produzieren zu können wurde diesem Wunsch stattgegeben und die Fließmitteldosierung von 0,68 % auf 0,52 % reduziert. Dieser Beton erreichte ein Setzfließmaß von 650 mm.

Durch diese Rezepturveränderung war es nun auch möglich, den beschriebenen Effekt von steiferen Rezepturen aus Kapitel 5.3.1 im größeren Maßstab zu wiederholen und zu reproduzieren.

Die Produktion des zweiten Tübbings verlief ebenfalls problemlos. Die etwas steifere Konsistenz zeigte während der Betonage keine Auffälligkeiten. Auch war das Ausschalen am nächsten Tag sowie das Abheben mit der Vakuum-Hebevorrichtung, wie in Abbildung 163 zu sehen ist, kein Problem. Dies war nicht vorhersehbar, da sich, wie zu erwarten war, an der Konterschaltung Luftblasen gefangen hatten und daher die Oberfläche rauer war als normalerweise üblich. Dieser Effekt der Porenbildung kann aber durch saugende Oberflächen auf der Konterschaltung minimiert werden.



Abbildung 163 Ausschalen des Tübbings



Zum Abschluss der Versuchsbetonage bleibt festzuhalten, dass erfolgreich gezeigt werden konnte, dass sich Betone mit SupraCem 45 in üblichen Transportbetonanlagen verarbeiten lassen und es keine Probleme mit der Reinigung gibt. Kurze Transportwege lassen sich problemlos mit einem üblichen Fahrmischer bewältigen. Auch hier gab es keine Probleme mit der Reinigung nach dem Transport. Verschleppungen nach dem Versuch waren weder bei Mischer noch beim Fahrmischer festzustellen. Die Reinigungsarbeiten entsprachen in beiden Fällen einer standardmäßigen Prozedur und stellten keinen Mehraufwand dar.

Selbst die Mannschaft der Feldfabrik war positiv überrascht, dass man Tübbinge auch ohne Rütteln herstellen kann. Lediglich das übliche Verreiben der Oberfläche beim angesteiften Beton war in diesem Fall durch die Schnelligkeit des SupraCem 45 nicht möglich. Mir wurde versichert, dass man sich eine zukünftige Produktion mit solchem Beton gut vorstellen könnte.

Somit konnten die Ziele, die mit diesem Versuch verbunden waren, alle erreicht werden.

7.2 Prüfung

Nach der Betonage der Tübbinge wurde die Temperaturentwicklung eines Bauteils an drei Stellen und die der Umgebungstemperatur gemessen. Mit dieser Messung sollte belegt werden, dass dieser Beton nach Richtlinie „Tübbingsysteme aus Beton“ des ÖBBVs von 2009 verwendet werden kann und daher die Expositionsklassen nach ÖNORM B 4710-1 NAD 10 Anwendungen finden. Somit konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die Aussage aus Kapitel 4.3.1, bezüglich der Hydratationswärmeentwicklung im Bauteil, richtig war. Das Messergebnis dieser Prüfung ist in Abbildung 164 wiedergegeben.

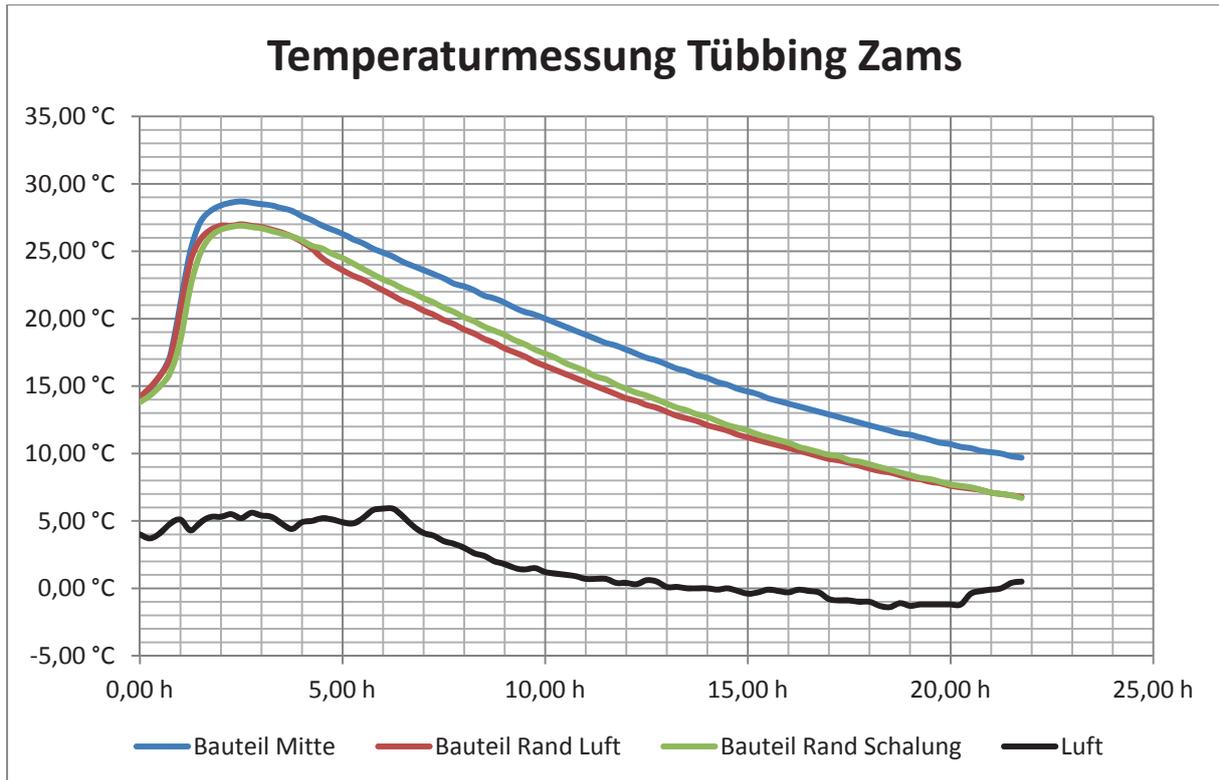


Abbildung 164 Temperaturmessung im Tübbing Zams I

Nach dem Ausschalen wurden die beiden Tübbinge mit dem Lastenkran ins Freilager gebracht. Von dort wurden sie mit einem LKW mit Ladekran an die Universität Innsbruck gebracht und abgeladen. Dieser Vorgang ist in Abbildung 165 zu sehen.



Abbildung 165 Abladen der Tübbinge

An diesen Tübbingen sollte die Faserorientierung mit Hilfe von Bohrkernen ermittelt werden. Da bei diesen Bauteilen zwei unterschiedliche Konsistenten zum Einsatz kamen, war vor Allem das Faserverhalten am Randbereich interessant. Wie bereits in Ka-

pitel 5.3.1 festgestellt wurde, war damit zu rechnen, dass in Tübbing „Zams II“ das Rückstauen von „aufstehenden“ Fasern deutlicher zu sehen sein würde als in Tübbing „Zams I“. Da bei dieser Produktion kein Band-Anguss-Verfahren zum Einsatz kam, war zu erwarten, dass außerhalb des Eingussbereiches eine Dehnströmung herrschen würde, welche zu einer Verringerung der Faserorientierung in Fließrichtung führt. Dieser Effekt sollte etwa auf Höhe der halben Fließstrecke am größten sein. Aus diesem Grund wurden die Bohrkernbezeichnungen 1-8 und 2-7 entnommen. Die Nomenklatur der Bohrkernbezeichnung ist der Abbildung 166 für den Tübbing aus Beton mit der niedrigen Viskosität und Abbildung 167 für den Tübbing aus Beton mit hoher Viskosität dargestellt.

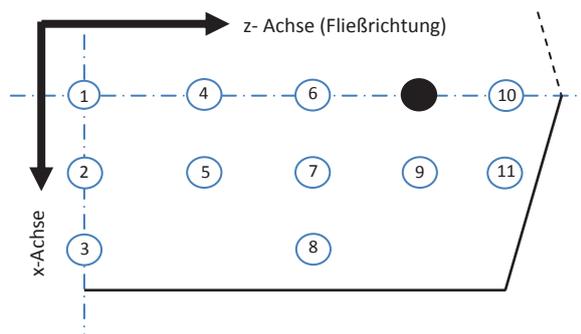


Abbildung 166 Bohrkernentnahme aus Tübbing Zams I

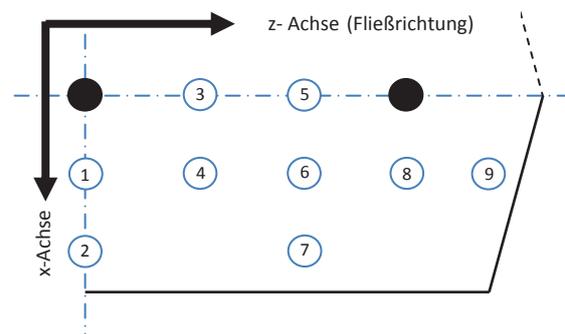


Abbildung 167 Bohrkernentnahme aus Tübbing Zams II

Vor der Entnahme der Bohrkernentnahme wurden auf der Tübbingoberfläche die Markierungen für die Bohrungen gesetzt und die Koordinatenachsen x und z auf den Bohrkernen vermerkt. Dies ist in Abbildung 168 zu sehen. Nach vollständiger Markierung der Bohrkernentnahmen wurden die Bohrkernentnahmen mit dem Durchmesser 150 mm gezogen (Abbildung 169). Im Anschluss wurden die Bohrkernentnahmen auf eine Höhe vom 150 mm abgelängt.



Abbildung 168 Markierung vor der Bohrkernentnahme



Abbildung 169 Bohrkernentnahme

Mit dem Messgerät BSM 100 wurde nun die Faserorientierung in den Bohrkernentnahmen bestimmt. Für die Messungen von Bohrkernentnahmen gibt es ein vom Würfel unterschiedliches Messverfahren. Die Fasermenge fand bei dieser Messung keine Berücksichtigung, da

auch hier die Reproduzierbarkeit nicht gegeben war. Die Ergebnisse dieser Messungen sind im Anhang zu finden.

Bei der Faserorientierung des Tübbings Zams I bleibt festzustellen, dass der erwartete Einfluss der Dehnströmung deutlich zu sehen ist. Während die Faserorientierung in den Bohrkernen 1-1, 1-6, 1-7 und 1-9 im Durchschnitt eine Orientierung in Fließrichtung von 55% aufweist, findet man im Bohrkern 1-5 eine Abnahme auf 47% und im Bohrkern 1-8 sogar auf 37%. Hier herrscht annähernd Isotropie. Des Weiteren ist das „Aufstellen“ der Fasern in Y-Richtung am Ende der Schalung gut zu erkennen. Die Messwerte von 66% bei Bohrkern 1-10 und 57% bei Bohrkern 1-11 in Y-Richtung beweisen deutlich das parallelstellen der Fasern zur auftreffenden Fläche.

Bei Tübbing Zams II zeigte sich bezüglich der Dehnströmung ein ähnliches Bild. Jedoch waren bei diesem Tübbing die Effekte nicht so stark ausgebildet wie bei Tübbing Zams I. Auch die erreichte Faserorientierung in Fließrichtung war nicht so gut. Dies war durch die höhere Viskosität der Betonmischung auch nicht anders erwartet worden. Allerdings war bei diesem Tübbing festzustellen dass die steifere Mischung, wie auch schon bei den Balkenversuchen bemerkt, das „Aufstellen“ weiter in das Bauteil hinein transportierte. Während bei Tübbing Zams I lediglich in den Bohrkernen des Randbereichs dieser Effekt festzustellen war, konnte hier dieses Phänomen auch noch in Bohrkern 2-8, eine Ebene hinter dem Randbereich, festgestellt werden.

Eine Anomalie zeigten die Bohrkern 1-4 und 2-3, die beide an derselben Stelle entnommen wurden. Beide zeigten keine Vorzugsrichtung, sondern eher eine isotrope Verteilung.

Abschließend kann durch diese Messungen konstatiert werden, dass die Viskosität einen entscheidenden Einfluss auf die Faserorientierung hat. Je fließfähiger ein Beton ist, desto stärker kann sich eine Faserorientierung ausbilden. Störungen der Faserorientierung, beispielsweise durch die Dehnströmung hervorgerufen, haben stärkere Effekte auf niederviskose Betone als bei steiferen Betonen. Deren Auswirkungen sind jedoch bei fließfähigem Beton lokaler begrenzt.

Schlussfolgerungen für die Tübbingproduktion:

- Befüllen des Tübbings über die gesamte Breite (Band-Anguss) ist sicherzustellen.
- Hohes Fließmaß beim Beton führt zu besserer Faserorientierung.
- Ein schneller Befüllvorgang ist anzustreben.
- Tübbinge sind über eine mittige Befüllung zu produzieren.



8 Resümee und Ausblick

Mit dieser vorliegenden Arbeit wurde angestrebt, die Faserorientierung im selbstverdichtenden Beton zu untersuchen. Aus beruflicher Erfahrung war dem Autor bei Betonagen mit FRSCC bereits öfters visuell aufgefallen, dass an den Bruchstellen von reinfaserbewehrten Bauteilen die Fasern eine Vorzugsrichtung aufwiesen. Ursprünglich war man davon ausgegangen, dass die Orientierung durch das Fließen des Betons bewirkt wird.

Durch die Versuche mit der **Ersatzflüssigkeit** musste allerdings festgestellt werden, dass das Fließen in einer laminaren Strömung nicht die Bedeutung für Faserorientierung hatte wie ursprünglich angenommen. Vielmehr zeigte sich bei diesen Versuchen, dass die Fasern nach dem Eintritt in die Versuchsschalungen weitgehend stabil blieben und eine nachträgliche Manipulation der Faserorientierung unmöglich war. Als Folge dieser Untersuchungen bleibt festzuhalten, dass eine Einflussnahme auf die Faserorientierung nur durch den Einfüllprozess möglich ist. Allerdings ist es nicht realisierbar Faserorientierung aus einer geneigten Rinne in eine horizontal liegende Form einzuleiten. Durch das Abbremsen des Materialstroms findet eine Homogenisierung der Orientierung statt. Was die Versuche ebenfalls deutlich gezeigt haben ist, dass eine Dehnströmung sich negativ auf die Ausrichtung in Fließrichtung auswirkt. Die Vermeidung dieser Strömung ist nur über das Band-Anguss-Verfahren und gleichbleibende Bauteildicken zu gewährleisten. Als besonders effektive Befüllmethode hat sich das schnelle Einbringen über ein Reservoir mit Schiebvorrichtung zum öffnen bewährt. Zudem konnte bei den Versuchen mit der Zuckerlösung beobachtet werden, dass sich bei dieser Art der Befüllung ein Schwall ausbildet, der zu einer Orientierung der Partikel führt.

Die Ergebnisse aus den Versuchen mit der Zuckerlösung wurden durch Versuche mit aus Schnellzement hergestelltem selbstverdichtenden Beton validiert. Mit diesem Beton wurden **Balken** für die äquivalente Biegezugfestigkeitsprüfung hergestellt. Bei dieser Herstellung wurden unterschiedliche Befüllungsmethoden und Faserdimensionen verwendet.

Durch die Verwendung von verschiedenen Fasergrößen bei gleicher Dosierung wurde ermittelt, dass es eine kritische Faseranzahl gibt, bei deren Überschreitung nicht nur die Mischzeit verlängert wird, sondern auch die Fasern zum Sperren neigen, was unweigerlich zu unerwünschter Inhomogenität führt. Mit diesen Versuchen konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die Bezeichnung „kritisches Volumen“ irreführend ist. Zum einen ist die Faseranzahl und nicht die Dosierung entscheidend, zum anderen hat die Faserorientierung und Faserlänge einen folgenreicheren Einfluss auf den Verlauf der Arbeitslinie als das Faservolumen. Dies macht eine objektive Beurteilung von Faserbeton in Klassen schwierig und kann, wenn überhaupt, nur durch eine hohe Anzahl von Prüfkör-



pern gelingen. Es bleibt allerdings festzuhalten, dass lange Fasern ein besseres Nachrissverhalten aufweisen als kurze Fasern auch wenn ihr l_f/d_f -Verhältnis geringer ausfällt.

In diesen Versuchen konnte deutlich gezeigt werden, dass in selbstverdichtenden Betonen eine eindeutige Faserorientierung in Fließrichtung zu erzielen ist. Diese Faserorientierung ist nicht unmittelbar über die Einfüllrichtung bestimmt, sondern über das Fließverhalten im Bauteil. Die Faserorientierung kann durch verschiedene Einflüsse in unterschiedlichen Graden gestört werden. Besonders hohen Einfluss haben dabei eine Verlangsamung der Fließgeschwindigkeit und das Auftreten von Dehnströmungen. Die Auswirkungen von diesen nicht gewünschten Einflüssen sind mit sinkender Viskosität lokal begrenzter. Neben dem Absenken der Viskosität des Betons kann dies allerdings auch durch ein schnelles Befüllung des Bauteils mit geeigneten Verfahren erreicht werden. Prinzipiell ist ein schnelles Befüllen der Schalung immer anzustreben. Zusätzlich ist aber auch darauf zu achten, dass die Fließstrecke nach dem Eingussbereich lang genug ist, um Faseranhäufungen im Füllbereich und somit Inhomogenität zu vermeiden. Anhand der durchgeführten Experimente konnte ebenso gezeigt werden, dass die erreichte Faserorientierung im Beton über längere Fließstrecken konstant bestehen bleibt.

Durch die ausgeführten äquivalenten Biegezugprüfungen ist anzumerken, dass eine Beeinflussung von plötzlichen Risserweiterungen (schlagartigem Versagen) weder durch Rezepturveränderung, Faserorientierung noch durch Produktionsverfahren eindeutig steuerbar ist. Es konnte hiermit nicht eindeutig nachgewiesen werden, dass die Faserorientierung einen größeren Einfluss auf das Nachrissverhalten hat als der Fasergehalt.

Als Resultat dieser Untersuchungen am SCC entschied man sich für eine Betonrezeptur, die sich besonders gut verarbeiten ließ. Mit dieser wurden erstmals **Tübbinge** in zwei unterschiedlichen Produktionsverfahren hergestellt. Die eine Schalung ermöglichte das Befüllen von der Seite über die gesamte Bauteillänge die andere entsprach der üblichen Produktionsweise über die Mitte. Beide Schalungen wurden jeweils über ein Reservoir mit Schieberöffnung schnell befüllt. Die produzierten Tübbinge wurden im Einbauzustand einem adaptierten Zwei-Punkt-Biegezugversuch unterzogen. Von beiden Serien wurden ein Teil der Tübbinge nach sieben die Anderen nach 28 Tagen dieser Prüfung unterzogen.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen bleibt zu konstatieren, dass die mittig befüllten Tübbinge eine ca. 15 % höhere Maximallast aushielten und eine ca. 20 % höhere Dehnung in diesem Punkt aufwiesen als die von der Seite befüllten Tübbinge. Diese zeichneten sich durch ein plötzliches Versagen im Bereich des Lasteintrags und dem Lager, von wo aus die Tübbinge befüllt worden waren, aus. Die Faserorientierung in diesem Bereich wurde als Ursache für dieses Versagen identifiziert. Die standardmäßig produ-



zierten Tübbinge besaßen dagegen ihren Bruchbereich vorwiegend zwischen den beiden Lasteintragungspunkten im mittleren Bauteildrittel.

Durch diese Versuche konnte gleichermaßen festgestellt werden, dass eine Verlängerung der Reifezeiten von 7 auf 28 Tage sehr wohl zu einer Steigerung der Maximalkraft führte, diese aber nicht eindeutig proportional zu den Ergebnissen der Druckfestigkeit aus der Erstprüfung verliefen. Bemerkenswert bei diesen Untersuchungen war, dass in allen Tübbingen eine deutliche Faserorientierung in Fließrichtung und keine Faseransammlungen im Einfüllbereich messbar waren. Somit ist erwiesen, dass dieses Phänomen, welches bei den Balkenproduktionen aufgetreten war, der Probekörperdimension geschuldet ist.

Für zukünftige Produktionen von reinfaserbewehrten Tübbingen mit selbstverdichtendem Beton ist, nach Zugrundelegung dieser Arbeit, eine mittige Befüllung der Bauteile über ein schnell zu öffnenden Vorratsbehälter, die optimale Produktionsweise.

Ein nicht unwesentlicher Teil dieser Arbeit war der Praxistest, in dem ein SCC mit Schnellzement für die **Tübbingproduktion** zum Einsatz kam.

Zum einen konnte belegt werden, dass sich Beton aus SupraCem 45 in üblichen Transportbetonanlagen verarbeiten lässt. Eine nachhaltige Störung des Betriebs durch den Spezialzement (wie z.B. Verschleppungen) konnte nicht festgestellt werden. Auch der Transport in herkömmlichen Fahrmischern ließ sich über kurze Distanzen gut bewältigen. Die Betonreste ließen sich nach dem Transport mit üblichem Reinigungsaufwand entfernen. Aus Sicht des Transportbetonwerks spricht nichts gegen den Einsatz des Schnellzements in ihrer Anlage.

Aber auch die Tübbingproduktion verlief erwartungsgemäß positiv. Für die Mannschaft der Feldfabrik war es erstaunlich wie einfach diese Produktion von statten ging und wie schnell der Beton fest wurde. Allerdings war bei diesem Beton das Nachbehandeln der Oberfläche, das Verreiben, nicht möglich. Auch wenn die Oberfläche, unterhalb der Konterschalung, poriger war als gewöhnlich, konnte der Tübbingtransport mit dem Vakuummanipulator problemlos bewältigt werden. Auch die Mannschaft der Feldfabrik stand nach dieser Betonage, unter Vorbehalt der Verbesserung der Oberflächengüte, einem möglichen zukünftigen Einsatz positiv gegenüber.

Alles in allem wurde dieser Versuch der Praxistauglichkeit von allen Beteiligten als erfolgreich gewertet.

Im Anschluss wurden die in Zams produzierten Tübbinge zur Bestimmung der Stahlfaserorientierung nach Innsbruck geliefert. Bei diesen Untersuchungen wurde der erwartete Einfluss der Dehnströmung deutlich festgestellt. Dies manifestierte sich in der starken Änderung der Faserorientierung. So war in der Mitte des Tübbings eine deutliche Orientierung in Fließrichtung festzustellen. Der Beton im Bohrkern, der mit der maxima-



len Dehnströmung konfrontiert wurde, wies dagegen so niedrige Orientierungswerte in Fließrichtung auf, dass man schon von einer quasi isotropen Verteilung reden kann.

Zudem wurde auch bei dieser Betonage beobachtet, dass sich die Fasern im Bereich, in dem der Betonstrom auf die Schalung stieß, aufstellten und somit eine Hauptfaserorientierungsrichtung parallel zu dieser Fläche einnahmen.

Da für die Produktion der beiden Tübbinge eine weichere und eine steifere Rezeptur Verwendung fanden, konnte durch die Untersuchungen bestätigt werden, dass die Viskosität einen großen Einfluss auf die Faserorientierung, auf die Ausbreitung von Störungen und die Störung der Orientierung selbst hat. Je fließfähiger der Beton ist, umso höher ist die Faserausrichtung, umso lokaler aber auch stärker sind die Störbereiche.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Faserorientierung im selbstverdichtenden Beton mit der Produktionsoptimierung für den Tübbingbau mit Schnellzement untersucht. Da diese Untersuchungen eher anwendungsorientiert waren, konnten einige interessante Punkte nicht vollständig geklärt werden. Für die Weiterführung dieser Forschungsarbeit könnte man eventuell folgende Punkte näher untersuchen:

- Bei den Prüfungen der äquivalenten Biegezugfestigkeit traten bei den Untersuchungen, obwohl beide Probekörper aus ein und derselben Mischung hergestellt wurden sehr unterschiedliche Arbeitsvermögen auf. Mit mehreren Wiederholungen wäre es möglich eine größere Datenmenge zu sammeln und statistisch gesicherte Werte zu erhalten.
- Mit diesem so generierten Datenpool wäre es auch leichter, Faktoren für die statistische Bemessung zu erhalten. Im Allgemeinen wäre die Interpretation der Ergebnisse aus dem Gesichtspunkt der Festigkeitslehre noch denkbar.
- Durch eine größere Anzahl der Wiederholungen wäre dann zu klären, ob Widersprüche die sich in dieser Arbeit ergeben haben {z.B. mit erhöhtem Fasergehalt sinkt (Rezeptur 1 und Rezeptur 6) bzw. steigt (Rezeptur 2 und Rezeptur 5) die Tragsicherheit} Bestand haben oder sich auflösen, weil es sich lediglich um obere und untere Extremwerte handelt die hier ein verzerrtes Bild abgeben.
- Erstrebenswert wäre selbstverständlich eine aus dieser Arbeit hervorgegangene optimierte Produktion von Tübbinggen zu betreuen. Anschließend sollten diese Bauteile dann ebenfalls zum Einbau auf einer Versuchsstrecke kommen. Somit könnten Erfahrungen über den Einbau auf einer Tunnelbohrmaschine gesammelt werden und Bewertungen angestrebt werden, ob das Manipulieren von duktileren Tübbinggen nicht unproblematischer wäre, was hier zu einer Verbesserung führte. Zudem wäre es für ein solches Bauvorhaben denkbar, Maßnahmen zu testen, die die Porigkeit der Oberfläche stark reduzieren.



9 Literaturverzeichnis

- [1] Putzmeister AG Pressemitteilung, „Weltrekord-Pumphöhe am Burj Dubai – 606 Meter, 2008.
- [2] „www.Wikipedia.de,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Stahlfaserbeton>. [Zugriff am 20 August 2013].
- [3] Verband deutscher Stahlfaserhersteller e.V, „Herstellung und Prüfung von Biegebalken aus Stahlfaserbeton – Merkblatt,“ 45703 Datteln, 2008.
- [4] H. Okamura und K. Ozawa, „Mix Design for Self-Compacting Concrete,“ *Concrete Library of JSCE*, pp. 107-120, 1995.
- [5] D. Hansel und P. Guirguis, „Stahlfaserbeton-Tübbing: Stand der Technik und realisierte Projekte,“ *Tunnel*, pp. 14-24, 1 2011.
- [6] G. Brux, „Stahlfaserbeton im Überschneidungsbereich zweier SBB Tunnel,“ *Tunnel*, pp. 39-44, 3 2004.
- [7] M. S. H. u. C. M. Tersol, „Doppelstöckig ausgebauter U-Bahn Tunnel mit großem Durchmesser für die Linie 9 in Barcelona,“ *Bauingenieur*, pp. 387-394, 7/8 2005.
- [8] R. Winterberg und G. Vollmann, „Einsatz von Stahlfaserbeton in der Tübbingproduktion Teil 1,“ *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, pp. 4-15, 4 2009.
- [9] R. Röck, „Selbstverdichtender Beton für die Tunnelinnenschale,“ in *Forschungskolloquium des VÖZ-ZFI*, Wien, 2007.
- [10] A. Klotz und T. Gapp, „Faserbeton – Modeerscheinung oder doch mehr?,“ in *17. Vilsener Baustofftag 2013*, Reutte, 2013.
- [11] H. Schorn, *Faserbetone für Tragwerke*, Düsseldorf: Verlag Bau + Technik GmbH, 2010.
- [12] K. Holschenmacher, F. Dehn und Y. Klug, „Grundlage des Faserbetons,“ in *Beton-Kalender Band 2*, Berlin, Ernst & Sohn, 2011, pp. 21-88.
- [13] B. Wietek, *Stahlfaserbeton: Grundlagen und Praxisanwendung*, Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [14] Verband deutscher Stahlfaserhersteller e.V, „Stahlfaserbeton für Bauteile und Bauwerke – Technisches Merkblatt,“ Verband deutscher Stahlfaserhersteller e.V, Datteln.
- [15] H. Falkner und J. Grunert, „Faserbeton,“ in *Betonkalender Band 2*, Berlin, Ernst & Sohn, 2011, pp. 3-17.
- [16] M. Empelmann, M. Teutsch und M. Wichers, „Baukonstruktionen aus Faserbeton,“ in *Betonkalender Band 2*, Berlin, Ernst & Sohn, 2011, pp. 91-139.



- [17] M. Teutsch, „Bewe(ä)hrter Stahlfaserbeton,“ *Tiefbau*, Nr. 4, pp. 202-210, 2006.
- [18] M. Schulz, „Stahlfasern: Eigenschaft und Wirkweisen,“ *Beton*, pp. 382-387, 7 2000.
- [19] J. M. Alwan, A. E. Naaman und P. Guerrero, „Effect of mechanical clamping on the pull-out response of hooked steel fibers embedded in cementitious matrices.,“ *Concrete Science and Engineering*, pp. 15-25, 1999.
- [20] P. Robins, S. Austin und P. Jones, „Pull-out behaviour of hooked steel fibres,“ *Materials and Structures*, pp. 434-442, 1 August 2002.
- [21] A. E. Naaman, „Fasern mit verbesserten Haftung,“ *Beton- und Stahlbeton*, pp. 232-238, April 2000.
- [22] A. Naaman, „31. Evaluation of steel fibers for applications in structural concrete,“ in *6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes*, RILEM Publications SARL, 2004, pp. 389-400.
- [23] G. Pittino, T. Pabel, J. Rosc, L. Fritz, M. Hadwiger, G. Geier und D. Habe, „CT basierende Visualisierung und Berechnung der Orientierung von Stahlfasern im stahlfaserbewehrten Spritzbeton,“ *ZfP-ZEITUNG*, Bd. 130, Nr. Juni, pp. 43-45, 2012.
- [24] M. Empelmann und M. Teutsch, „Faserorientierung und Leistungsfähigkeit von Stahlfaser sowie Kunststofffaserbeton. Versuche zur Auswirkung der Herstellung,“ *Beton*, Bd. Jg.: 59, Nr. 6, pp. 254-259, 2009.
- [25] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, *DAfStb – Richtlinie Stahlfaserbeton*, Berlin, 2010.
- [26] B. Thomée und K. Schikora, „Stahlfaserbeton: Elastoplastisches Materialgesetz – Berechnungsmodelle – Versuche,“ in *Forschungskolloquium Baustatik-Baupraxis*, Universität der Bundeswehr München, 2003.
- [27] V. Mechtcherine, „Bauen im Bestand, Hochleistungsbeton, Teil 2 Faserbeton,“ 2012. [Online]. Available: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_bauingenieurwesen/ifb/studium/BoxHochleistungsbetone/Box2012/BoxFolien/HLB_02_gross.pdf. [Zugriff am 05 11 2013].
- [28] R. Breitenbücher, „Herstellen und Verarbeiten von Faserbeton,“ in *Faserbeton – Innovationen im Bauwesen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*, Berlin, Bauwerk Verlag GmbH, 2002, pp. 19-28.
- [29] „Wikipedia – Die freie Enzyklopädie,“ 08 04 2011. [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Rheologie>. [Zugriff am 02 05 2011].
- [30] H. E. Eyerer, *Polymer Engineering*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [31] G. Böhme, *Strömungsmechanik nichtnewtonscher Fluide*, Stuttgart / Leipzig / Wiesbaden: Teubner Verlag, 2000.
- [32] W. S. S. Grellmann, *Kunststoffprüfung*, München: Carl Hanser Verlag, 2011.

- [33] F. Trouton, „On the Coefficient of Viscous Traction and Its Relation to that of Viscosity,“ *Proceedings of the Royal Society*, Nr. 77, pp. 426-440, 1906.
- [34] H. Weingand und H. Vetter, „Molekulare Orientierung in Spritzgußteilen als Folge der Verarbeitung,“ *Kunststoffe*, Bd. 56, Nr. 11, pp. 761-769, 1966.
- [35] G. Jeffery, „The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid,“ *Proceeding of the Royal Society*, Nr. 102, pp. 161-179, 1922.
- [36] T. Strobl, „SCC – SVB selbstverdichtender Beton pannenfrei,“ 16.02.2008.
- [37] W. Brameshuber, Schriftenreihe Spezialbetone Band 5 – Selbstverdichtender Beton, Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2004.
- [38] E. Lück und M. Jager, Chemische Lebensmittelkonservierung: Stoffe, Wirkungen, Methoden, Berlin: Springer, 1995.
- [39] L. Martinie und N. Roussel, „Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice,“ *Cement and Concrete Research*, Nr. 41, pp. 993-1000, 2011.
- [40] J. Gay und A. Sturm, Der Gussbeton und seine Anwendung im Bauwesen, Berlin: Ernst & Sohn, 1926.
- [41] H. Okamura und M. Ouchi, „Self-compacting concrete,“ *Journal of Advanced Concrete Technology*, pp. 5-15, 2003.
- [42] H. Okamura, K. Ozawa und M. Ouchi, „Self-compacting concrete,“ *Structural Concrete*, pp. 3-17, 2000.
- [43] Produktmanagement Holcim (Schweiz) AG mit Unterstützung der EMPA Dübendorf, Selbstverdichtender Beton, Zürich: Holcim (Schweiz) AG, 2005.
- [44] M. Dickamp und S. Eppers, Selbstverdichtender Beton- Eigenschaften und Prüfung, Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2006.
- [45] Bauhaus Universität Weimar / F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar 109 Anorganische Bindemittel, Weimar: Universitätsverlag, 1998.
- [46] F. W. Locher, Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2000.
- [47] „Technisches Merkblatt SupraCem 45,“ 2005. [Online]. Available: http://www.schretter-vils.co.at/fileadmin/sync_folder/Technische_Merkblaetter/Bindemittel/SupraCem/SC45.pdf.
- [48] M. Balsevics, Entwicklung und Eigenschaften von Schnellzementen. (Diss.), Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1980.
- [49] P. Grübl, H. Weigler und S. Karl, Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften, Berlin: Ernst & Sohn, 2001.
- [50] V. Baroghel-Bouny, „Durability indicators: relevant tools for an improved assessment of RC,“ in *Proc. 5th Int. Conf. on Concrete under severe conditions: Environment and*



- loading (CONSEC'07), june 4-6, 2007*, Tours, France, Ed. by F. Toutlemonde, K. Sakai, O.E. Gjrrv & N. Banthia, LCPC, 2007, 2007, pp. Vol 1; 67-84.
- [51] N. T. 4. BUILD, „Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments,“ Espoo, Finnland, 1999.
- [52] P. Paulini und F. Nasution, „Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Beton anhand der Luft-Permeabilität,“ in *Tagungsbericht Ibausil – 16. Internationale Baustofftagung, 20.-23. September 2006*, Weimar, Bauhaus Universitt, 2006, pp. 1-1365 – 1-1372.
- [53] P. Paulini, „A laboratory and on-site test method for air permeability of concrete,“ in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure*, Delft, RILEM PRO 70, 4-6 October 2010, pp. Vol.II, 995-1002.
- [54] CBE Group, „SVB fr Tbbingschalungen,“ *BFT International*, Nr. 10, 2010.
- [55] F. Laranjaeira, C. Molins und A. Aguado, „Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers,“ *Cement and Concrete Research*, p. 1471–1487, 18. Mai 2010.
- [56] Y. Ding, *Eigenschaften von Faserbeton und Faserspritzbeton*, Stuttgart: ibidem Verlag, 2003.
- [57] R. Springenschmid, *Betontechnologie fr die Praxis*, Berlin: Bauwerk Verlag, 2007.

10 Anhang

INHALT

Versuch: Zucker 2-1	167
Versuch: Zucker 4-1	173
Versuch: Zucker 5-1	183
Versuch: Rohr 1	197
Versuch: Rohr 2	211
Versuch: Rohr 3 – Statistische Auswertung	243
Versuch: L-Box.....	285
Mörtelversuche mit verschiedenen Fließmitteln	295
Messreihen Permeabilität.....	297
Protokolle der Faserorientierungsmessung.....	299



VERSUCH: ZUCKER 2-1

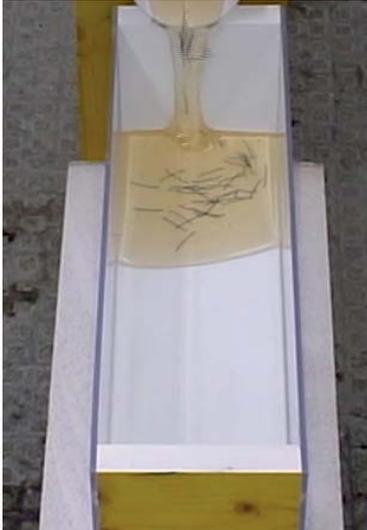
**Foto 1****Foto 2****Foto 3****Foto 4****Foto 5****Foto 6**



Foto 7



Foto 8



Foto 9



Foto 10



Foto 11



Foto 12

**Foto 13****Foto 14****Foto 15****Foto 16****Foto 17****Foto 18**



Foto 19



Foto 20



Foto 21



Foto 22



Foto 23



Foto 24

**Foto 25****Foto 26****Foto 27****Foto 28**

VERSUCH: ZUCKER 4-1

**Foto 29****Foto 30****Foto 31****Foto 32****Foto 33****Foto 34**



Foto 35



Foto 36



Foto 37



Foto 38



Foto 39



Foto 40

**Foto 41****Foto 42****Foto 43****Foto 44****Foto 45****Foto 46**



Foto 47



Foto 48



Foto 49



Foto 50



Foto 51



Foto 52

**Foto 53****Foto 54****Foto 55****Foto 56****Foto 57****Foto 58**



Foto 59



Foto 60



Foto 61



Foto 62



Foto 63



Foto 64

**Foto 65****Foto 66****Foto 67****Foto 68****Foto 69****Foto 70**



Foto 71



Foto 72



Foto 73



Foto 74



Foto 75



Foto 76

**Foto 77****Foto 78****Foto 79****Foto 80****Foto 81****Foto 82**

VERSUCH: ZUCKER 5-1

**Foto 83****Foto 84****Foto 85****Foto 86****Foto 87****Foto 88**



Foto 89



Foto 90



Foto 91



Foto 92



Foto 93



Foto 94

**Foto 95****Foto 96****Foto 97****Foto 98****Foto 99****Foto 100**



Foto 101



Foto 102



Foto 103



Foto 104



Foto 105



Foto 106

**Foto 107****Foto 108****Foto 109****Foto 110****Foto 111****Foto 112**



Foto 113



Foto 114



Foto 115



Foto 116



Foto 117



Foto 118

**Foto 119****Foto 120****Foto 121****Foto 122****Foto 123****Foto 124**



Foto 125



Foto 126



Foto 127



Foto 128



Foto 129



Foto 130

**Foto 131****Foto 132****Foto 133****Foto 134****Foto 135****Foto 136**



Foto 137



Foto 138



Foto 139



Foto 140



Foto 141



Foto 142

**Foto 143****Foto 144****Foto 145****Foto 146****Foto 147****Foto 148**



Foto 149



Foto 150



Foto 151



Foto 152



VERSUCH: ROHR 1



Foto 153



Foto 154



Foto 155



Foto 156

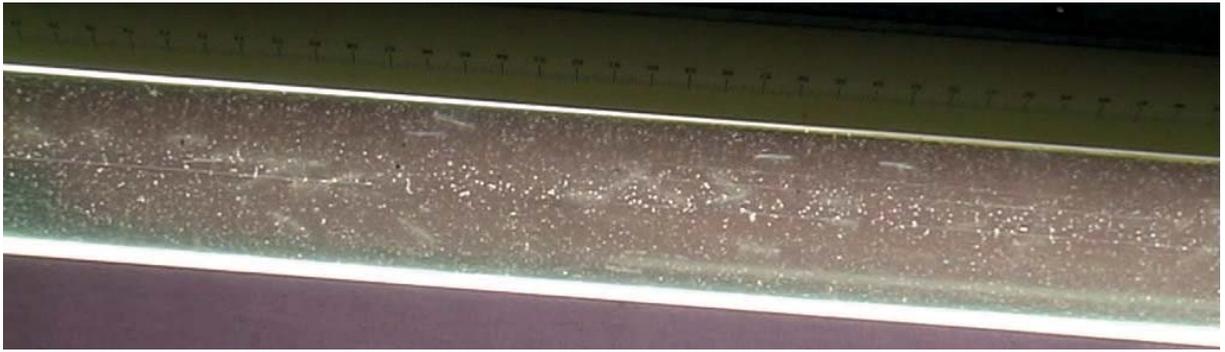


Foto 157



Foto 158



Foto 159



Foto 160

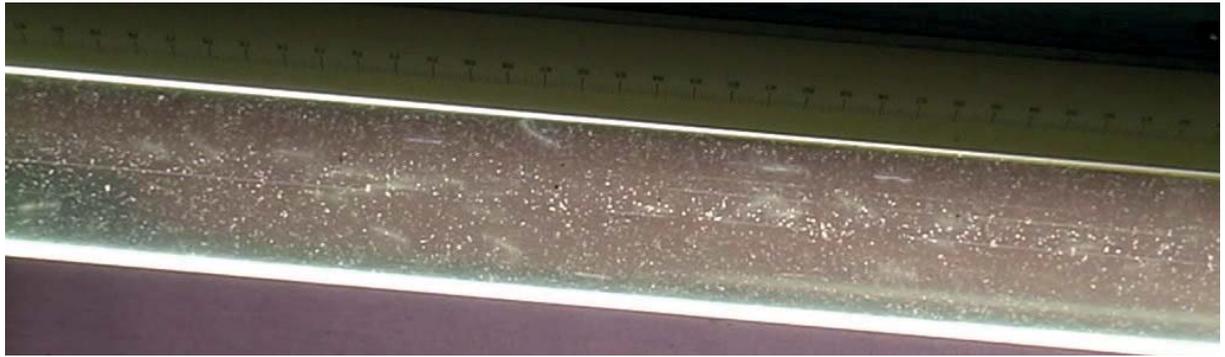


Foto 161



Foto 162



Foto 163



Foto 164



Foto 165

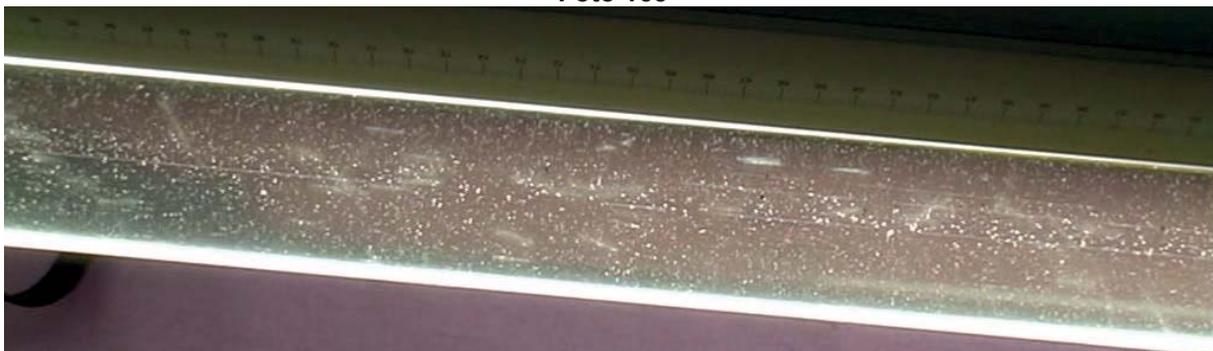


Foto 166

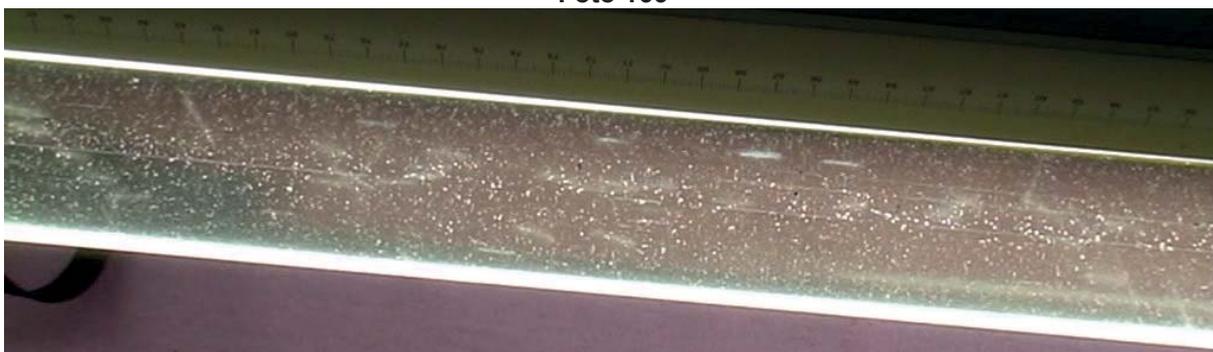


Foto 167

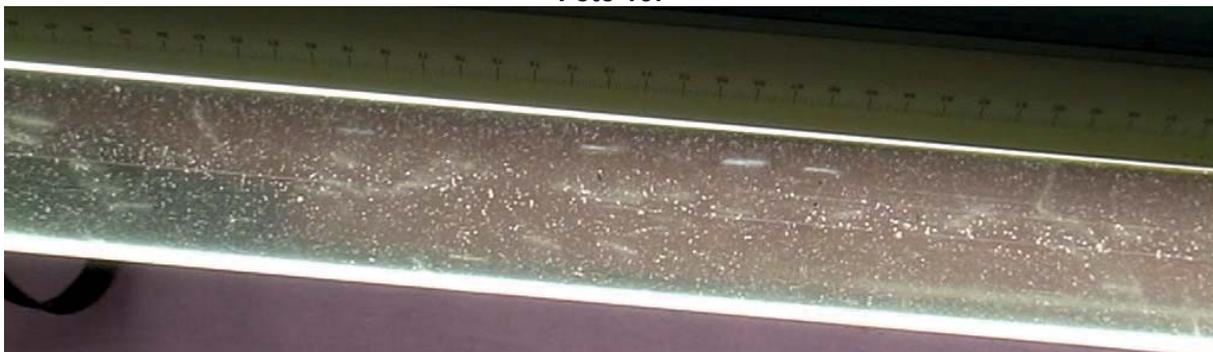


Foto 168



Foto 169



Foto 170

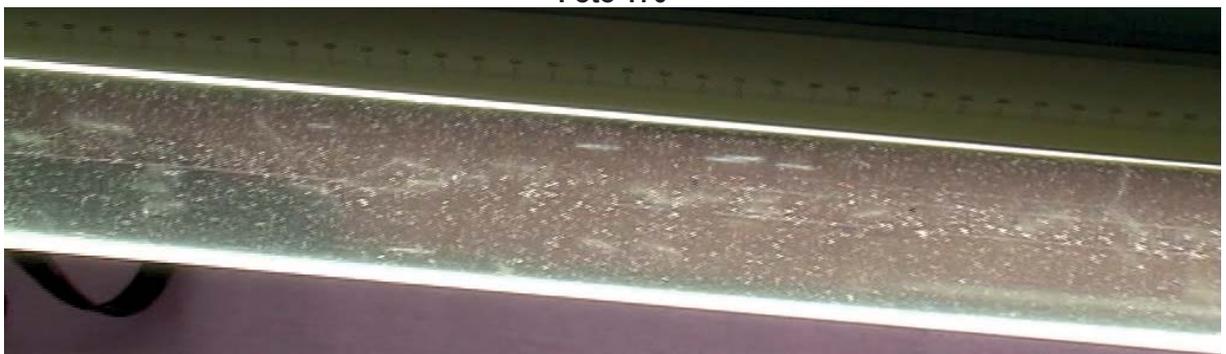


Foto 171



Foto 172



Foto 173

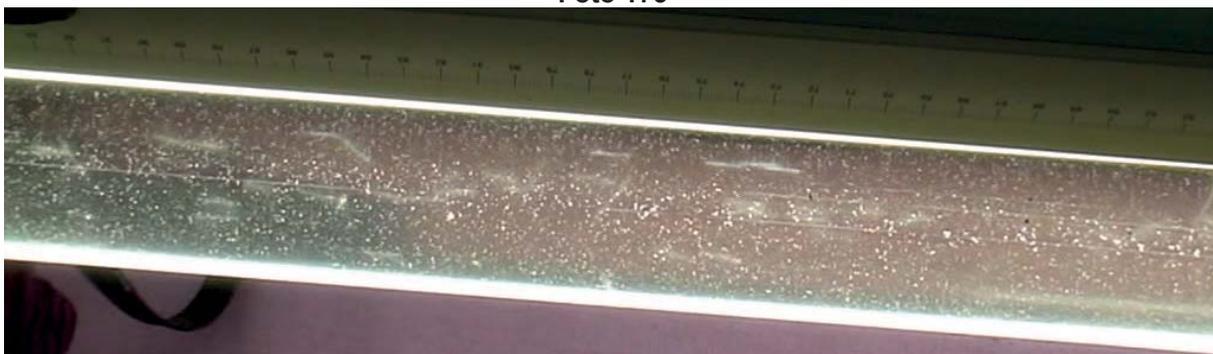


Foto 174



Foto 175



Foto 176



Foto 177



Foto 178



Foto 179



Foto 180



Foto 181

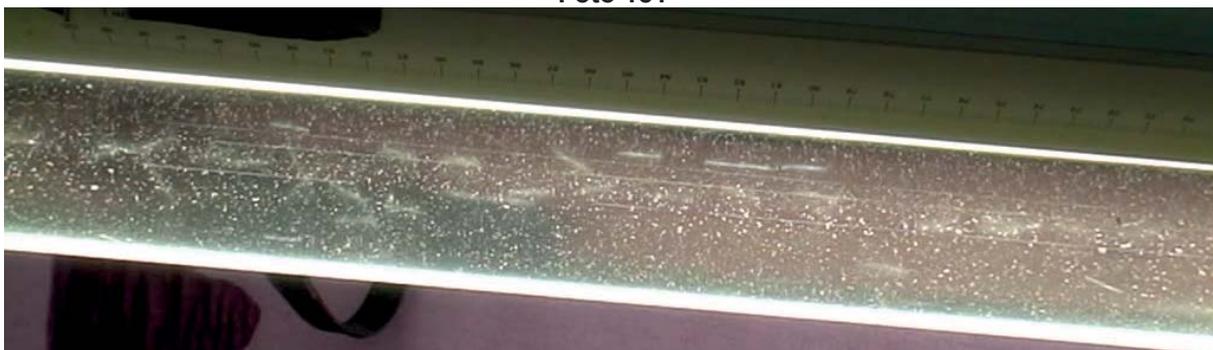


Foto 182

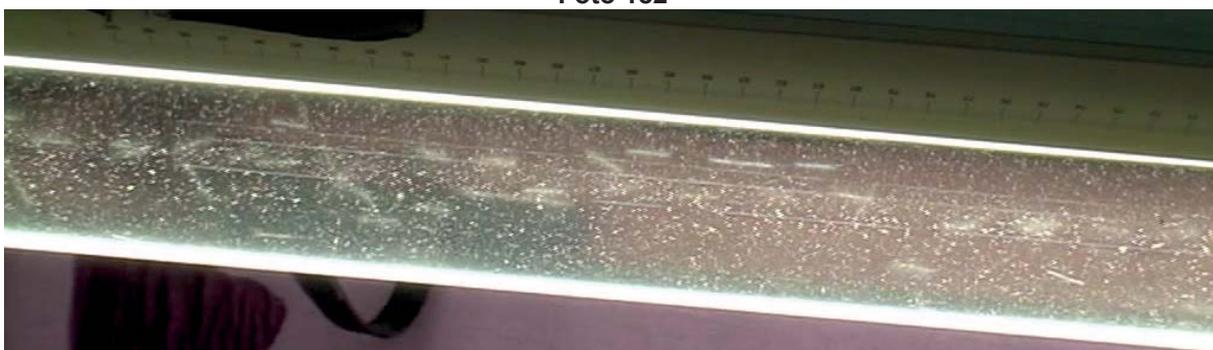


Foto 183



Foto 184

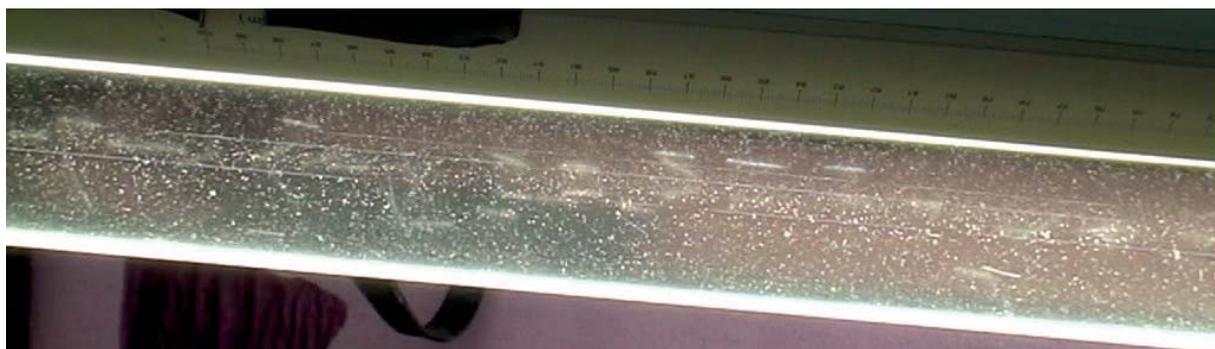


Foto 185



Foto 186

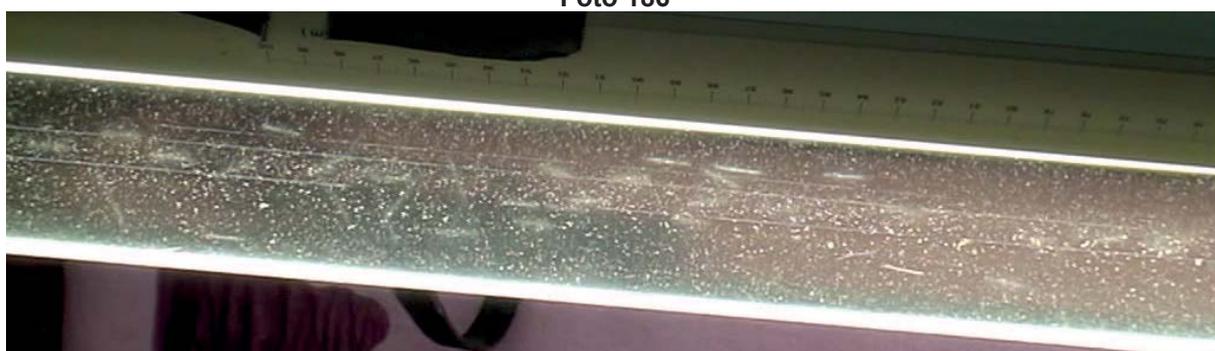


Foto 187

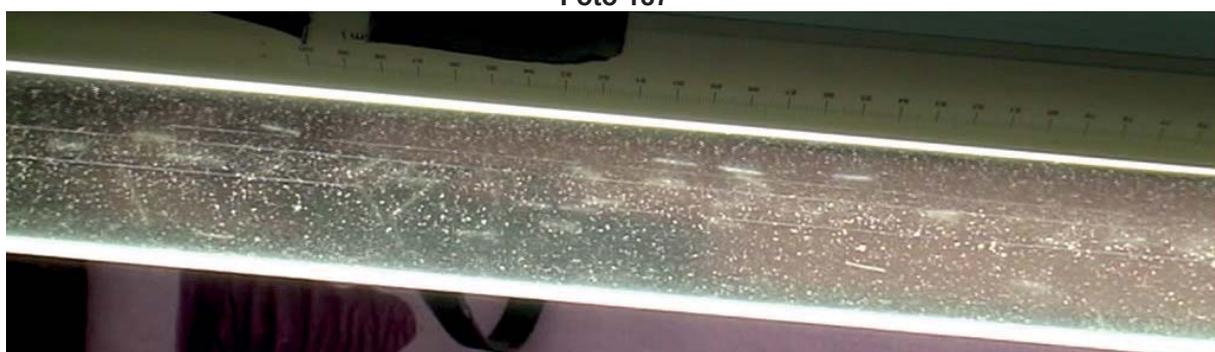


Foto 188

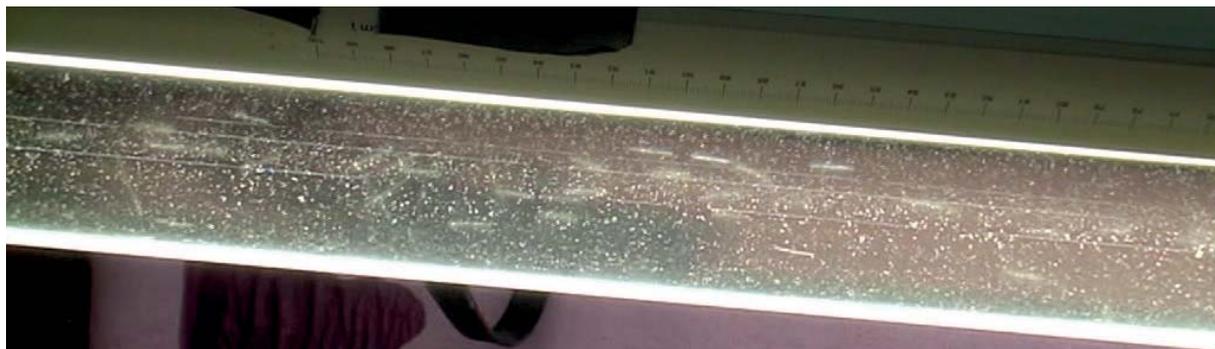


Foto 189

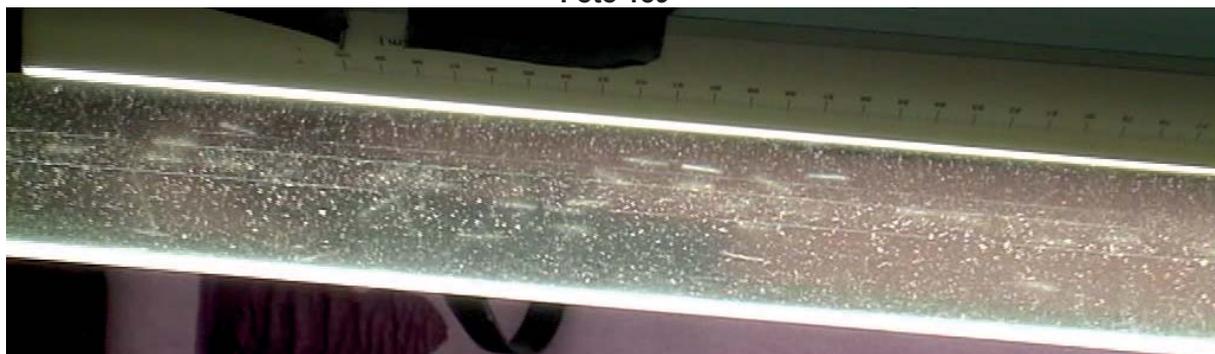


Foto 190



Foto 191

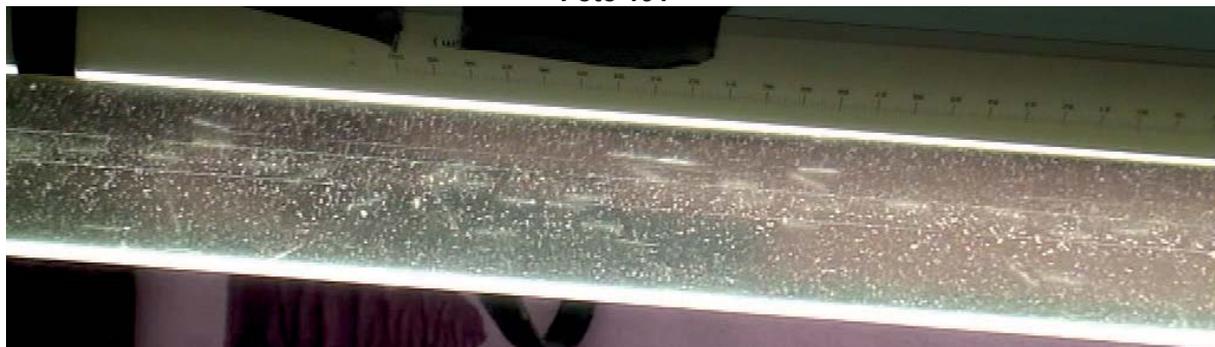


Foto 192

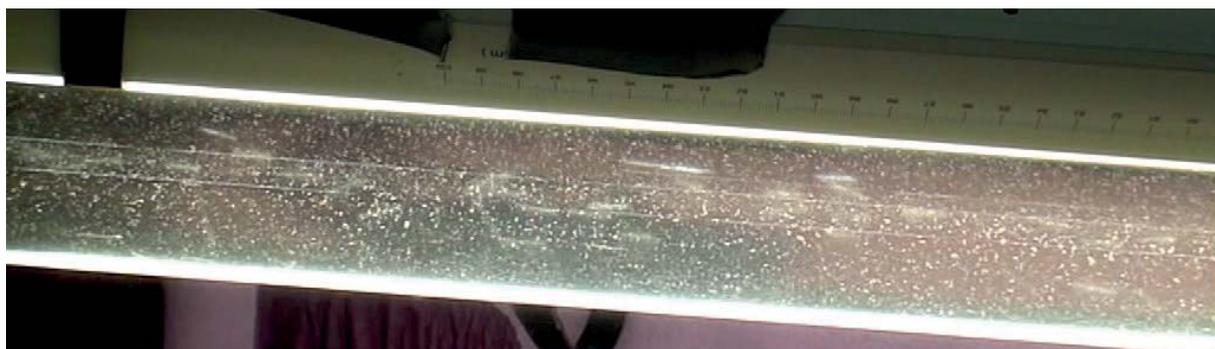


Foto 193



Foto 194



Foto 195



Foto 196



Foto 197



Foto 198



Foto 199



Foto 200

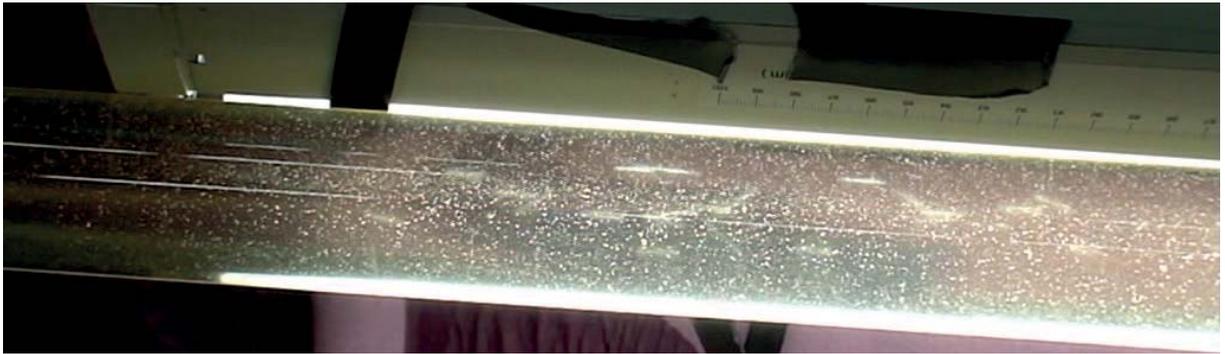


Foto 201



Foto 202

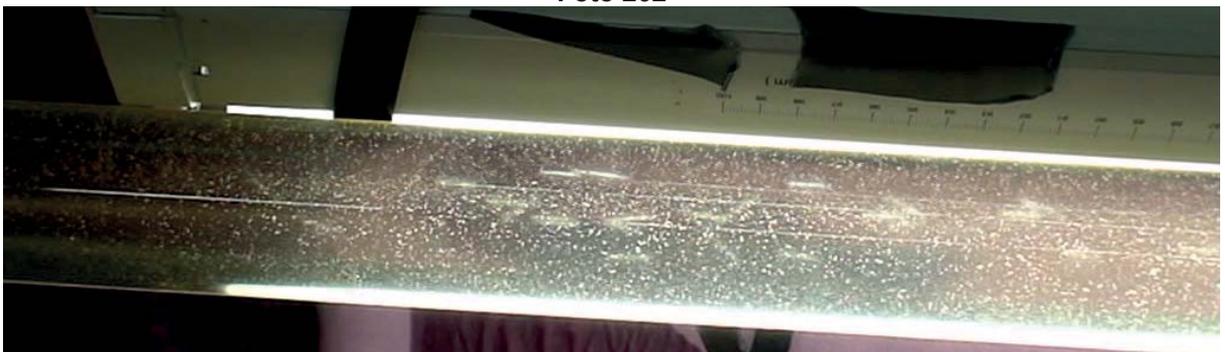


Foto 203





VERSUCH: ROHR 2



Foto 204



Foto 205



Foto 206



Foto 207



Foto 208

**Foto 209****Foto 210****Foto 211****Foto 212****Foto 213**



Foto 214



Foto 215



Foto 216



Foto 217



Foto 218



Foto 219



Foto 220



Foto 221



Foto 222



Foto 223



Foto 224



Foto 225



Foto 226



Foto 227



Foto 228



Foto 229



Foto 230



Foto 231



Foto 232



Foto 233



Foto 234



Foto 235



Foto 236

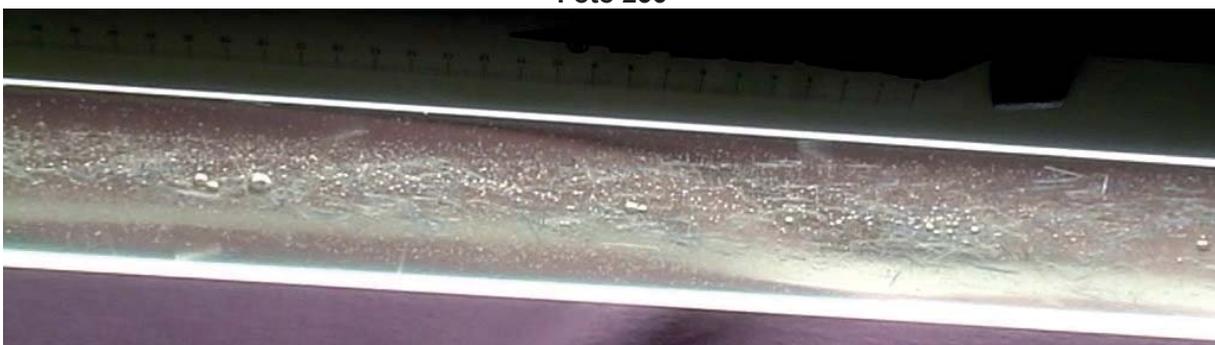


Foto 237



Foto 238



Foto 239

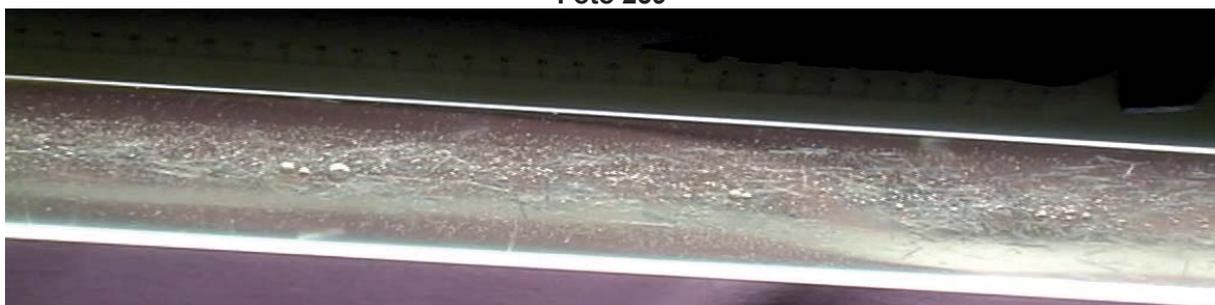


Foto 240



Foto 241



Foto 242



Foto 243

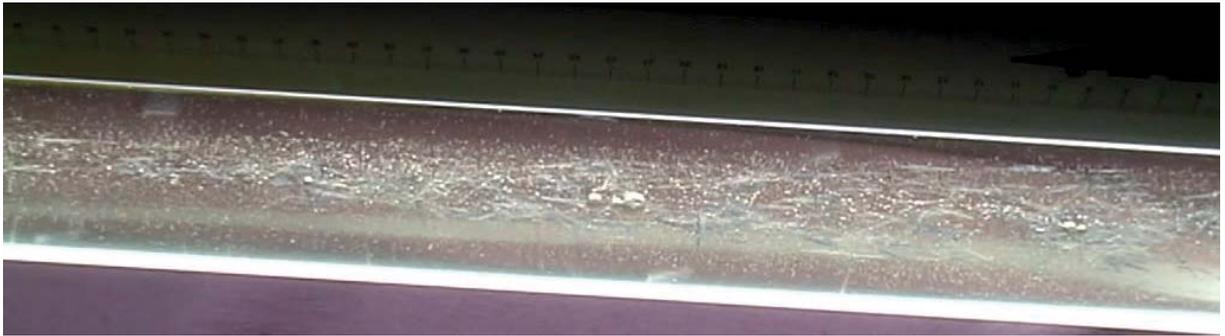


Foto 244



Foto 245



Foto 246



Foto 247

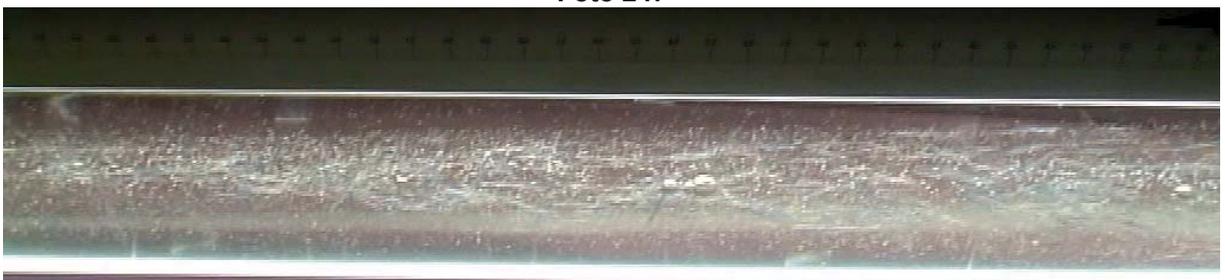


Foto 248

**Foto 249****Foto 250****Foto 251****Foto 252****Foto 253**

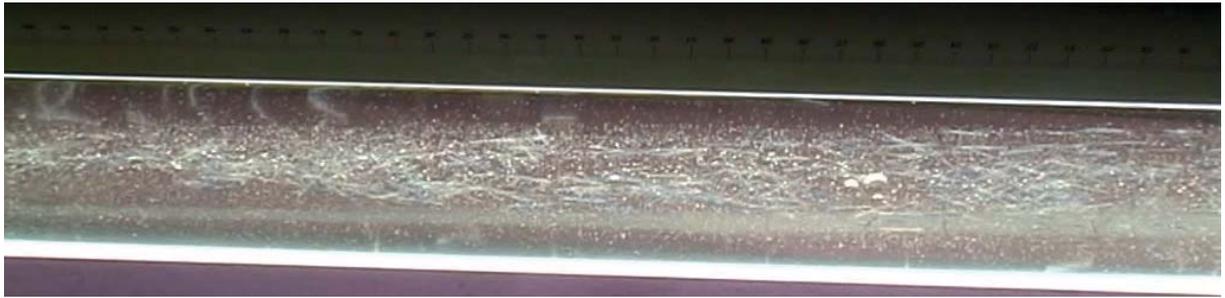


Foto 254



Foto 255



Foto 256



Foto 257

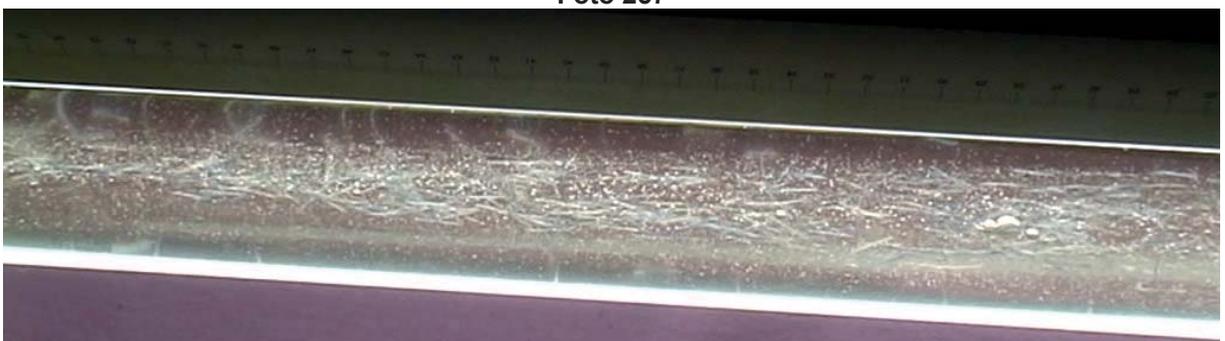


Foto 258

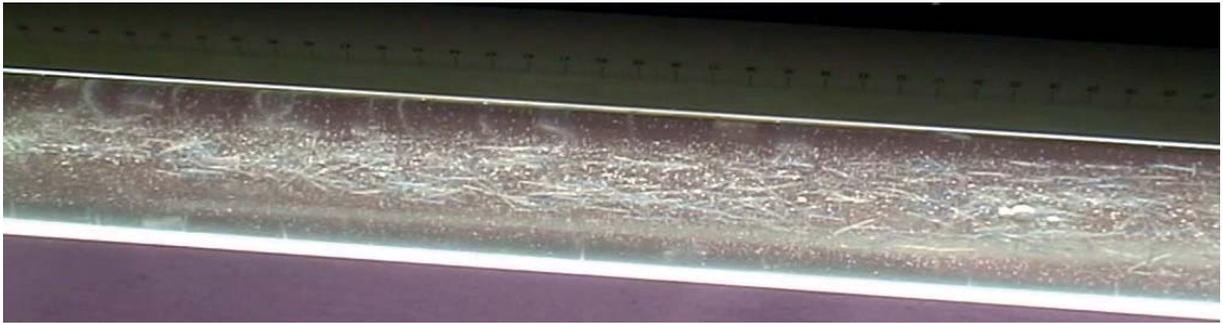


Foto 259



Foto 260



Foto 261



Foto 262

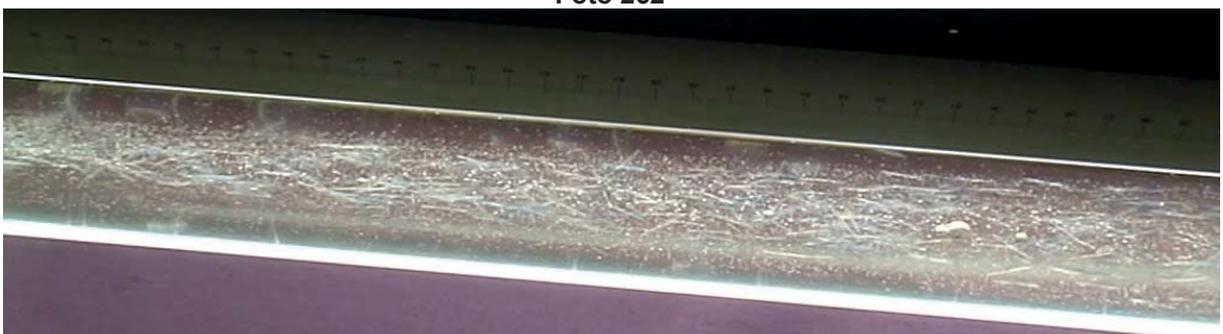


Foto 263



Foto 264

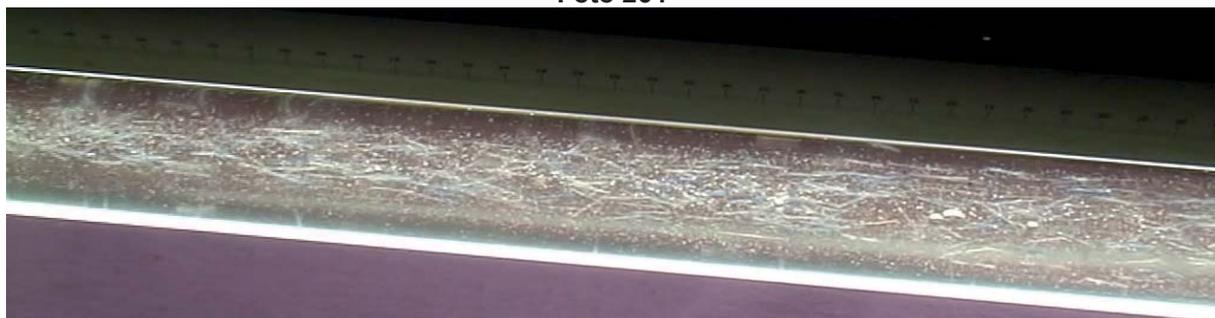


Foto 265



Foto 266

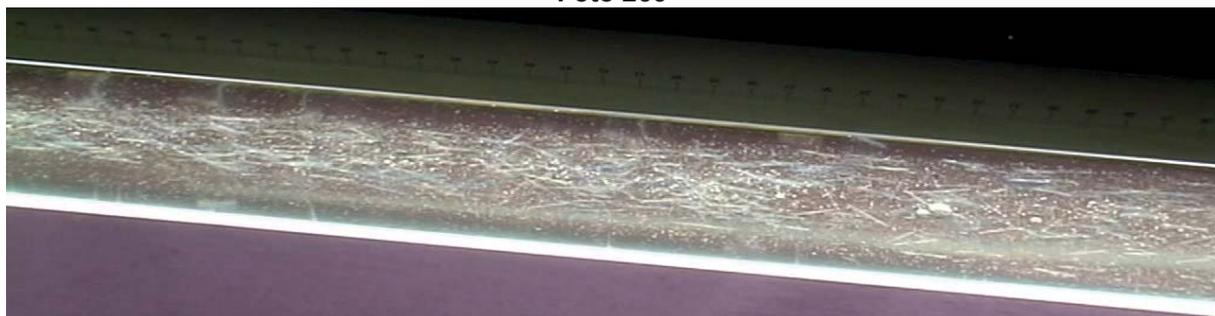


Foto 267

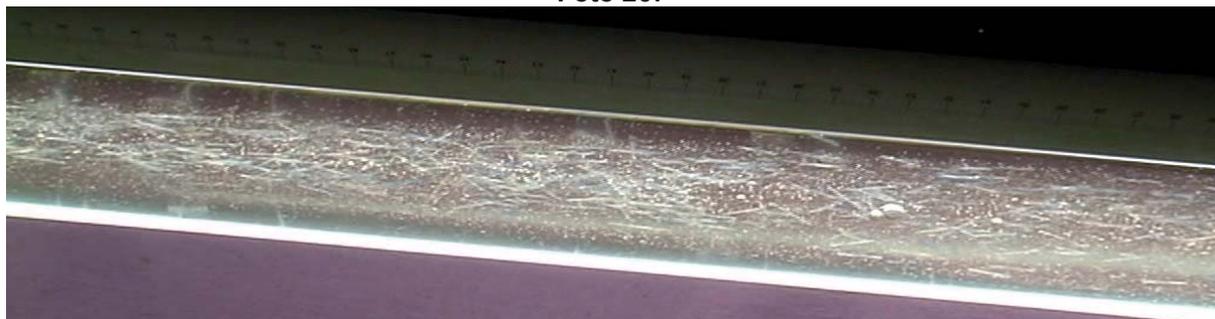


Foto 268

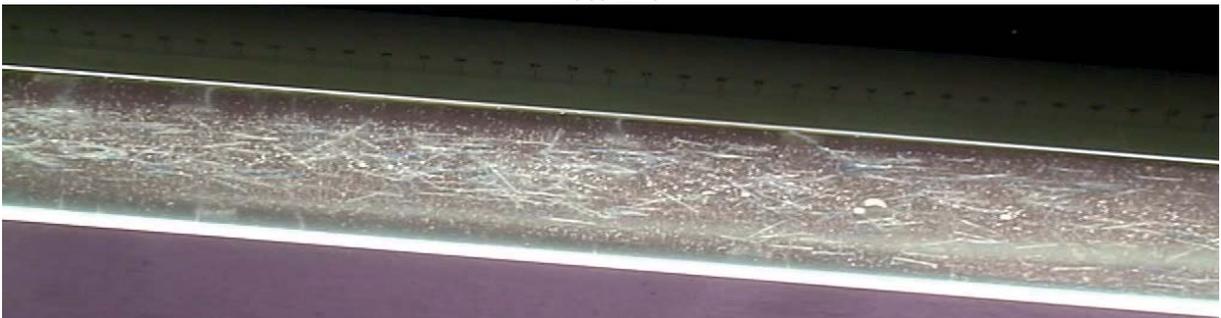
**Foto 269****Foto 270****Foto 271****Foto 272****Foto 273**



Foto 274



Foto 275



Foto 276



Foto 277



Foto 278

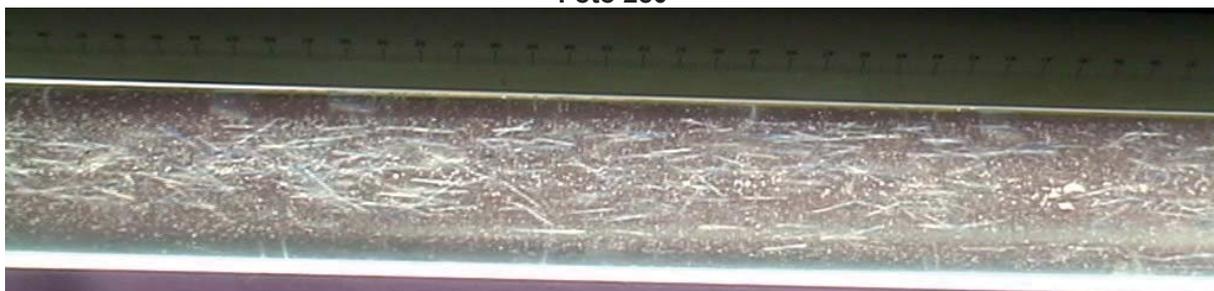
**Foto 279****Foto 280****Foto 281****Foto 282****Foto 283**



Foto 284



Foto 285



Foto 286

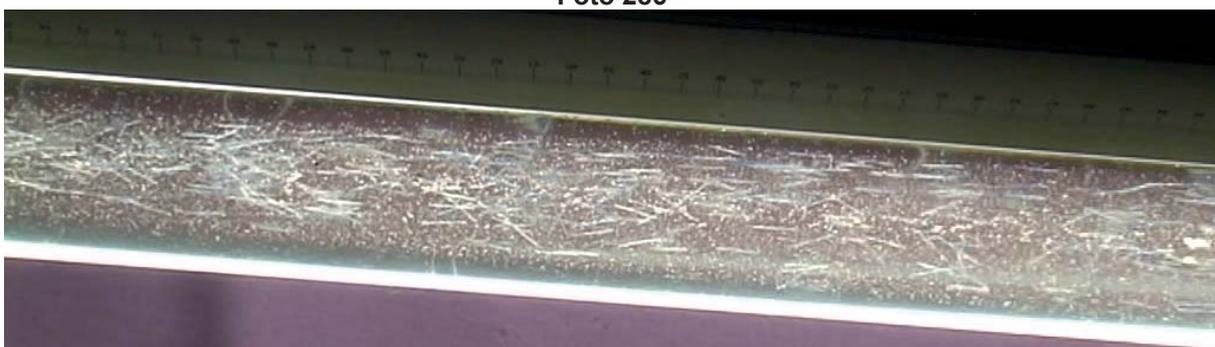


Foto 287



Foto 288

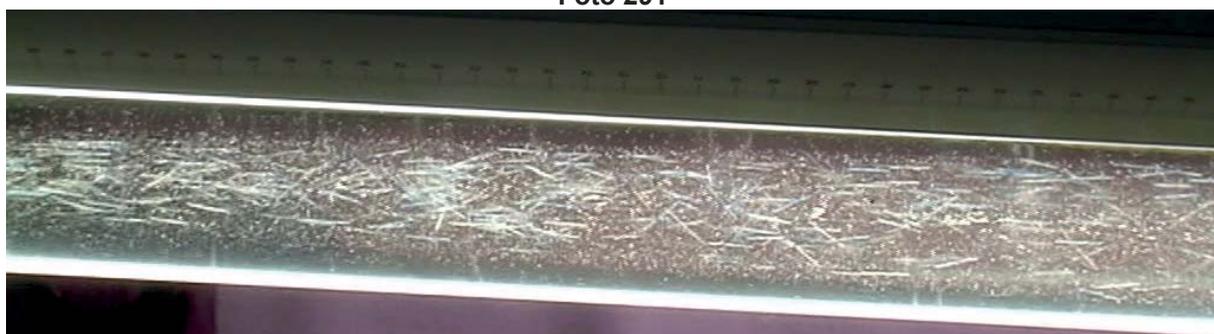
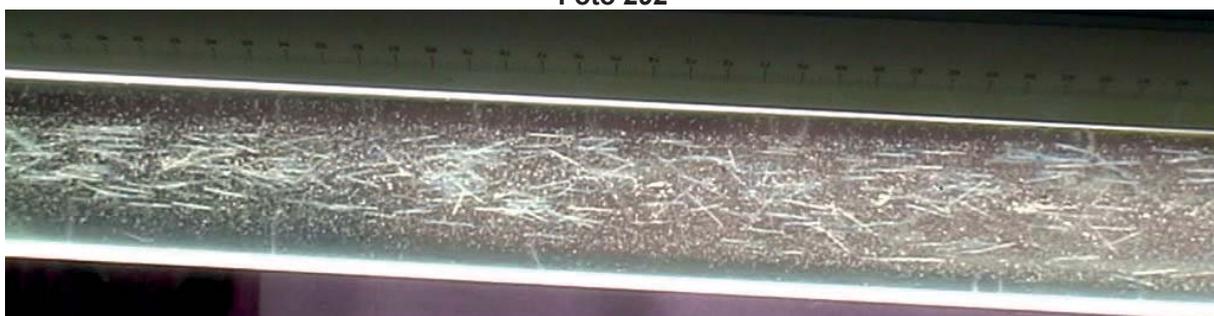
**Foto 289****Foto 290****Foto 291****Foto 292****Foto 293**



Foto 294

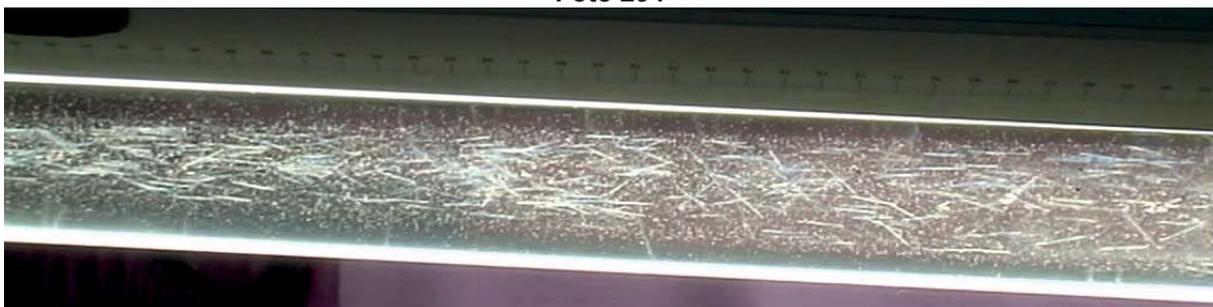


Foto 295

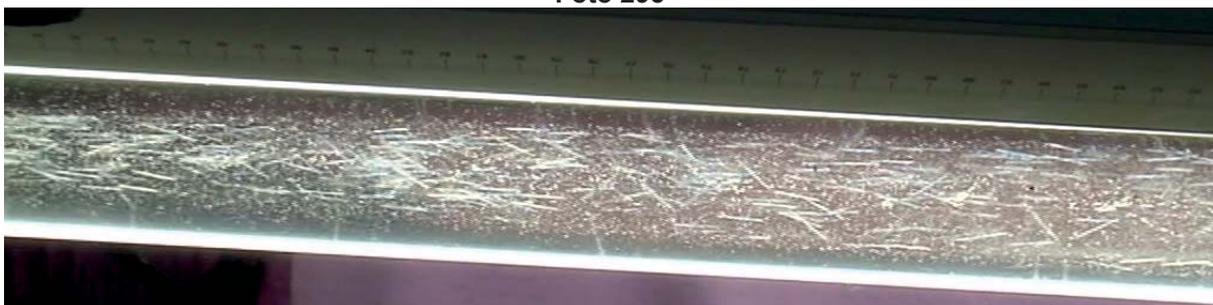


Foto 296

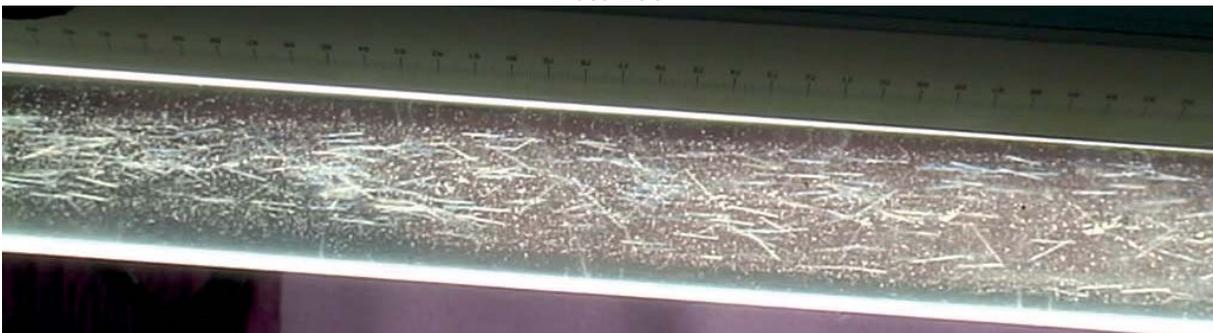


Foto 297

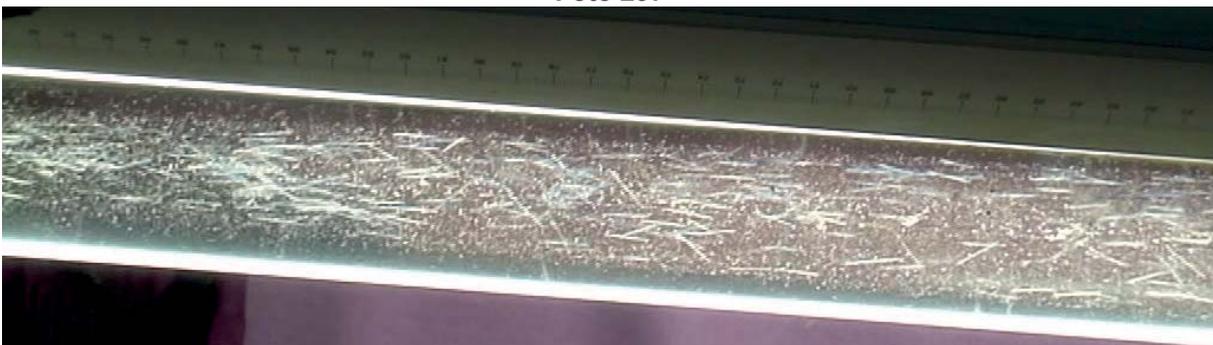
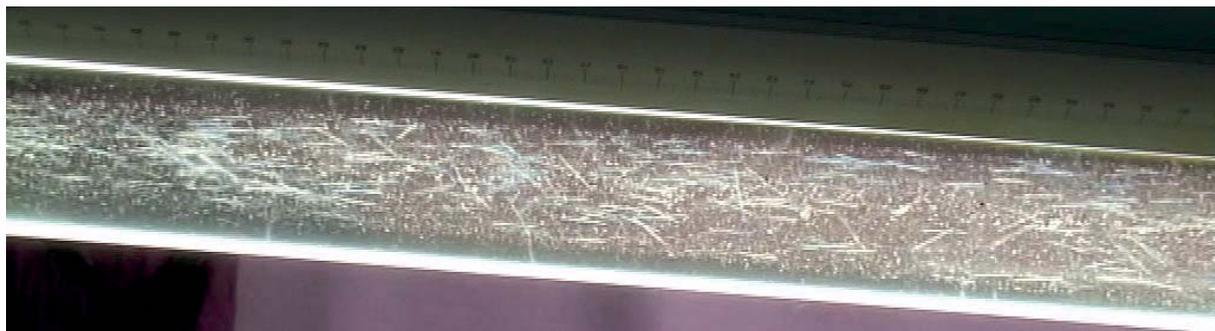
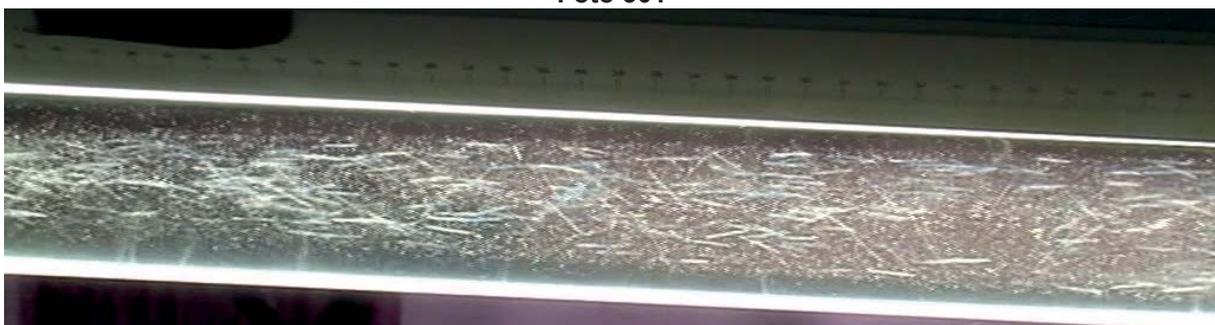
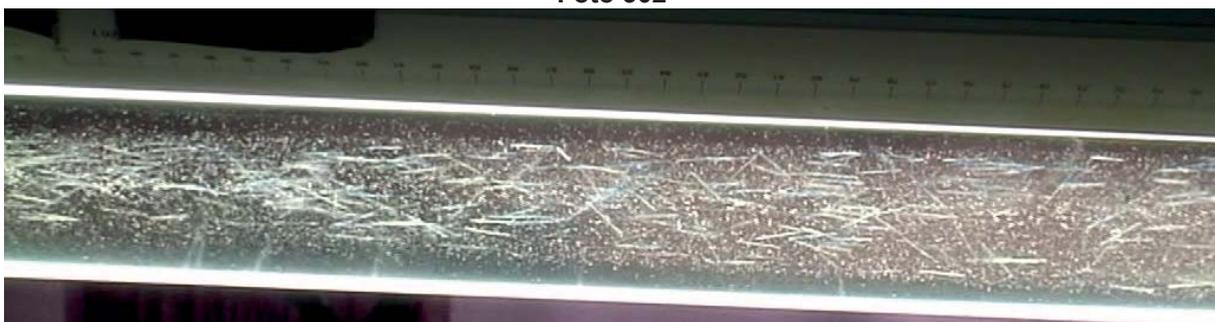


Foto 298

**Foto 299****Foto 300****Foto 301****Foto 302****Foto 303**

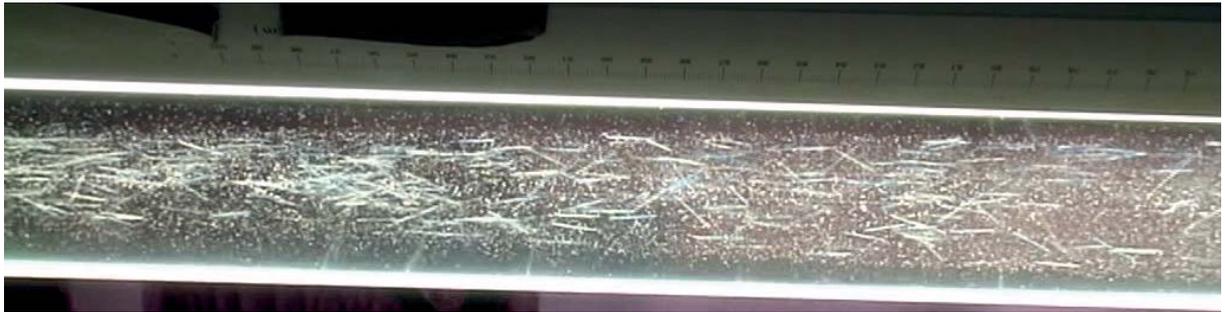


Foto 304

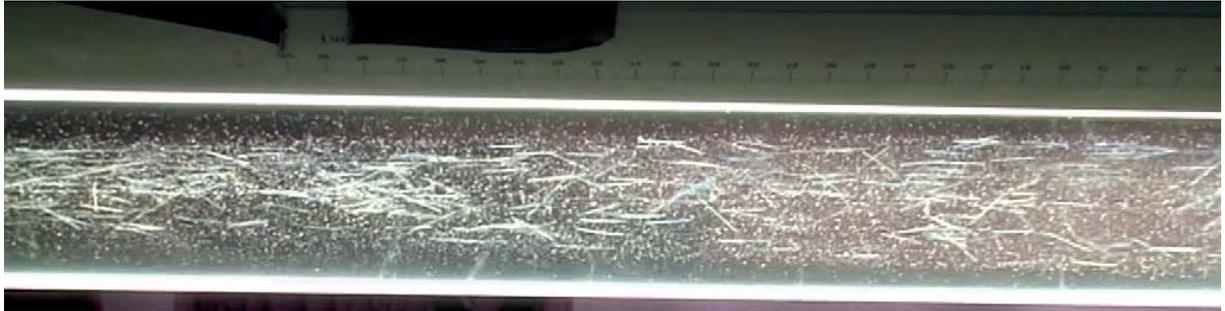


Foto 305

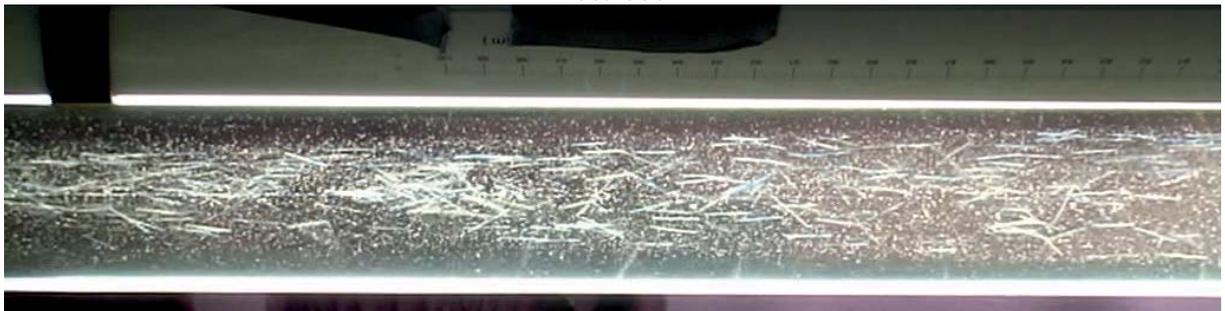


Foto 306

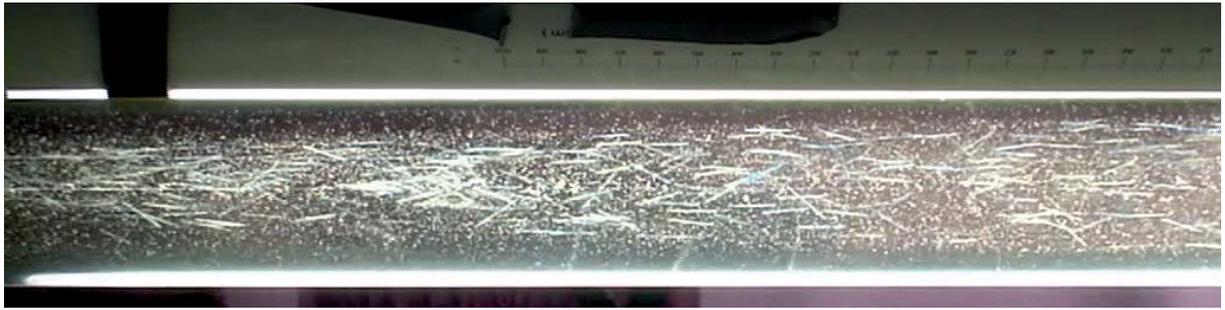


Foto 307

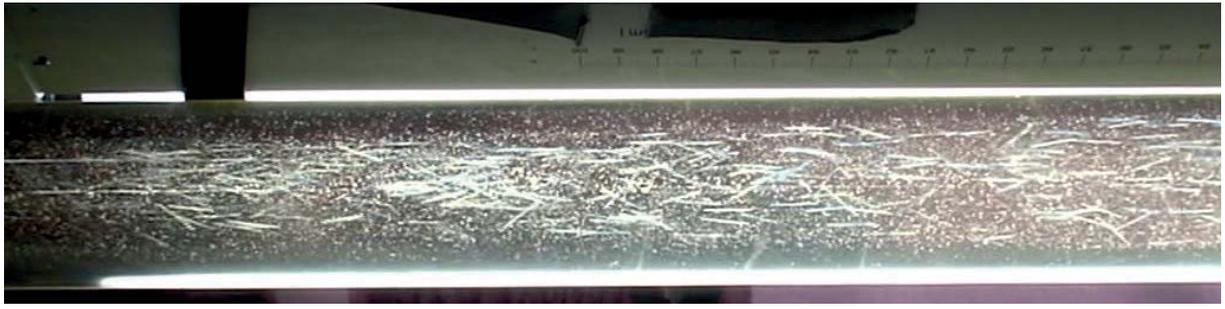


Foto 308

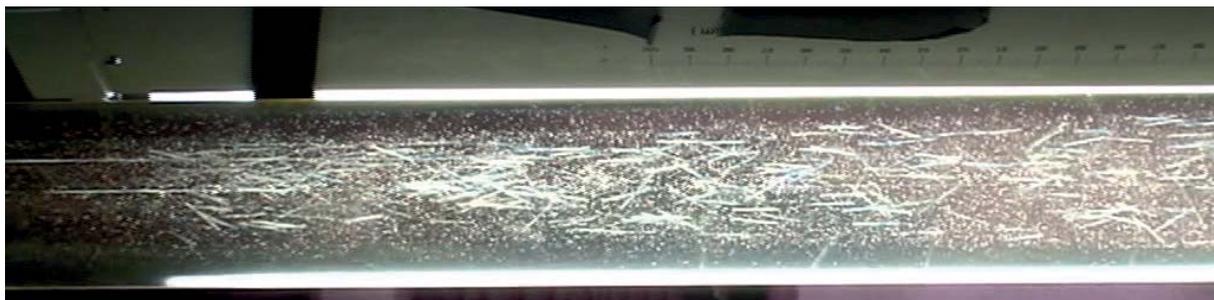


Foto 309



Foto 310



Foto 311



Foto 312



Foto 313



Foto 314

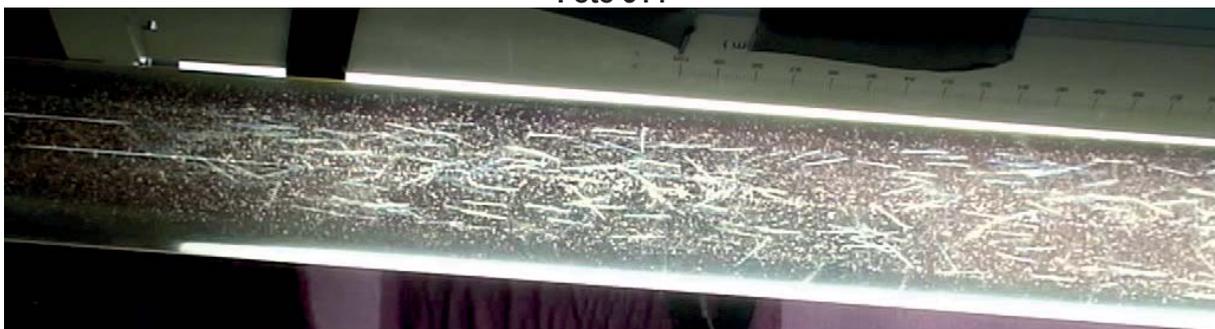


Foto 315



Foto 316



Foto 317



Foto 318

**Foto 319****Foto 320****Foto 321****Foto 322****Foto 323**

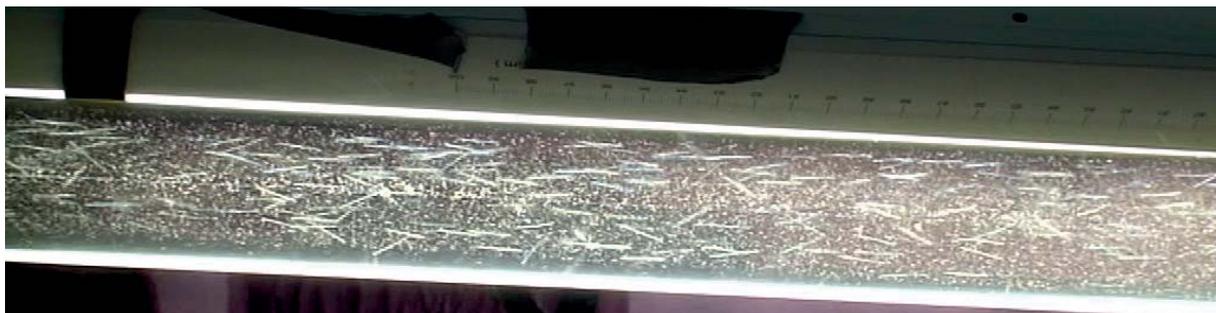


Foto 324

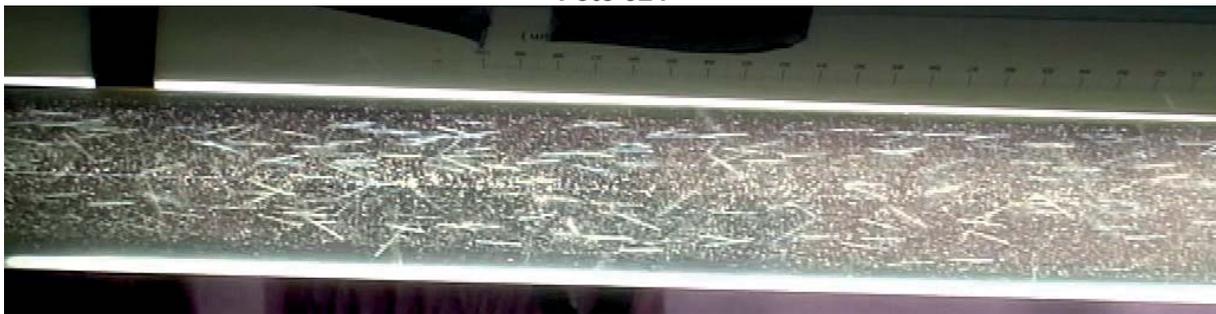


Foto 325



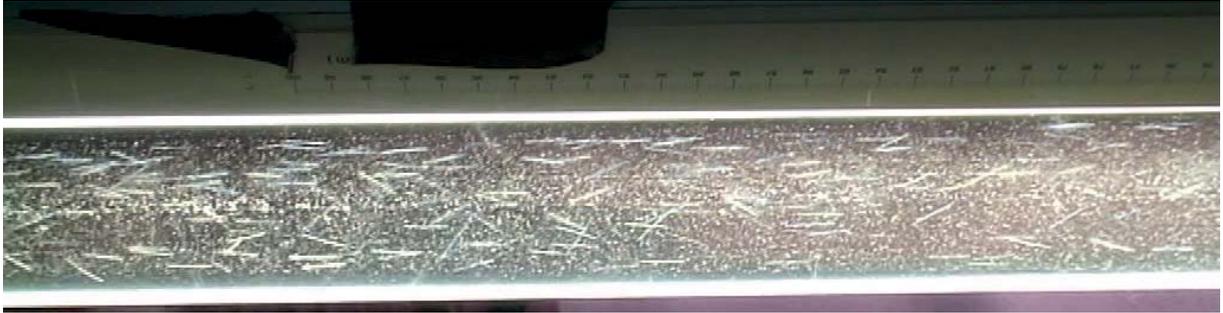
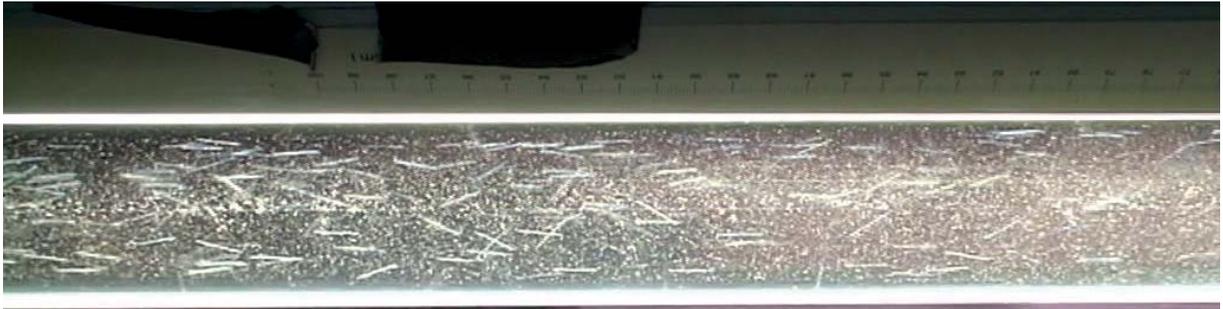
Foto 326



Foto 327



Foto 328

**Foto 329****Foto 330****Foto 331****Foto 332****Foto 333**

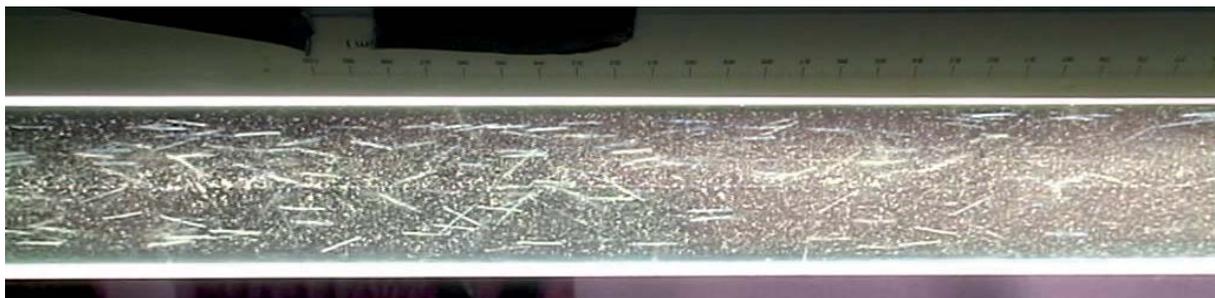


Foto 334

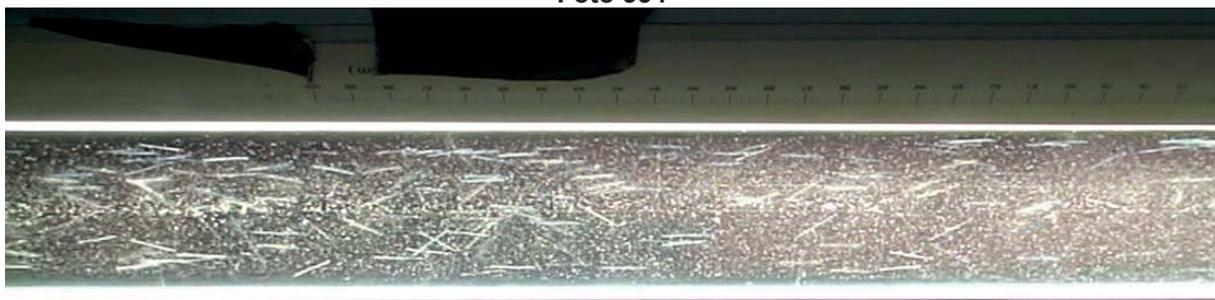


Foto 335



Foto 336



Foto 337



Foto 338

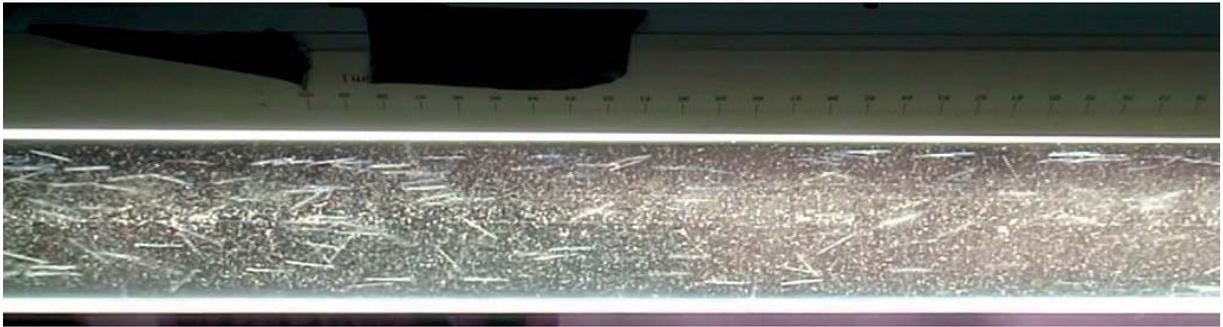
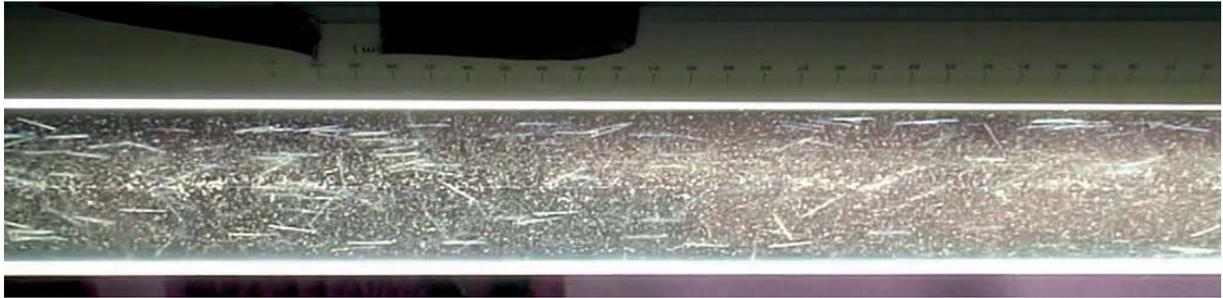
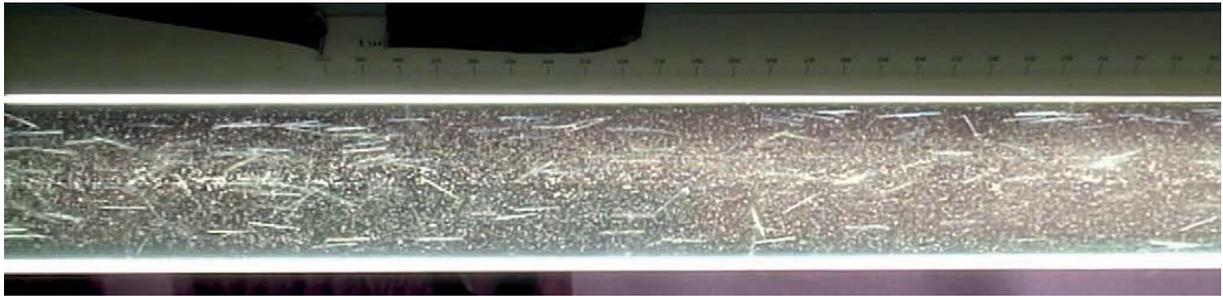
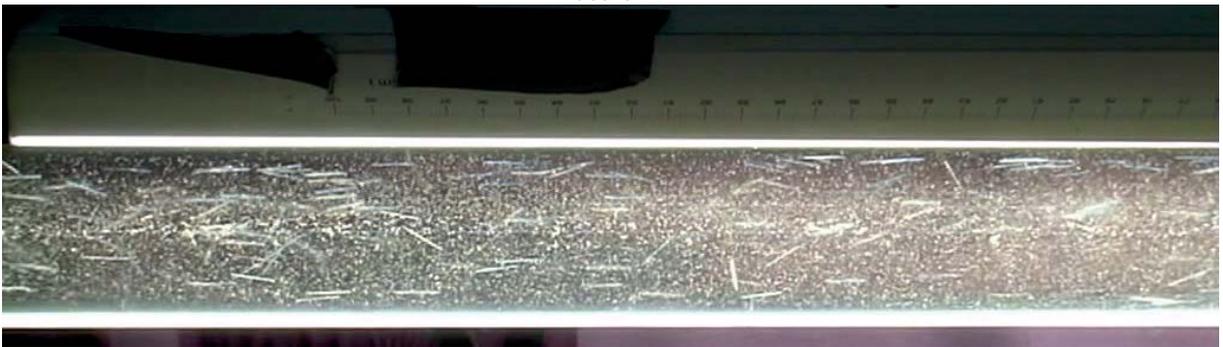
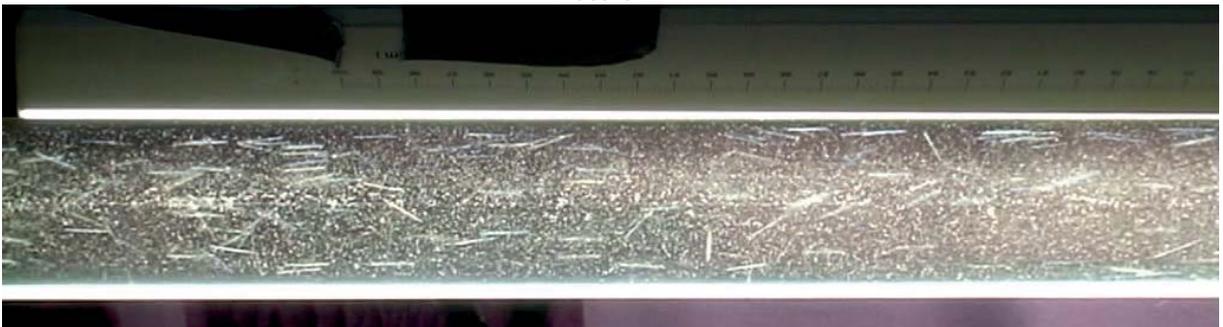
**Foto 339****Foto 340****Foto 341****Foto 342****Foto 343**



Foto 344

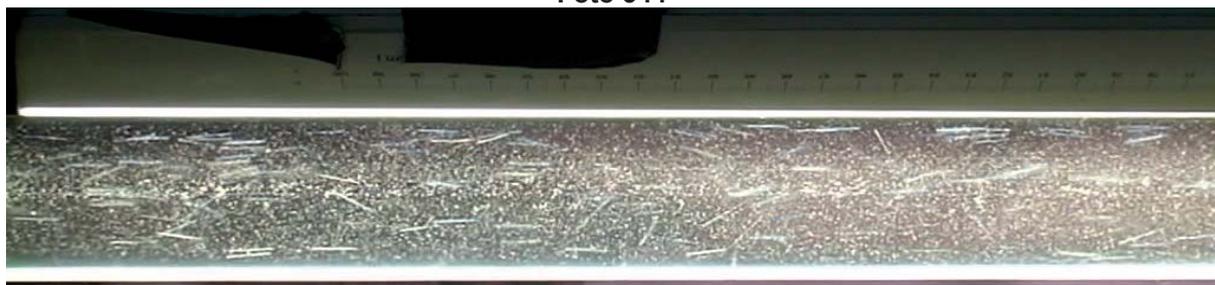


Foto 345



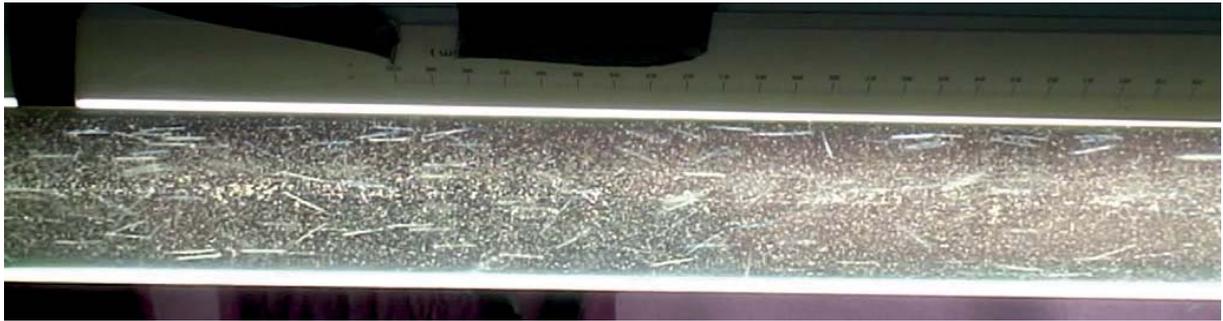
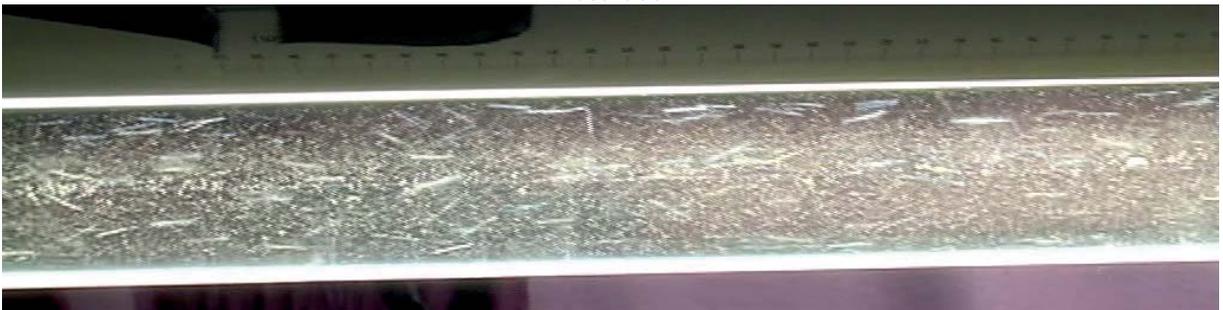
Foto 346



Foto 347



Foto 348

**Foto 349****Foto 350****Foto 351****Foto 352****Foto 353**

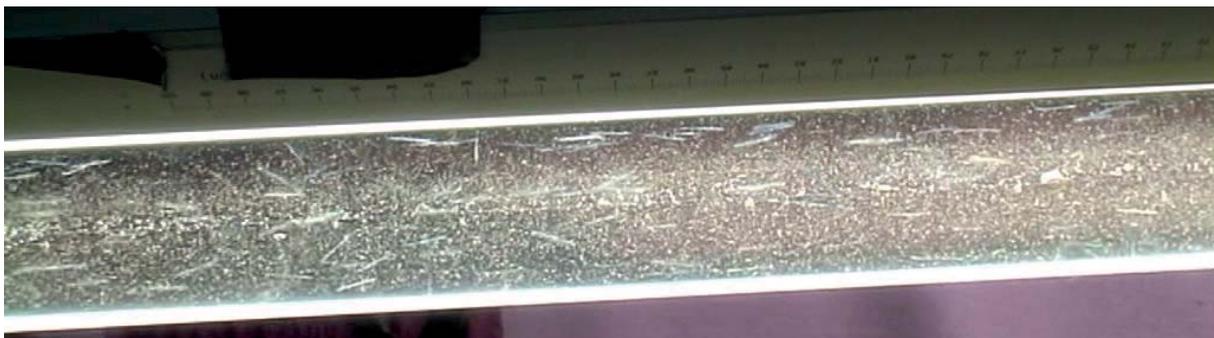


Foto 354



Foto 355



Foto 356

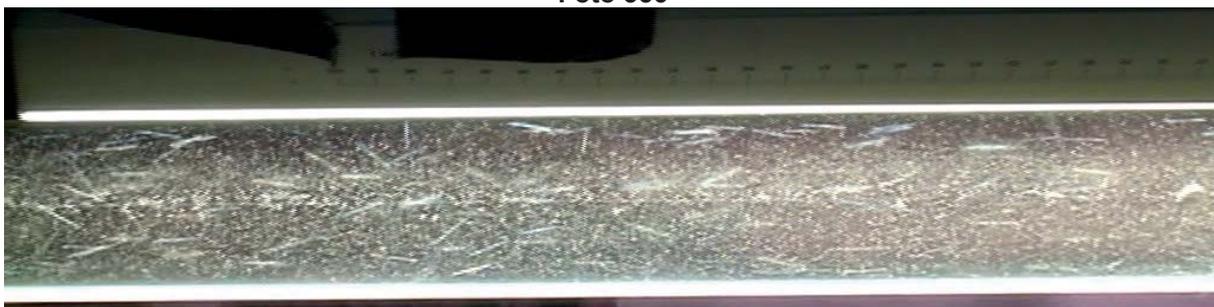


Foto 357



Foto 358

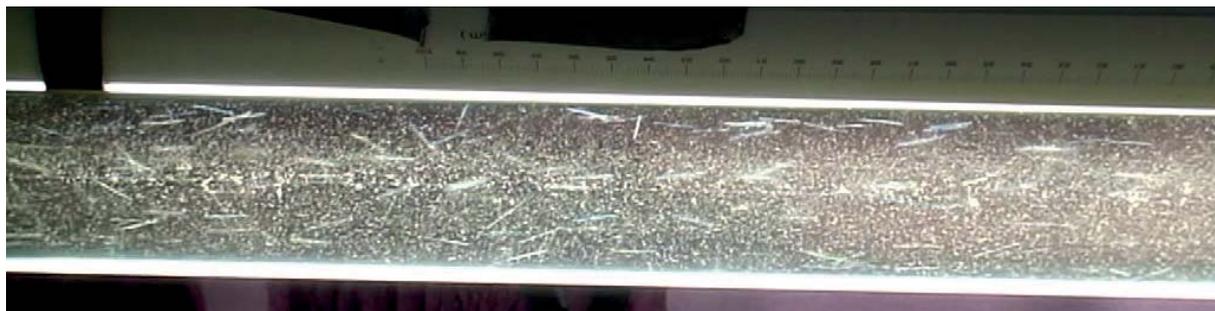


Foto 359

VERSUCH: ROHR 3 – STATISTISCHE AUSWERTUNG

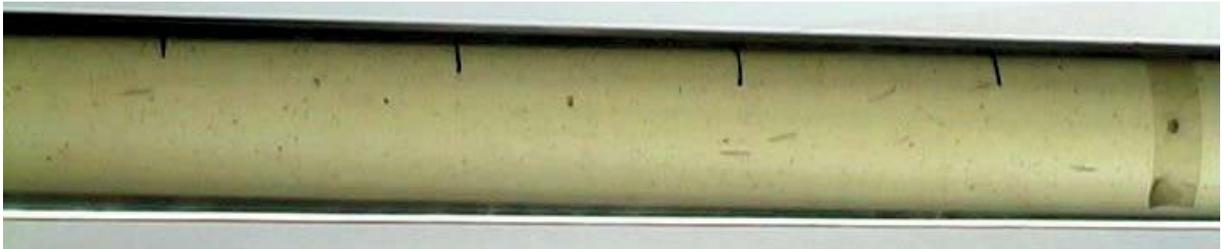


Foto 360



Foto 361

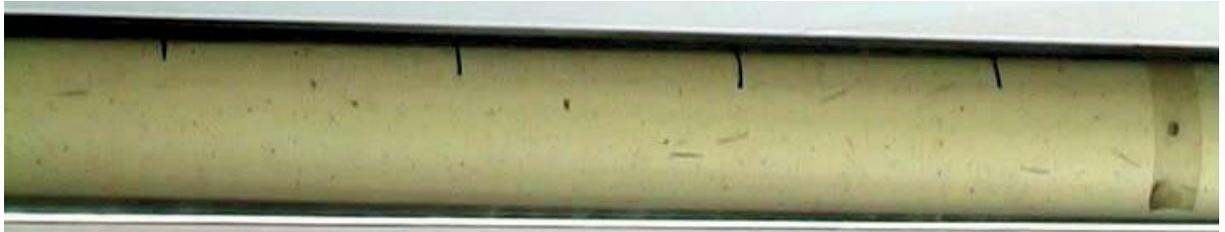


Foto 362

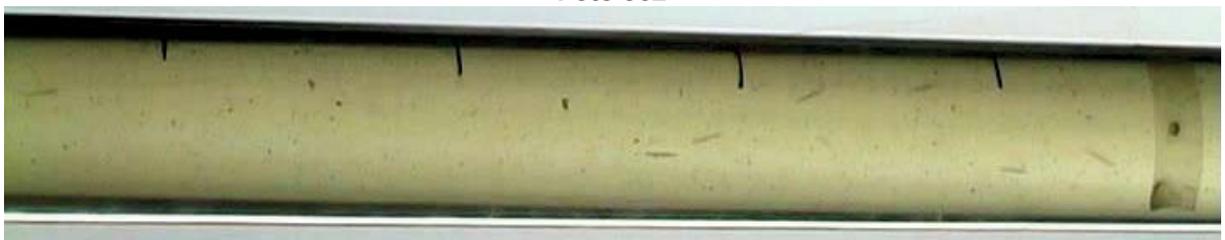


Foto 363

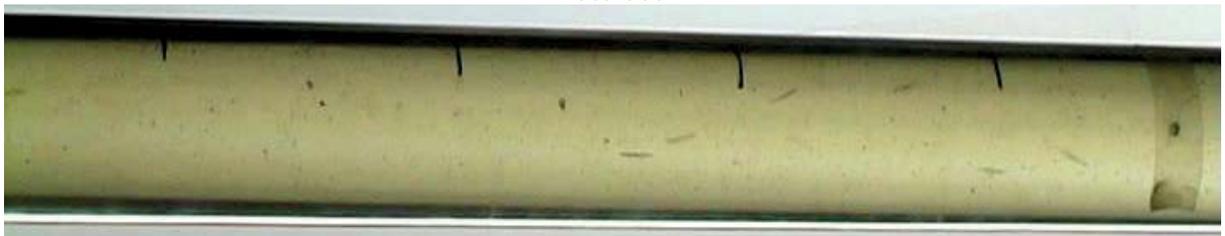


Foto 364



Foto 365

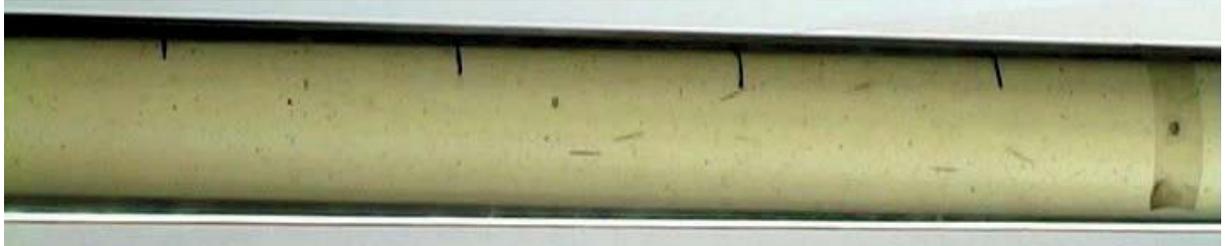


Foto 366

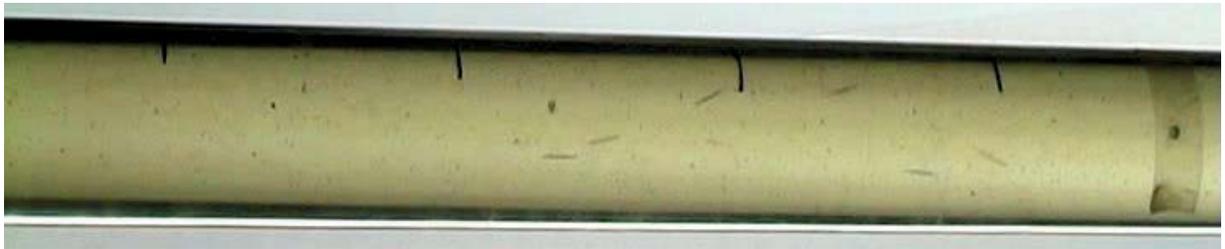


Foto 367

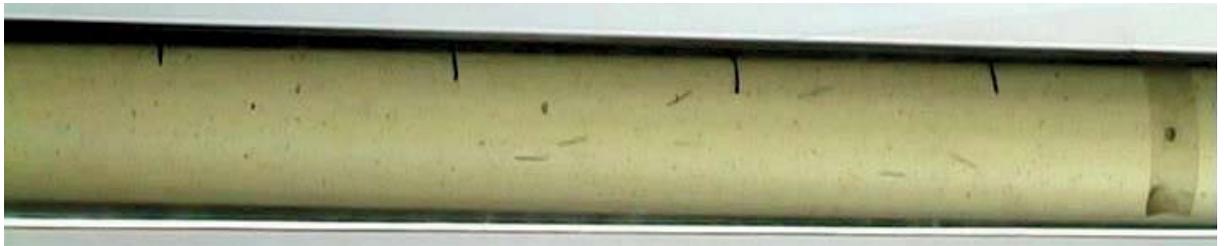


Foto 368



Foto 369

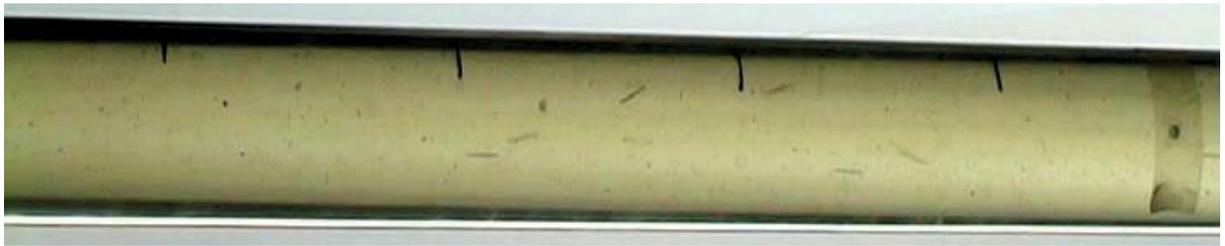


Foto 370



Foto 371



Foto 372



Foto 373



Foto 374

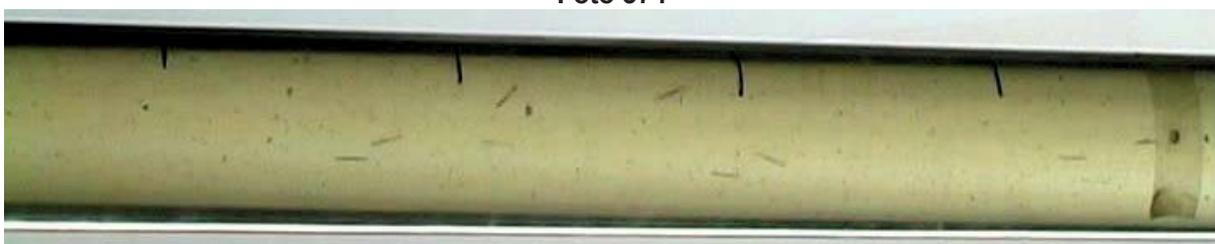


Foto 375



Foto 376



Foto 377



Foto 378



Foto 379



Foto 380



Foto 381



Foto 382



Foto 383



Foto 384



Foto 385

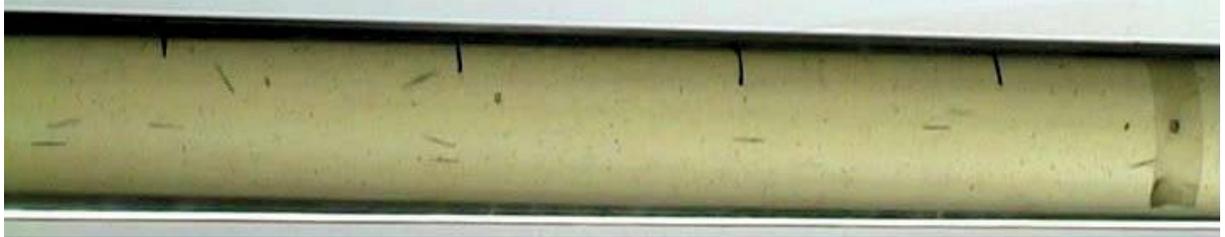


Foto 386



Foto 387

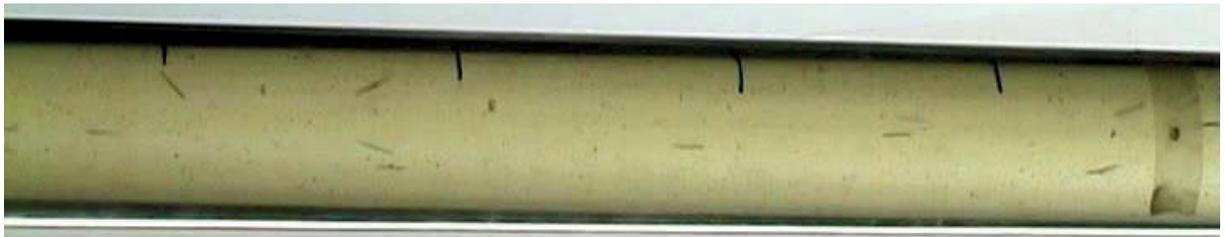


Foto 388

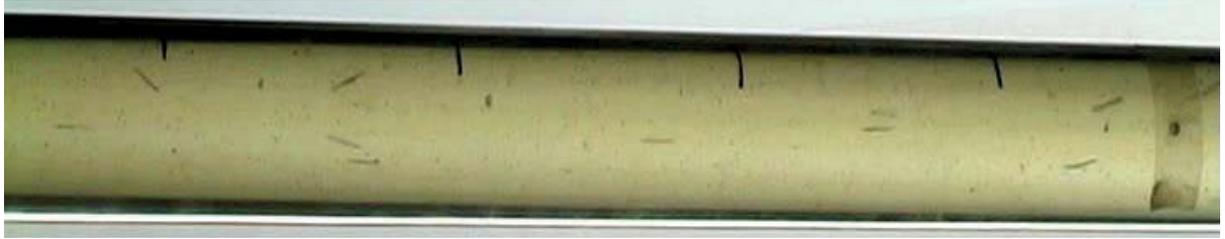
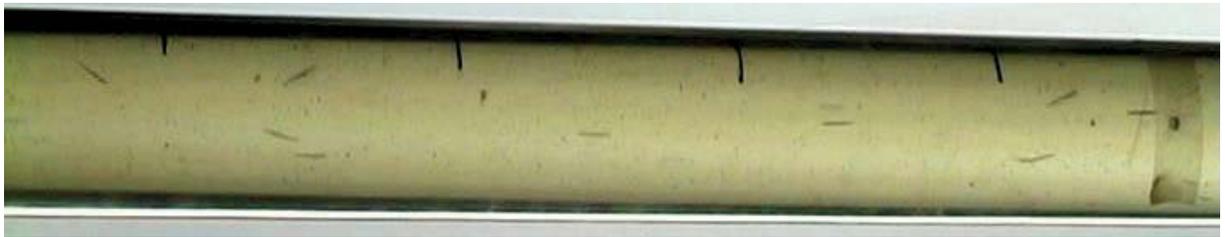
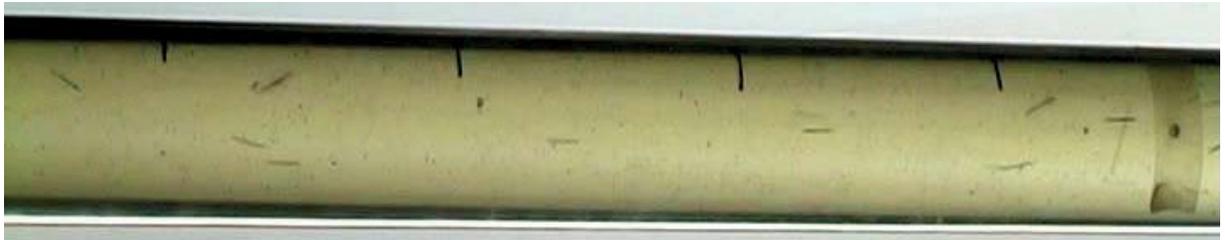
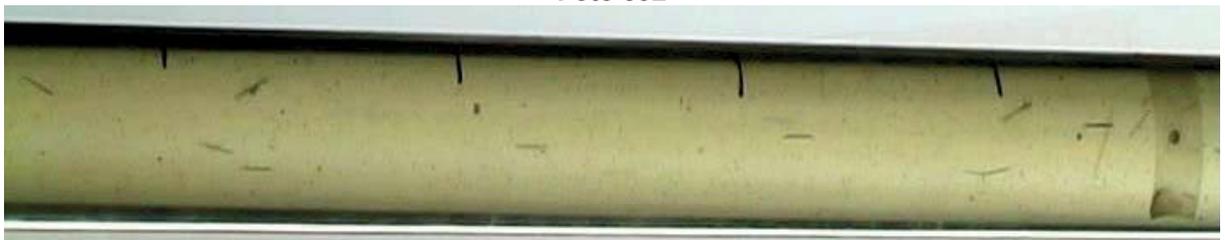
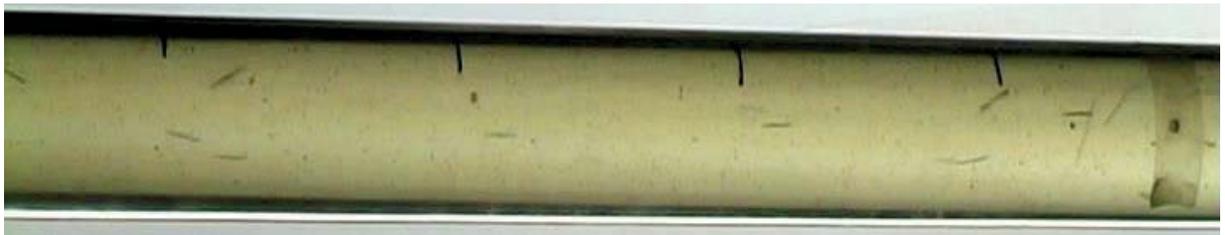
**Foto 389****Foto 390****Foto 391****Foto 392****Foto 393****Foto 394**



Foto 395

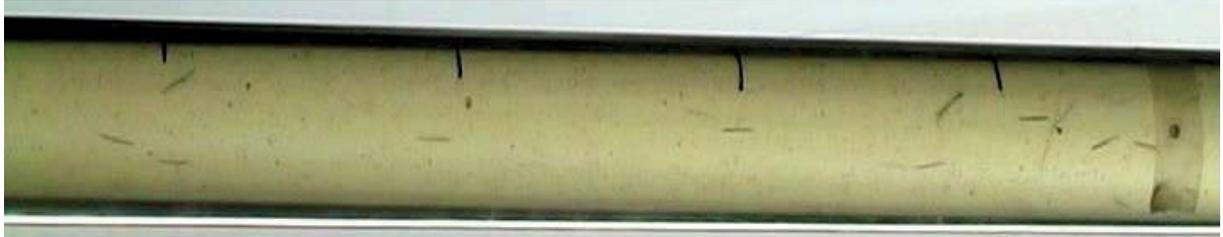


Foto 396

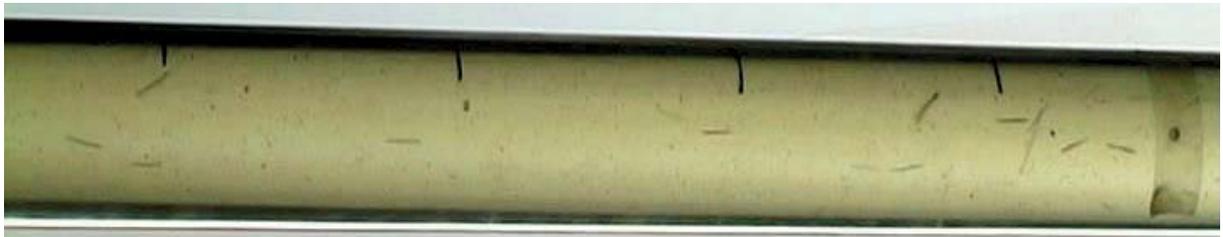


Foto 397

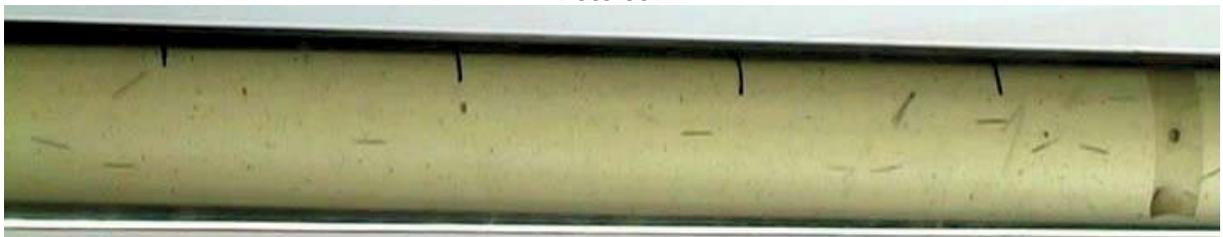


Foto 398

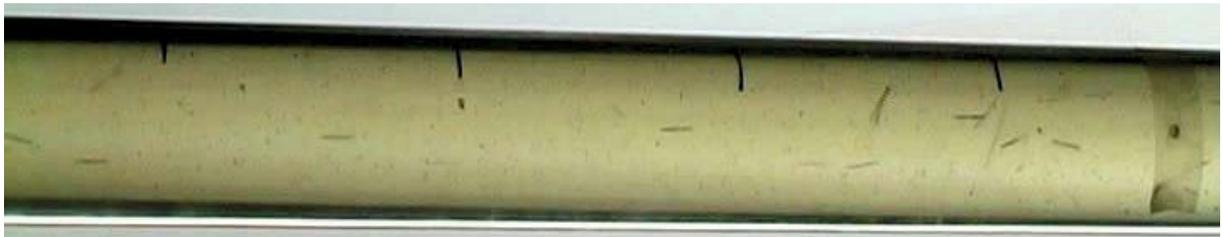


Foto 399

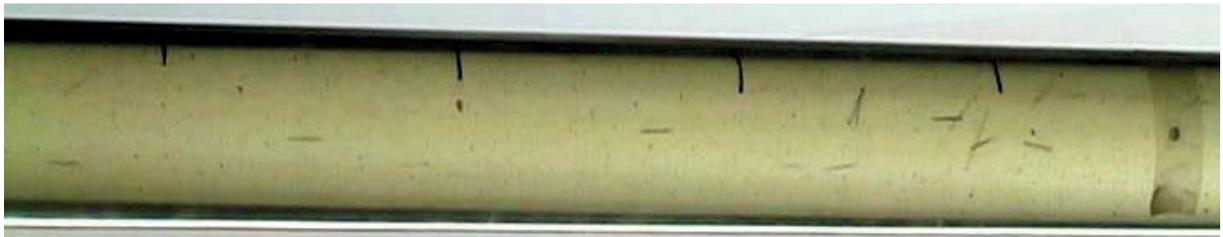


Foto 400

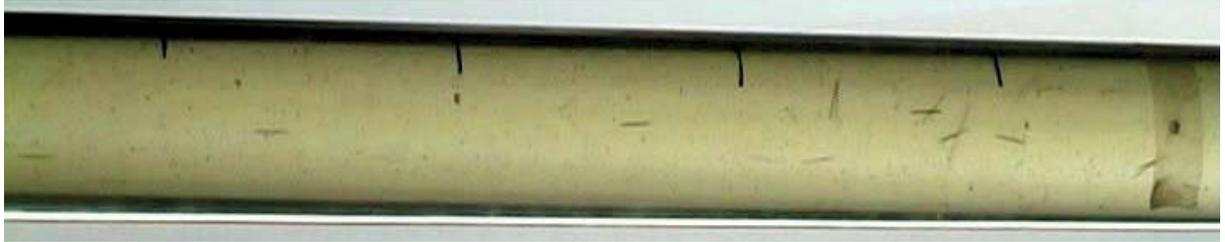


Foto 401

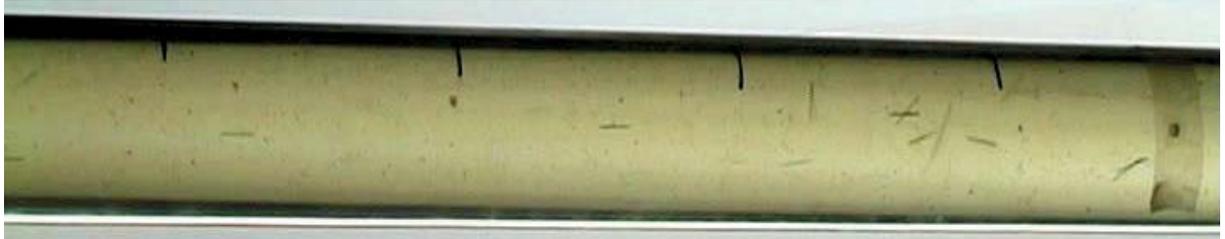


Foto 402



Foto 403



Foto 404

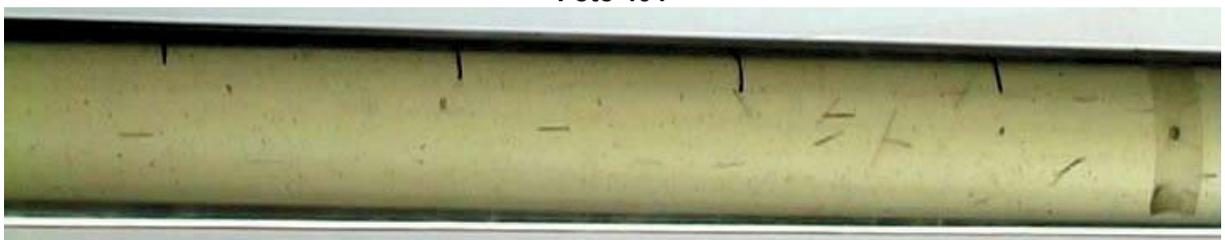


Foto 405



Foto 406



Foto 407



Foto 408



Foto 409



Foto 410

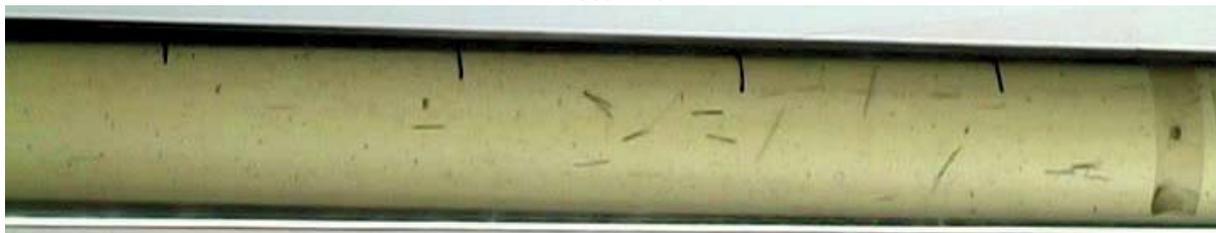


Foto 411

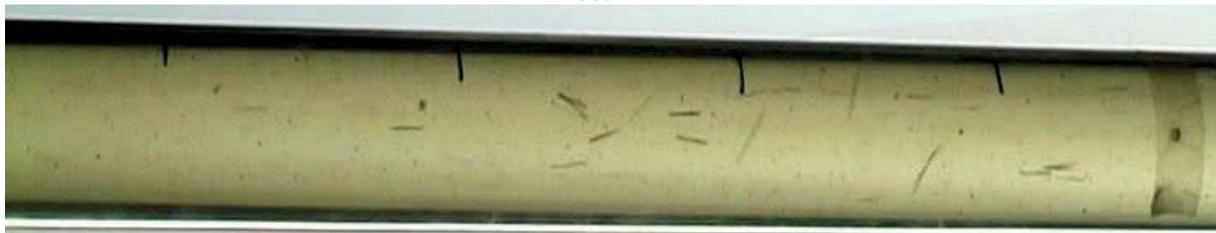


Foto 412

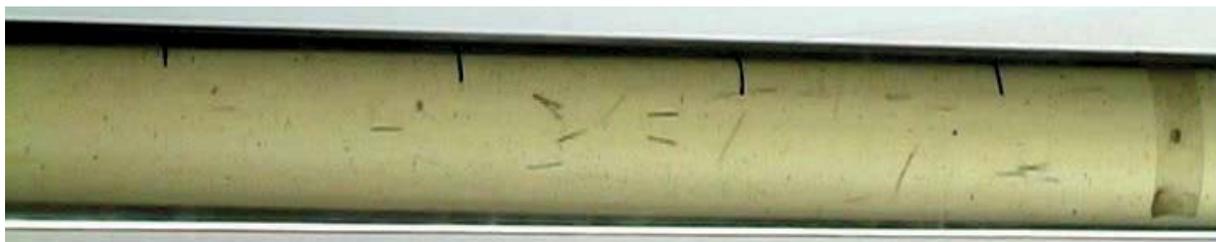


Foto 413

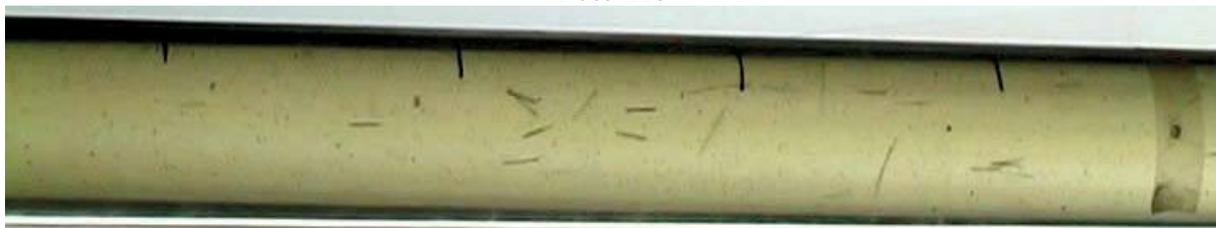


Foto 414

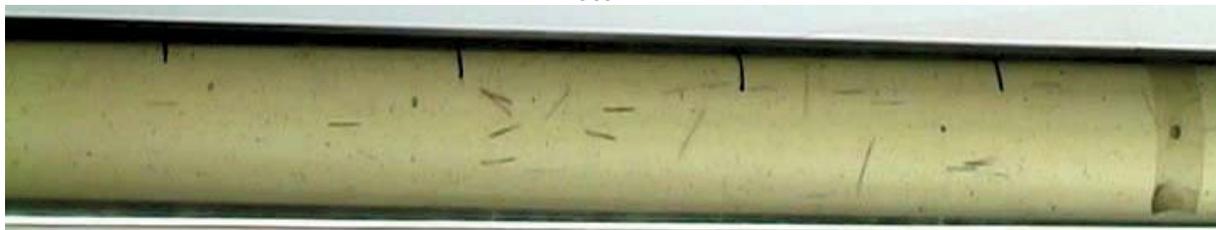


Foto 415

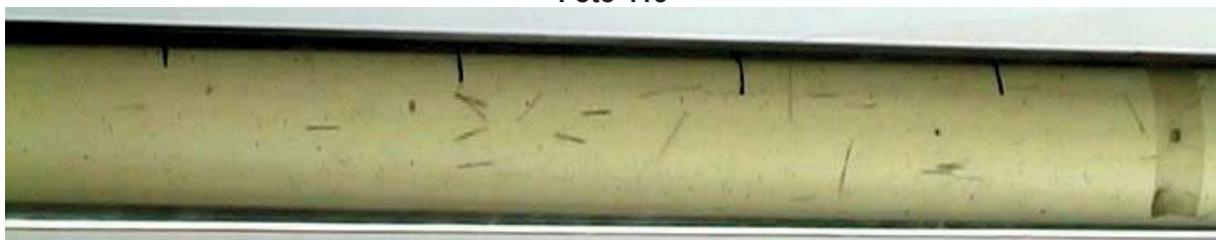


Foto 416



Foto 417



Foto 418



Foto 419



Foto 420

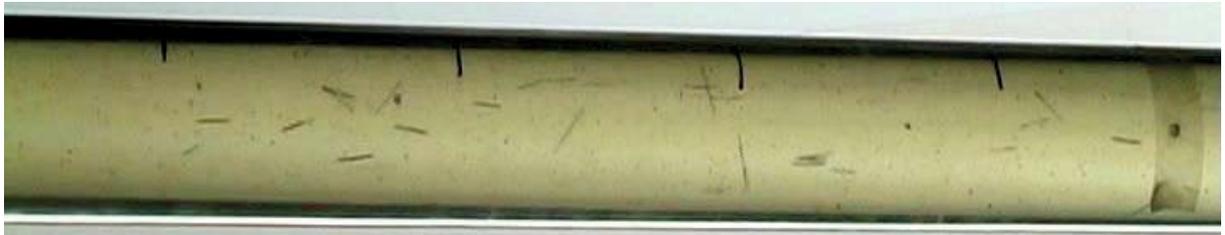


Foto 421



Foto 422

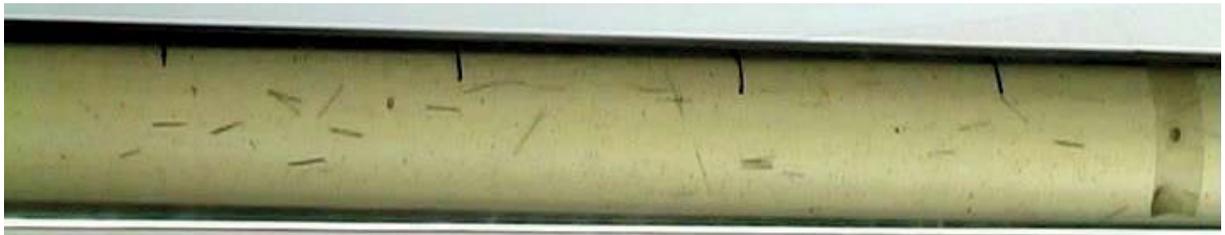
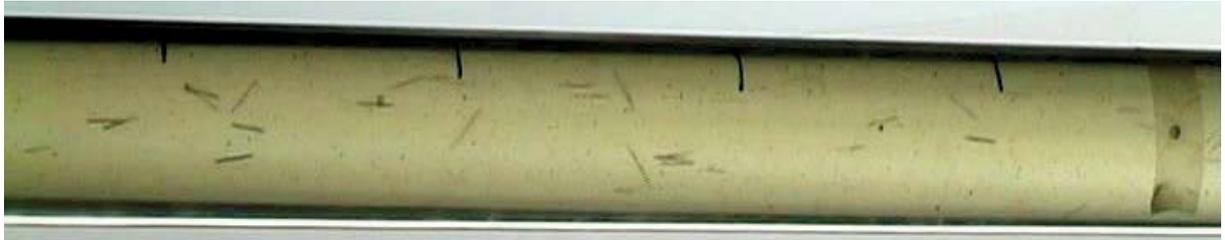
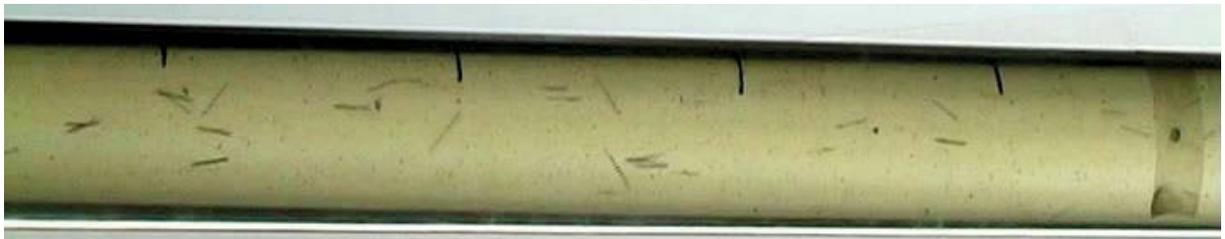
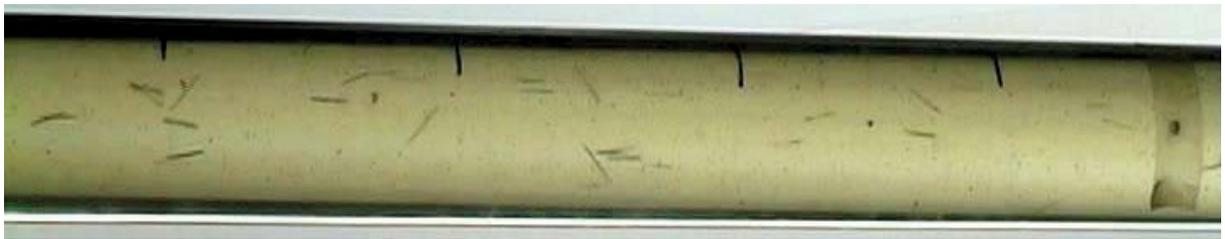
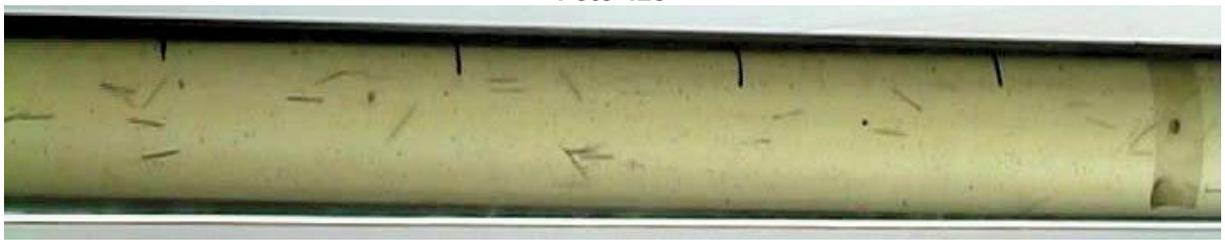
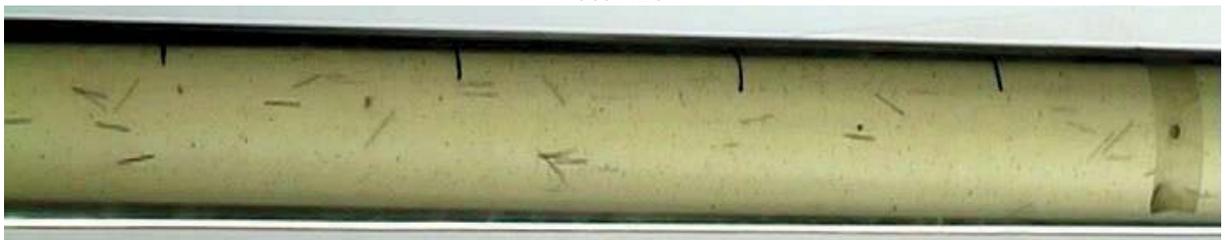


Foto 423



Foto 424

**Foto 425****Foto 426****Foto 427****Foto 428****Foto 429****Foto 430**

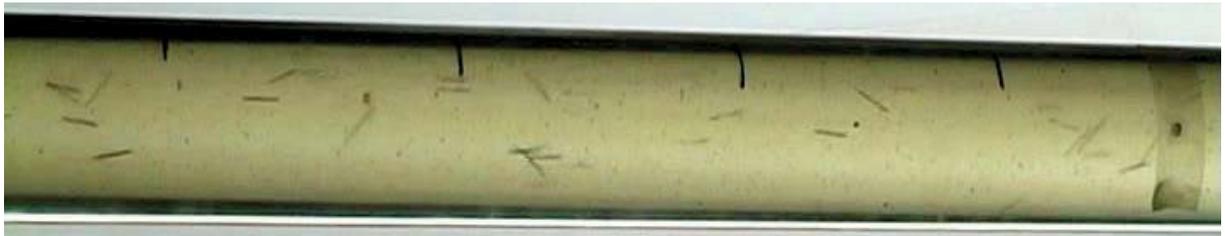


Foto 431

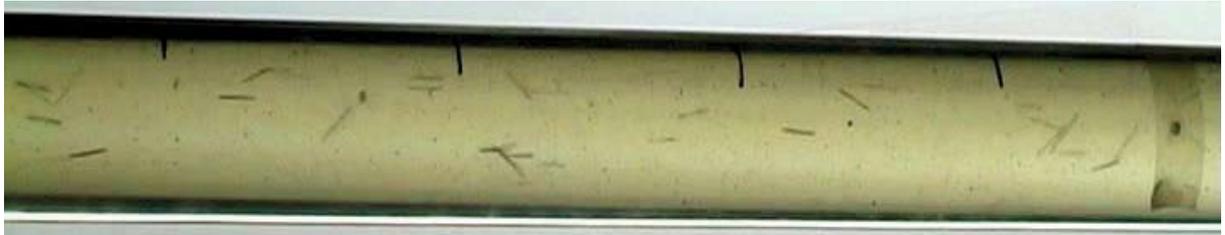


Foto 432

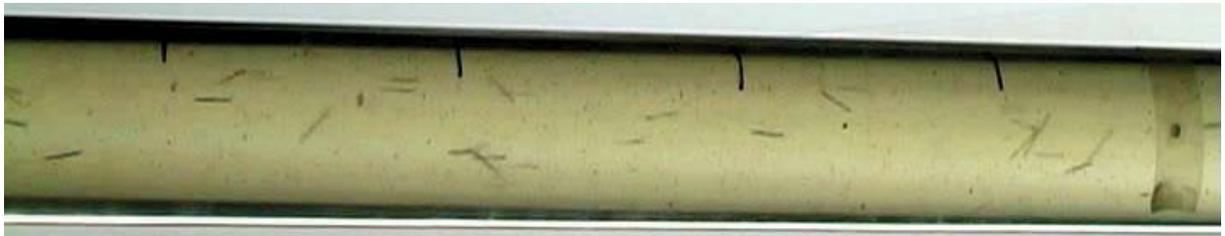


Foto 433

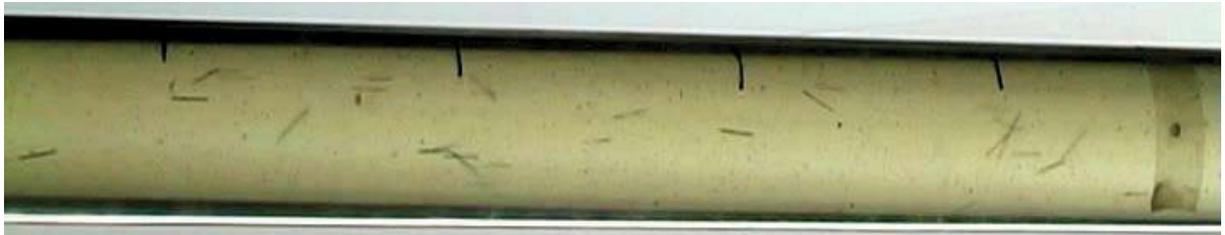


Foto 434

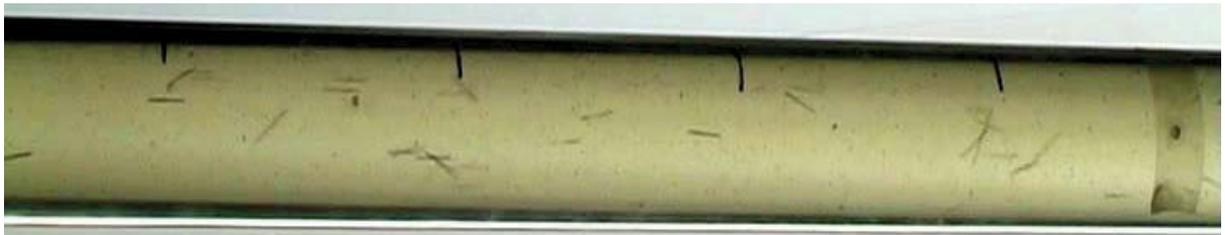


Foto 435

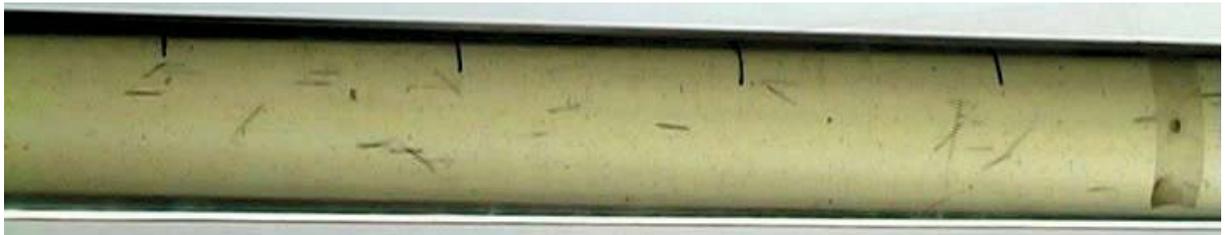


Foto 436

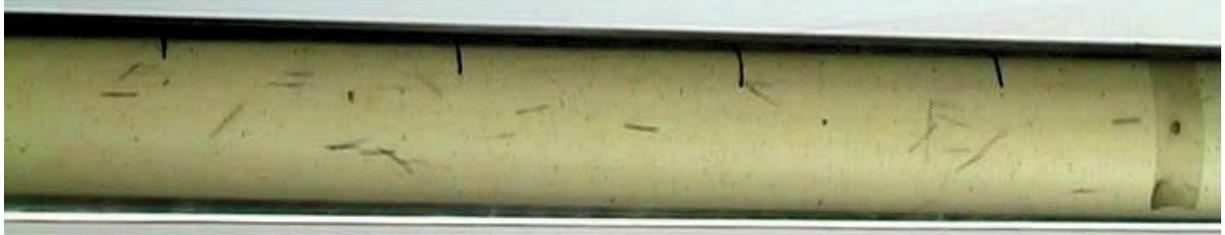
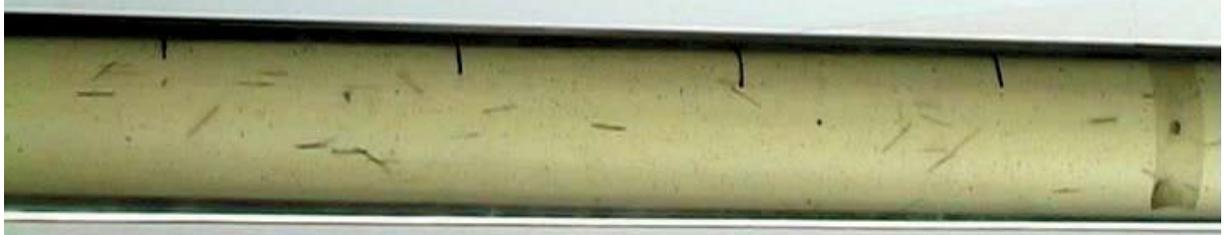
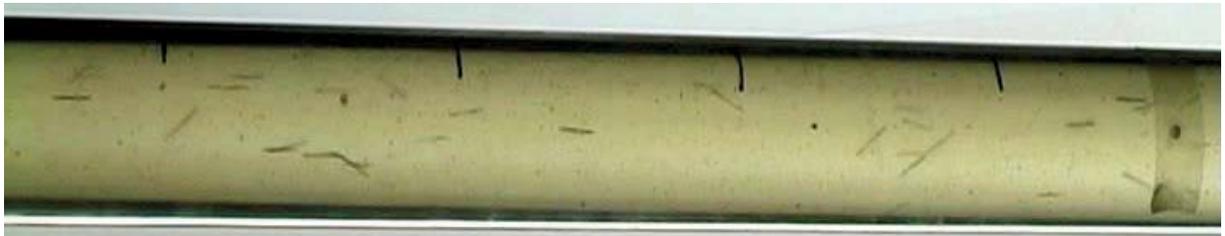
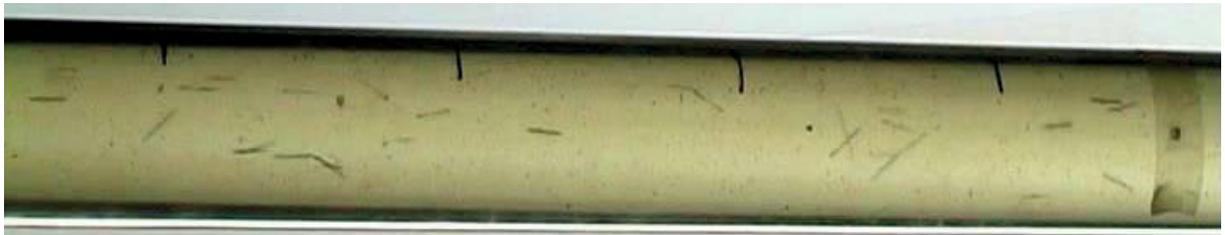
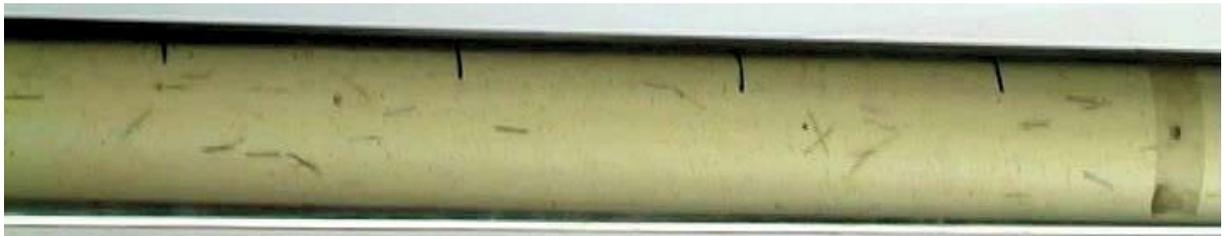
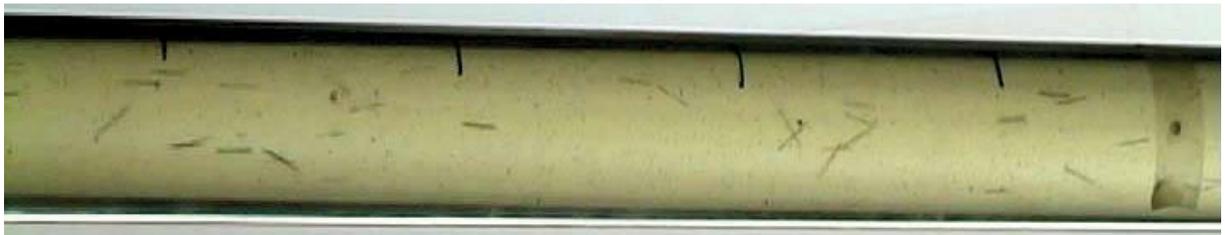
**Foto 437****Foto 438****Foto 439****Foto 440****Foto 441****Foto 442**



Foto 443

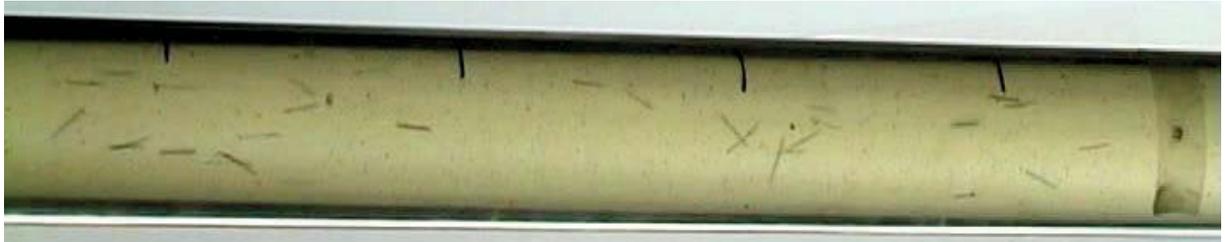


Foto 444

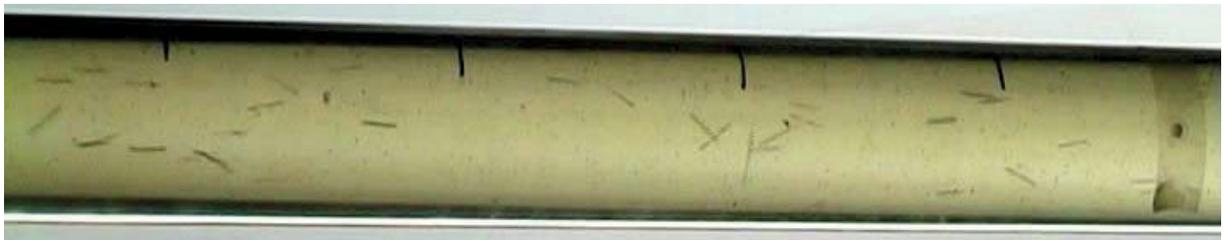


Foto 445

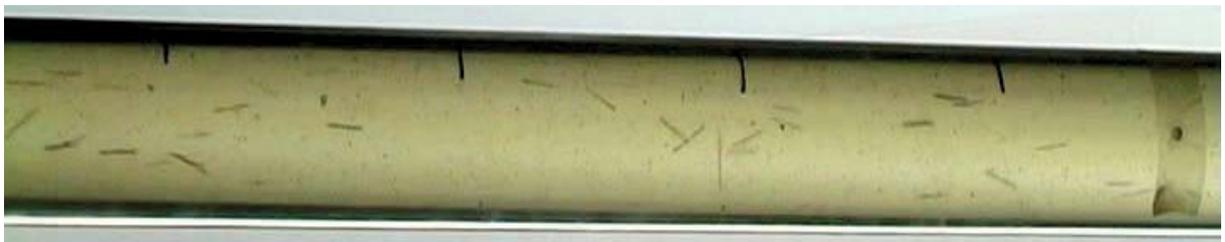


Foto 446



Foto 447



Foto 448



Foto 449



Foto 450

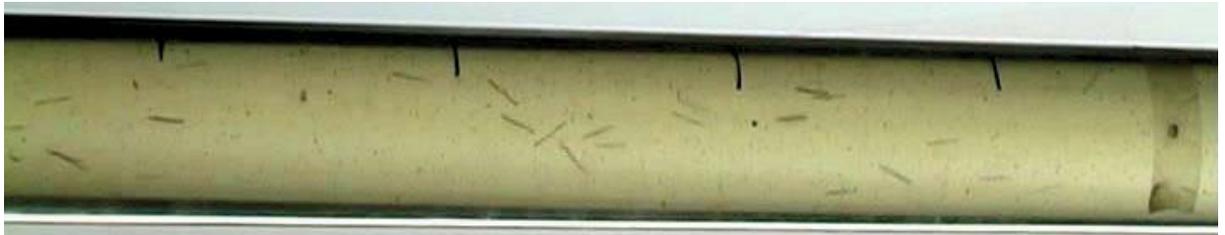


Foto 451



Foto 452



Foto 453

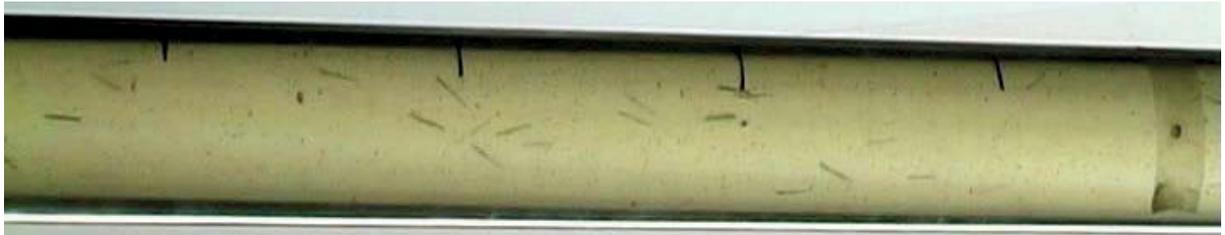


Foto 454

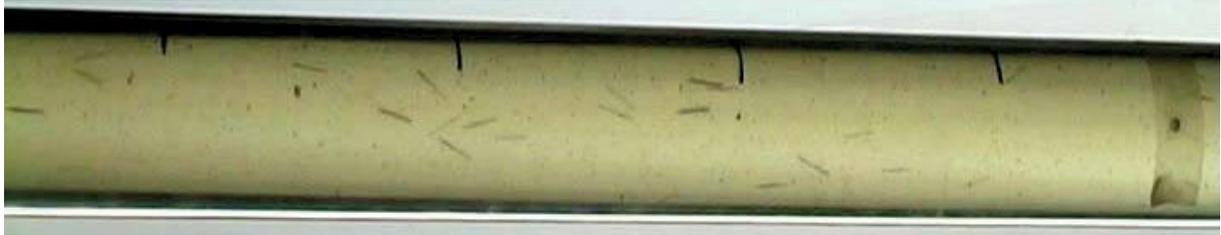


Foto 455

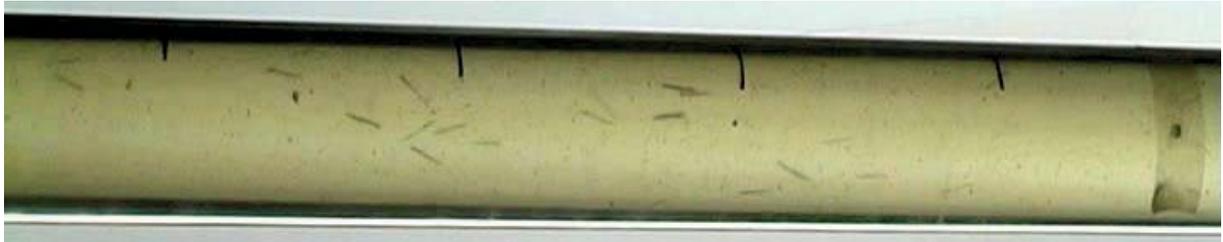


Foto 456

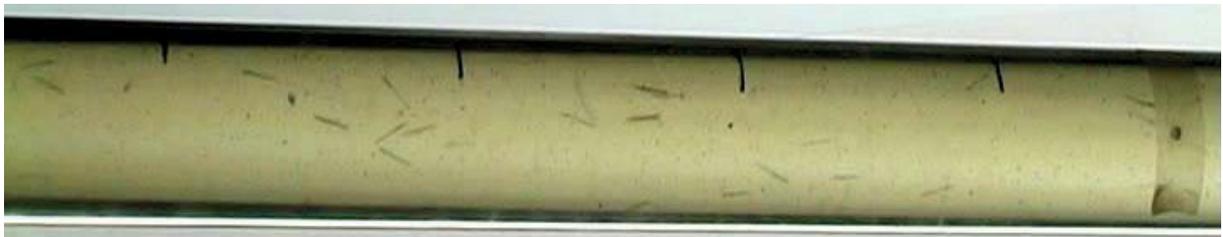


Foto 457

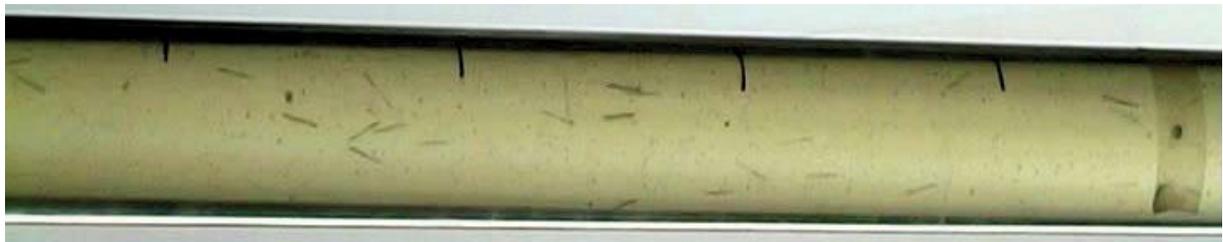


Foto 458

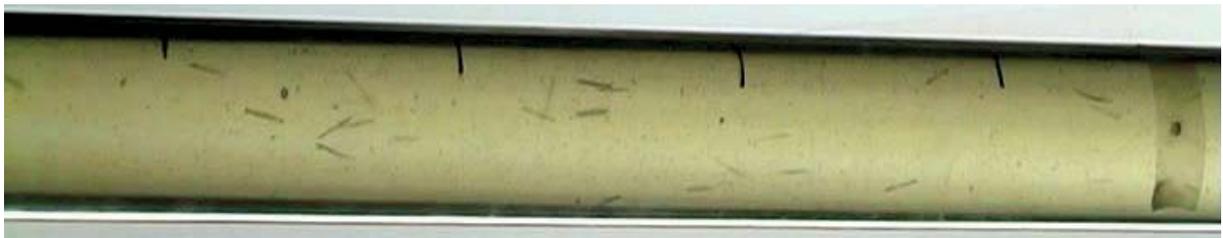


Foto 459



Foto 460

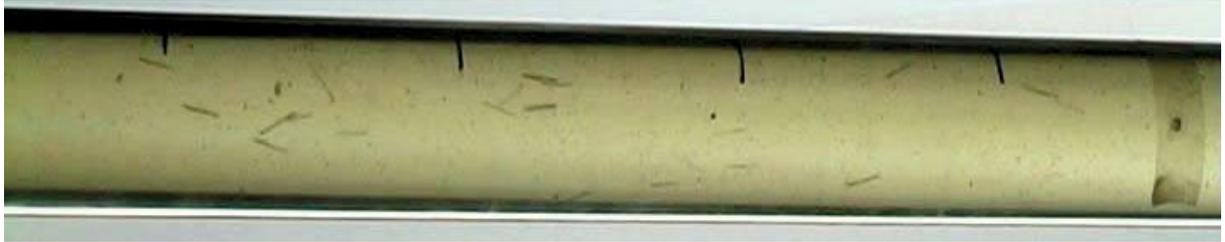


Foto 461



Foto 462

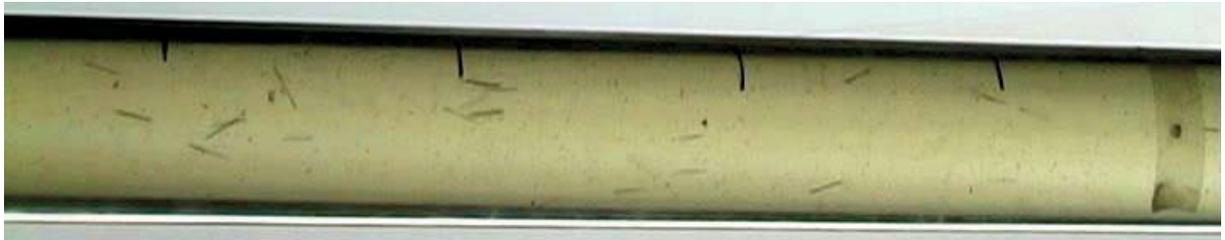


Foto 463

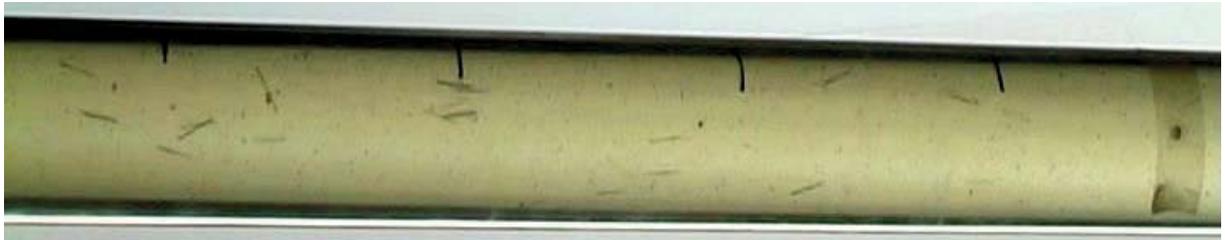


Foto 464

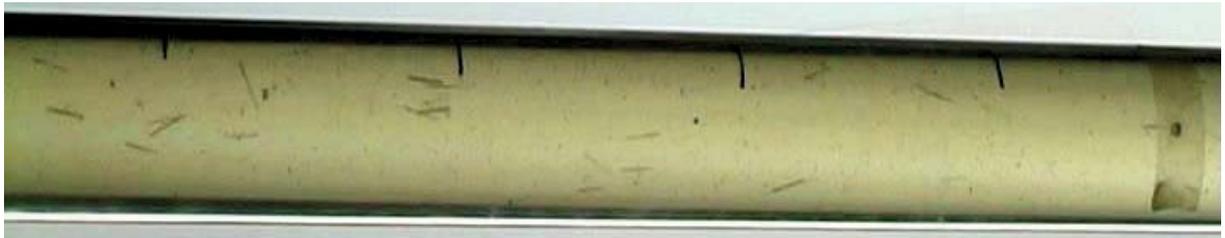


Foto 465

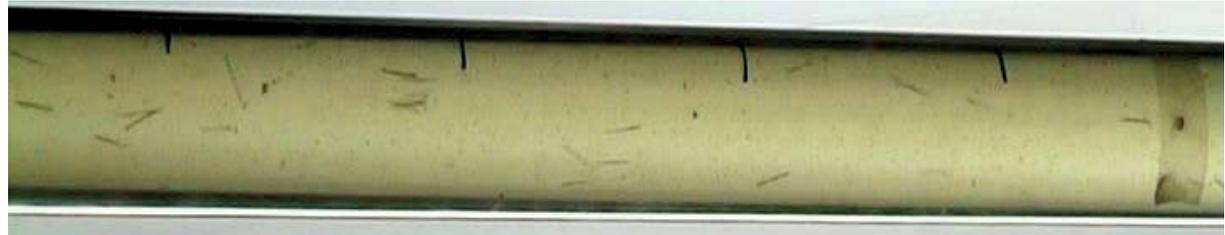


Foto 466



Foto 467



Foto 468

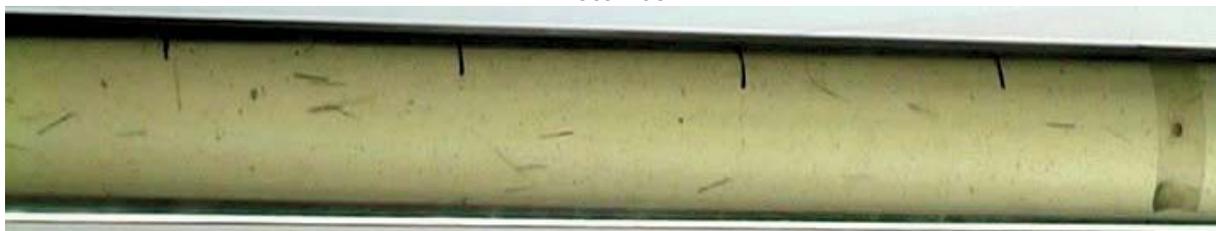


Foto 469

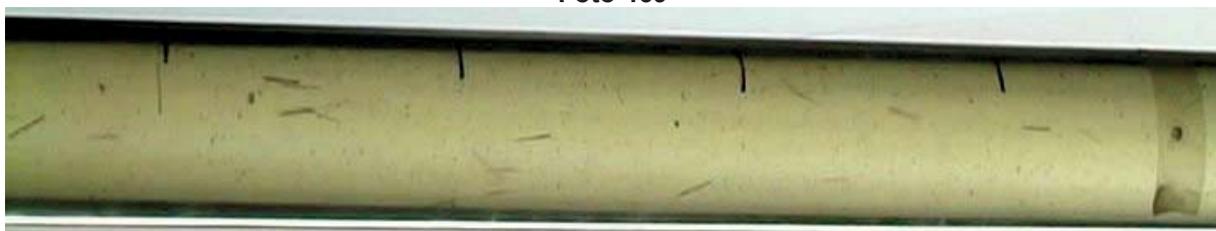


Foto 470

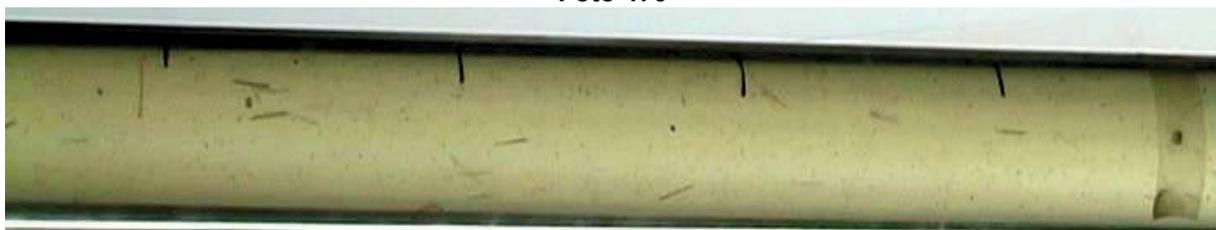


Foto 471

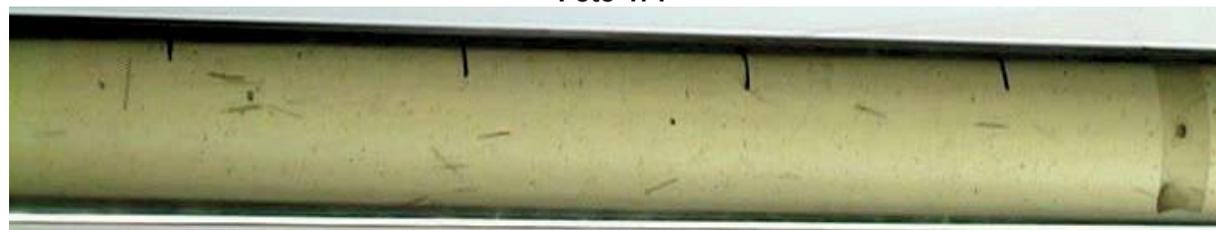


Foto 472



Foto 473



Foto 474

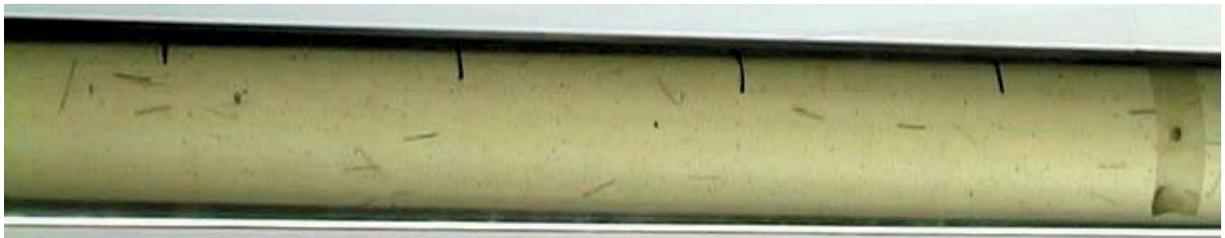


Foto 475

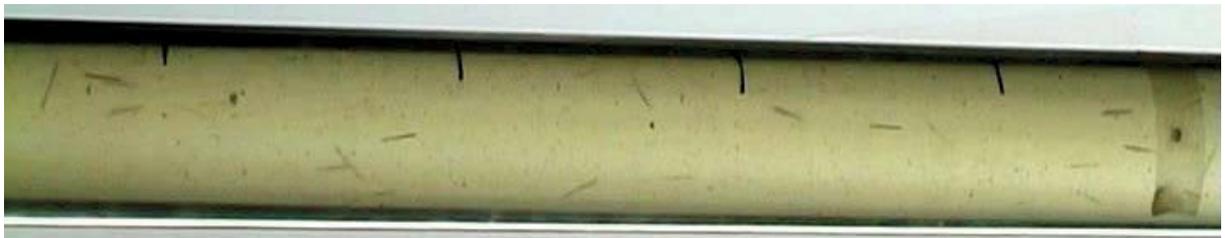


Foto 476

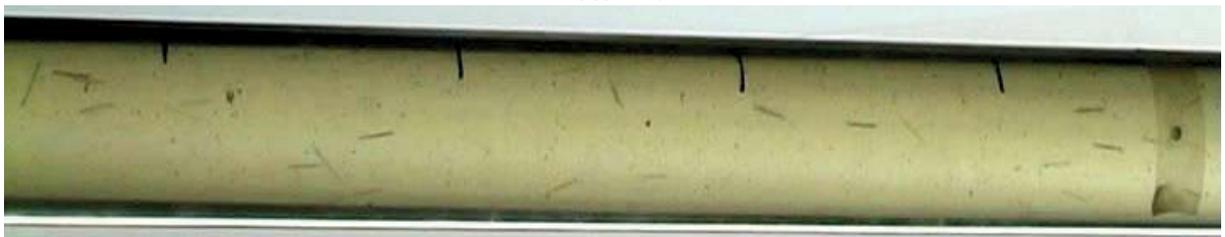


Foto 477

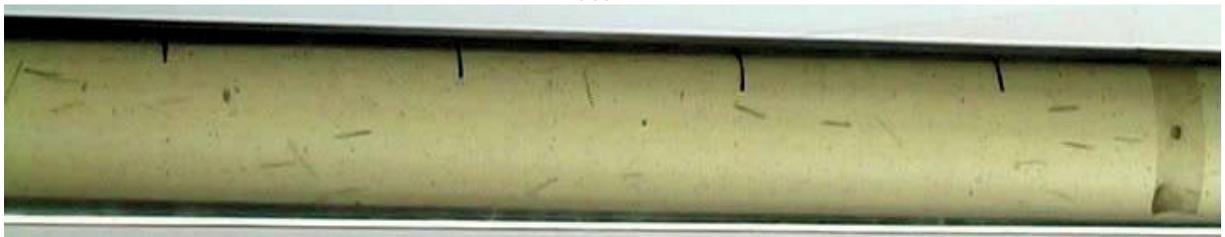


Foto 478

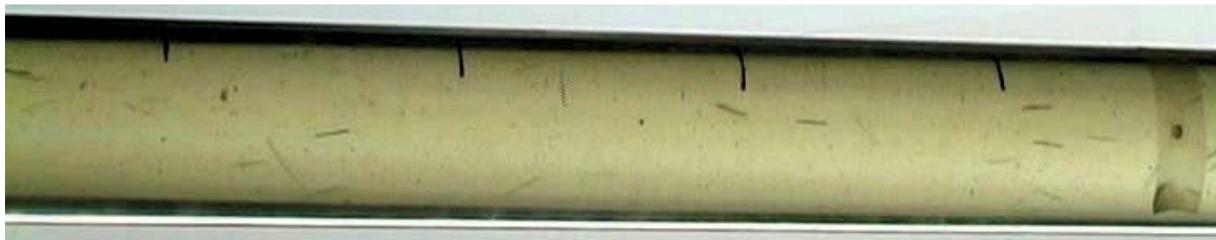


Foto 479

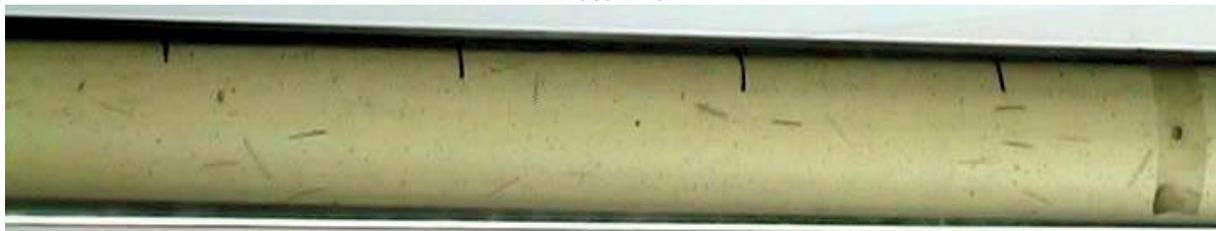


Foto 480

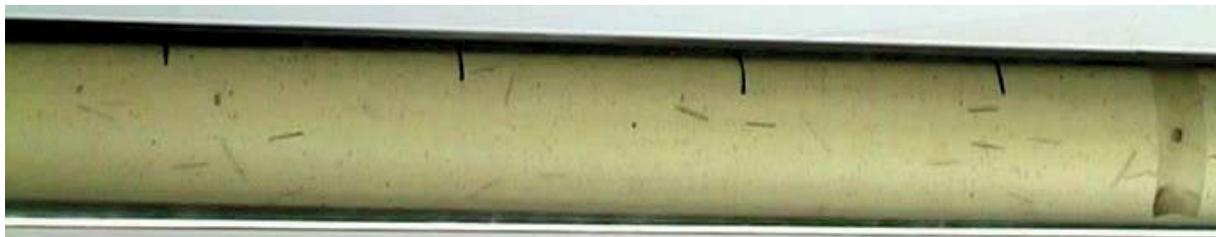


Foto 481



Foto 482

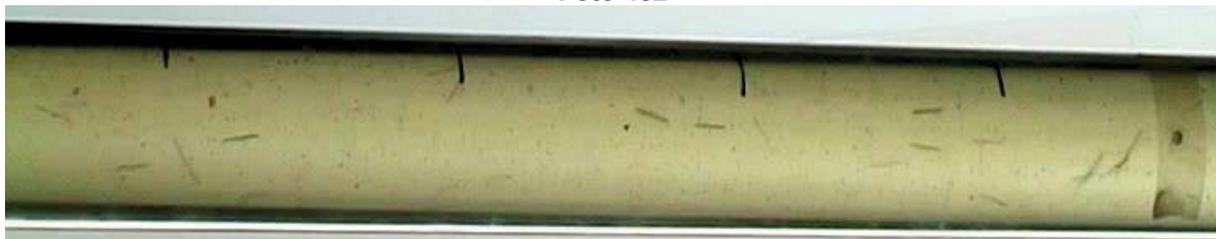


Foto 483

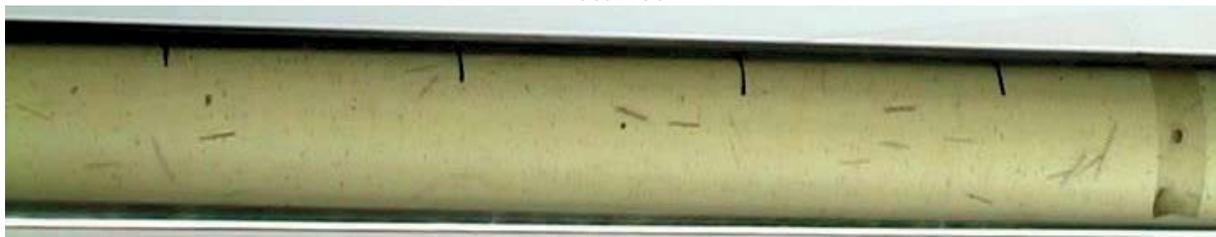


Foto 484

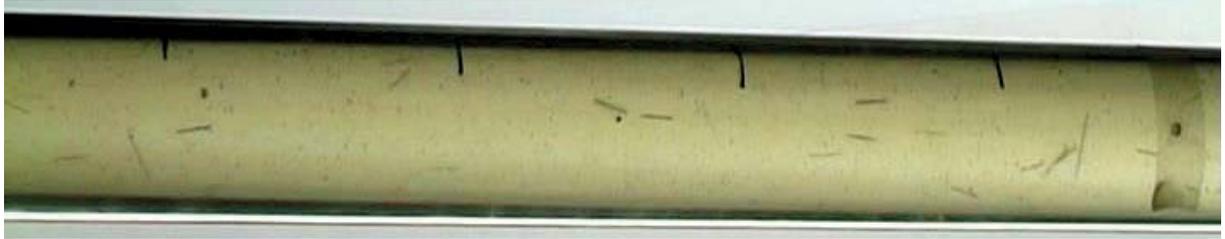


Foto 485

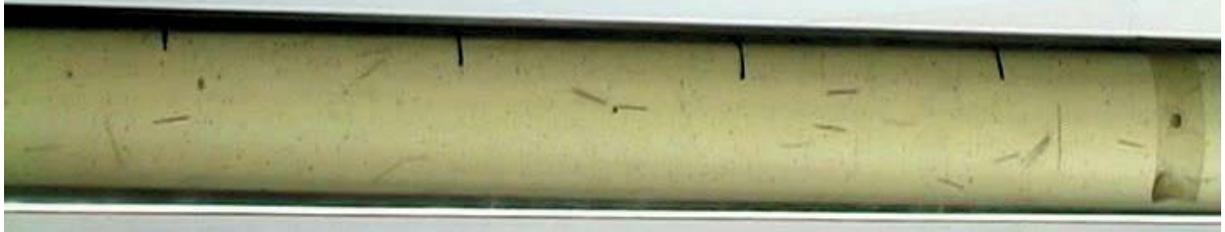


Foto 486

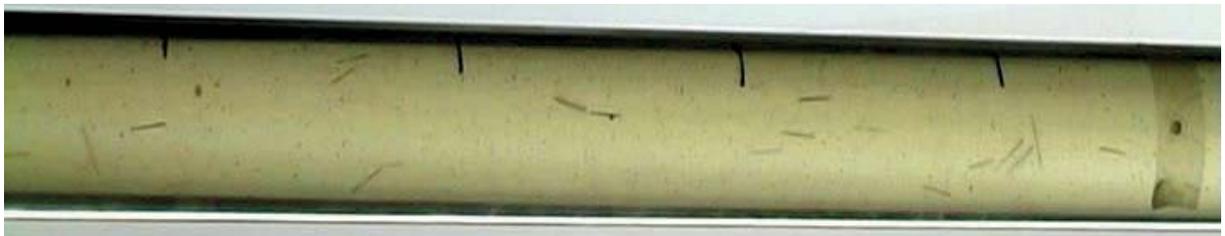


Foto 487

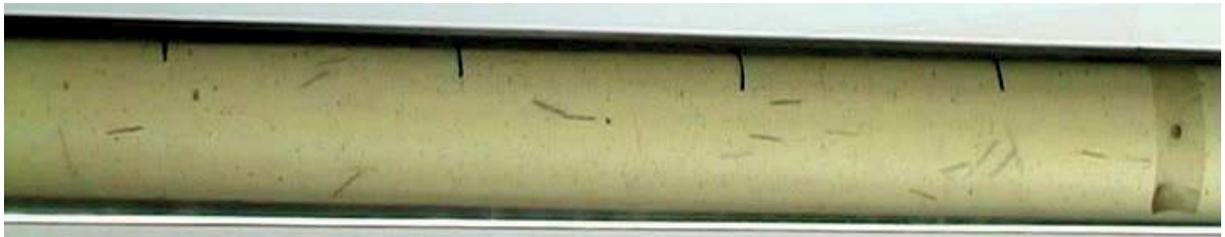


Foto 488

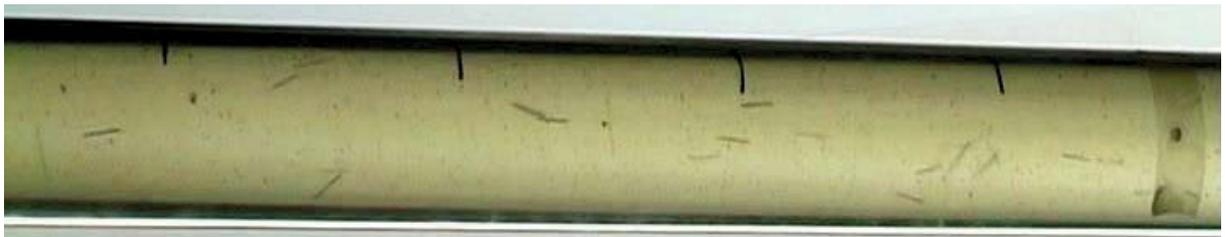


Foto 489

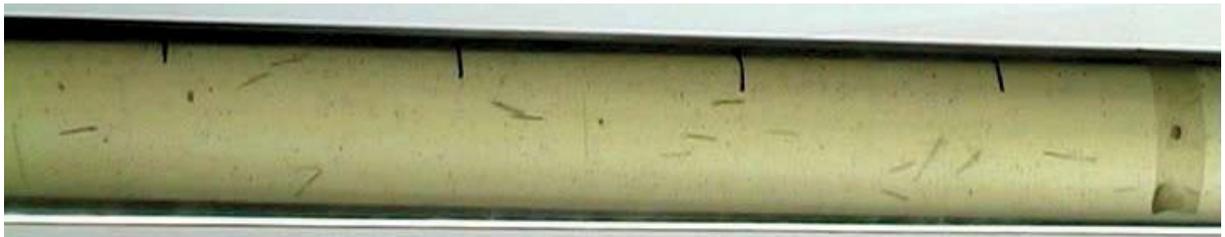


Foto 490

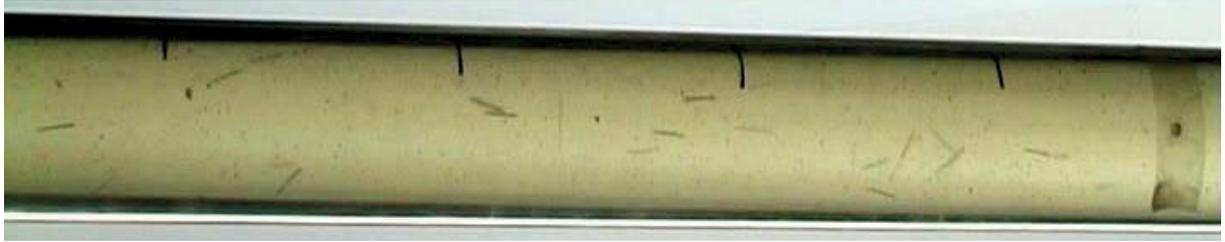


Foto 491



Foto 492

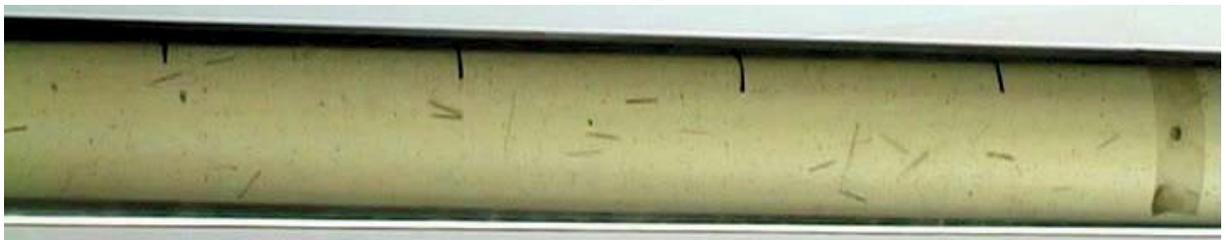


Foto 493



Foto 494

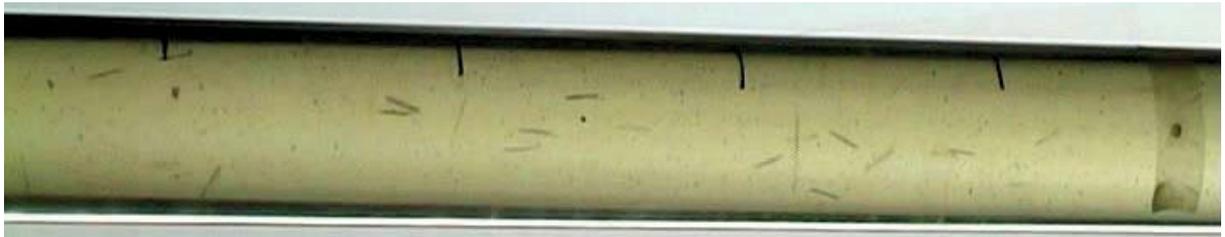


Foto 495

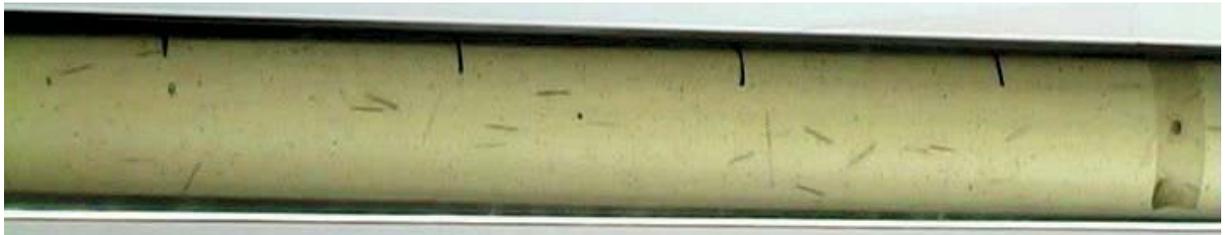
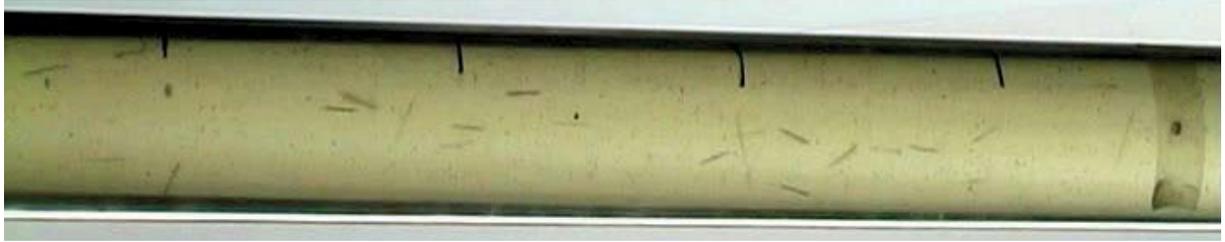
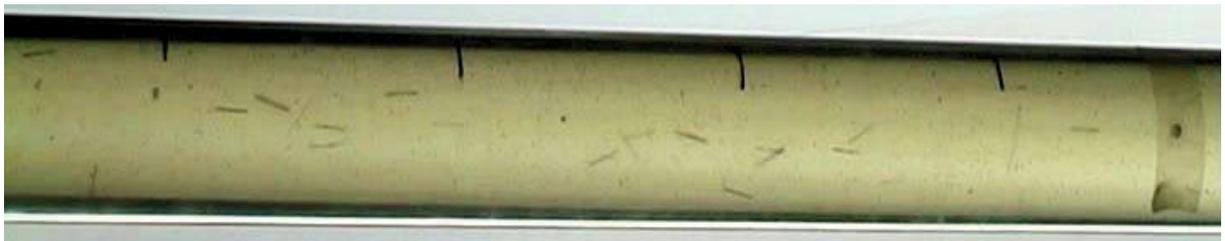
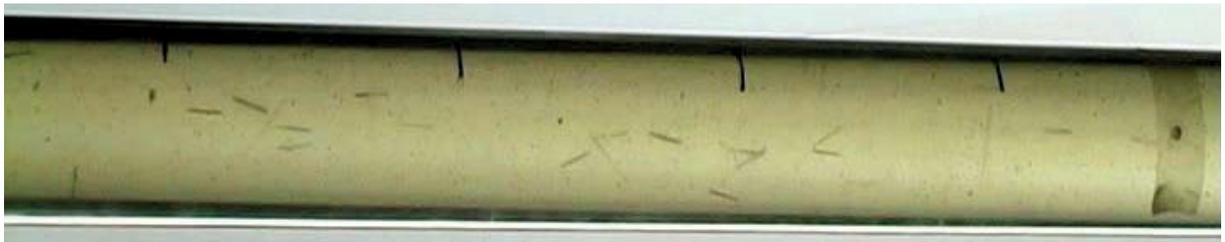


Foto 496

**Foto 497****Foto 498****Foto 499****Foto 500****Foto 501****Foto 502**

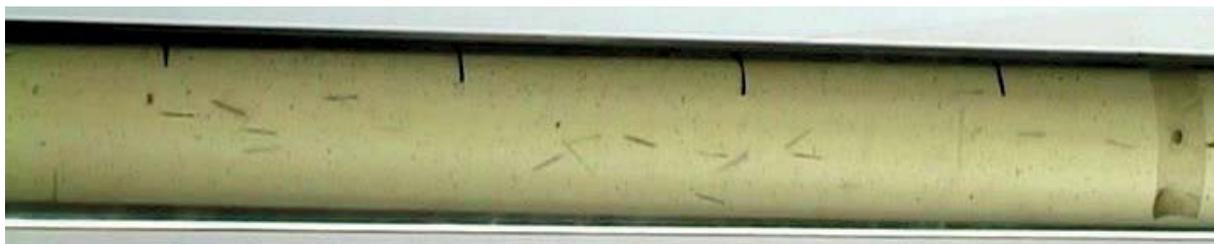


Foto 503



Foto 504



Foto 505



Foto 506

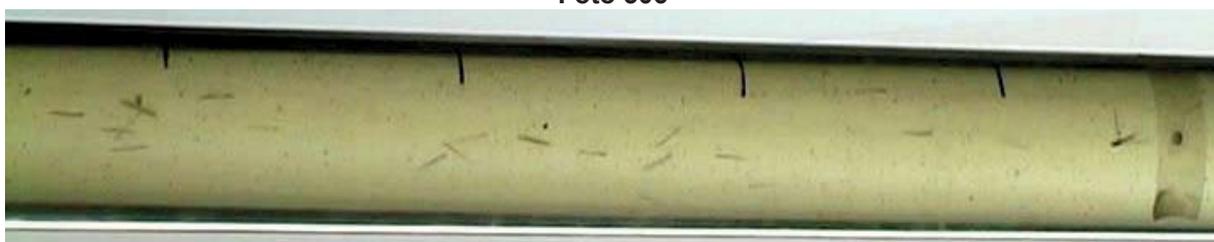


Foto 507

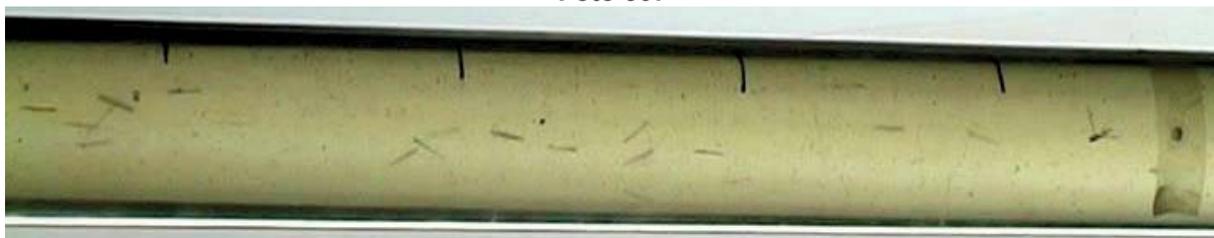


Foto 508

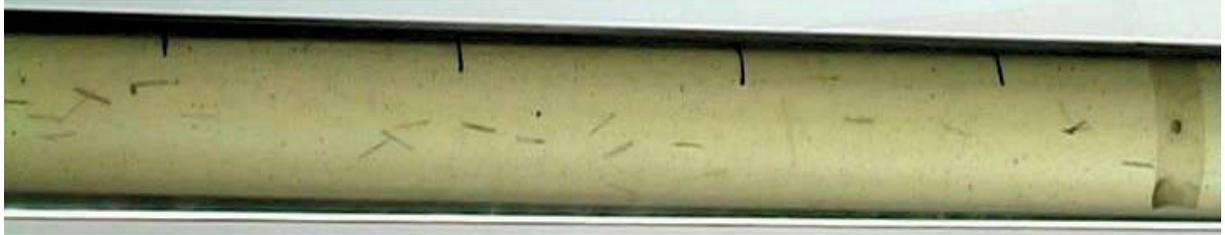
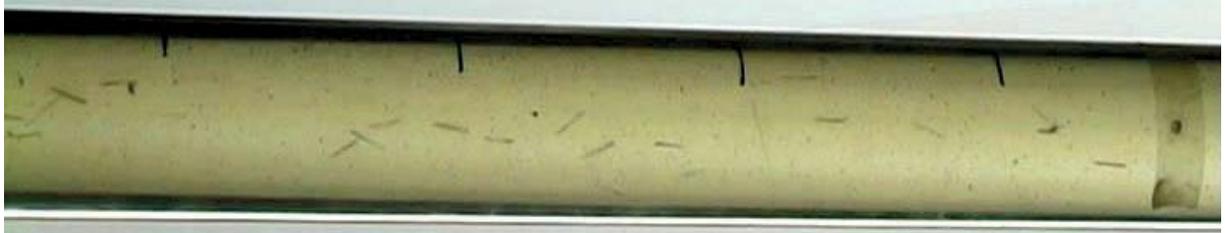
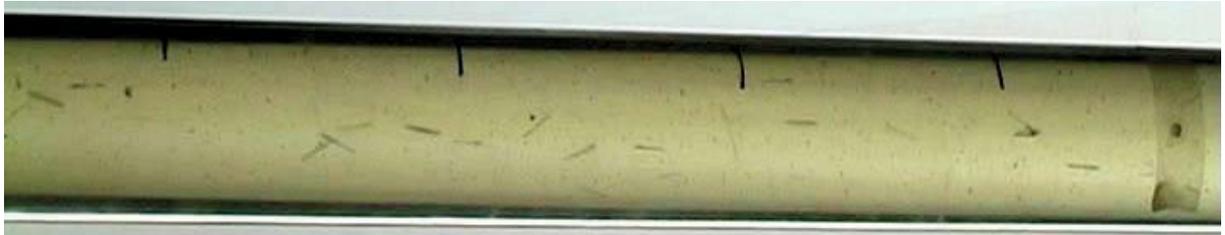
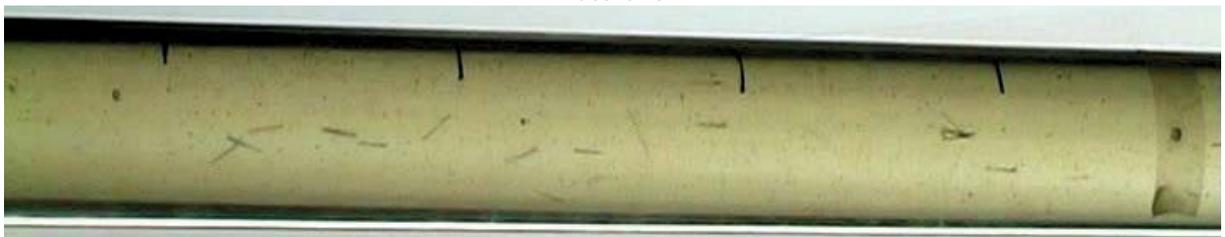
**Foto 509****Foto 510****Foto 511****Foto 512****Foto 513****Foto 514**



Foto 515

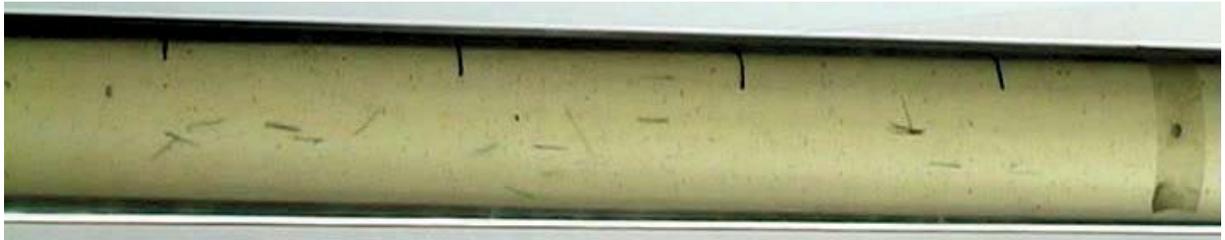


Foto 516

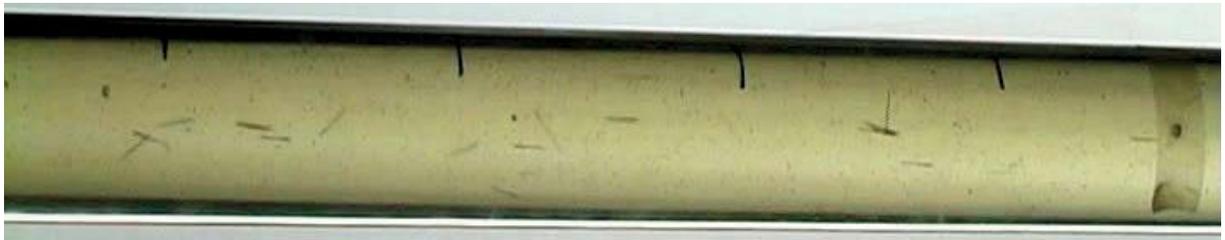


Foto 517

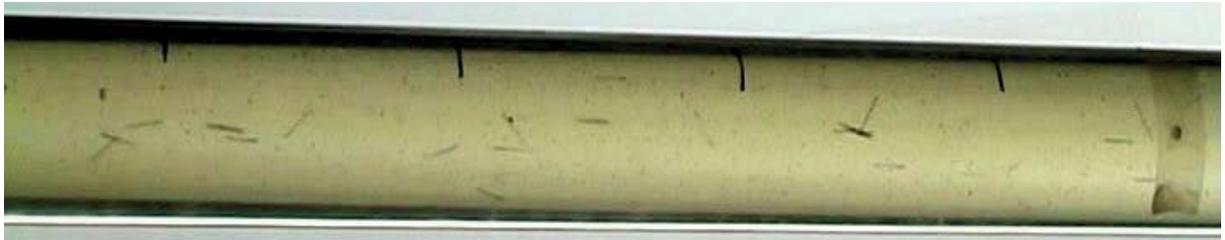


Foto 518

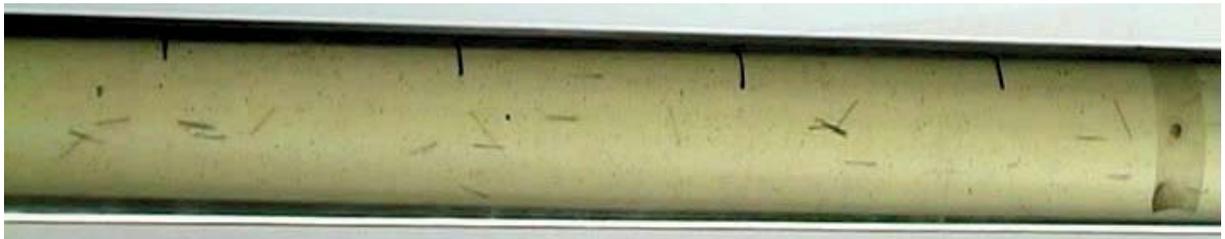


Foto 519

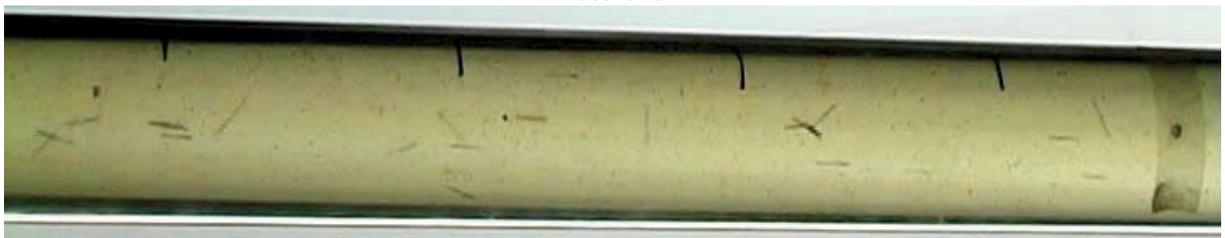


Foto 520



Foto 521



Foto 522



Foto 523

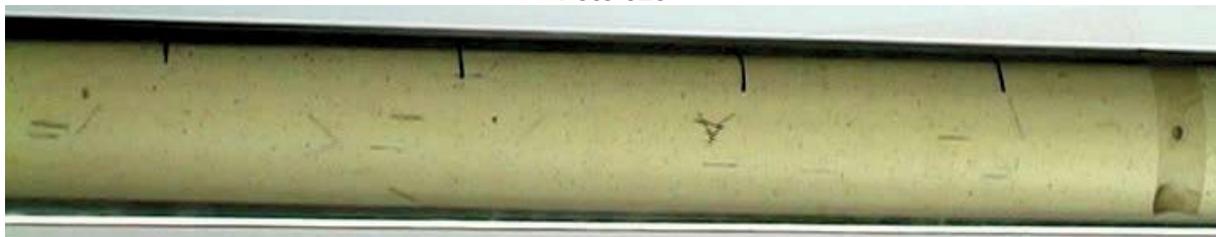


Foto 524

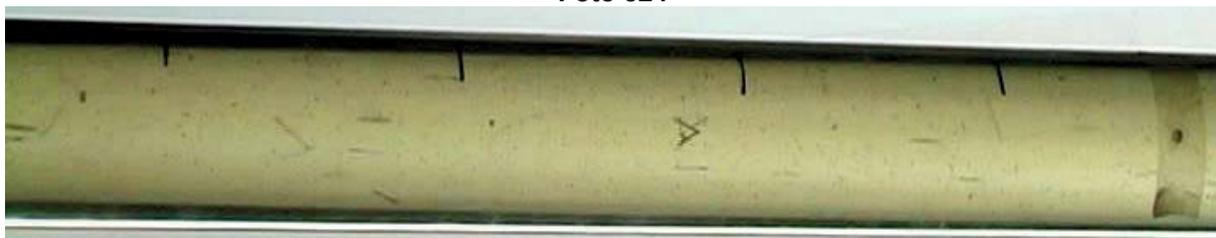


Foto 525

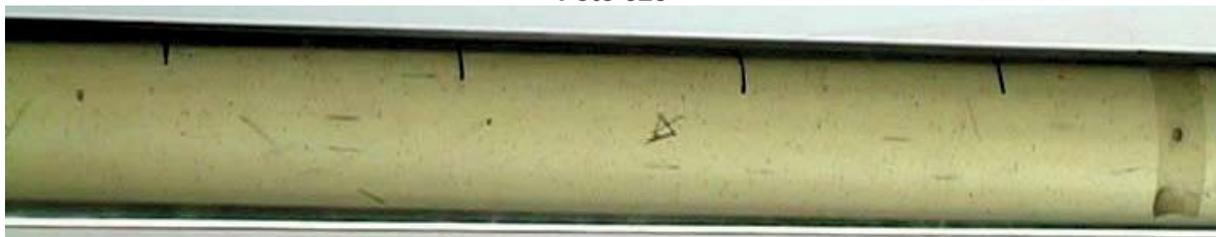


Foto 526

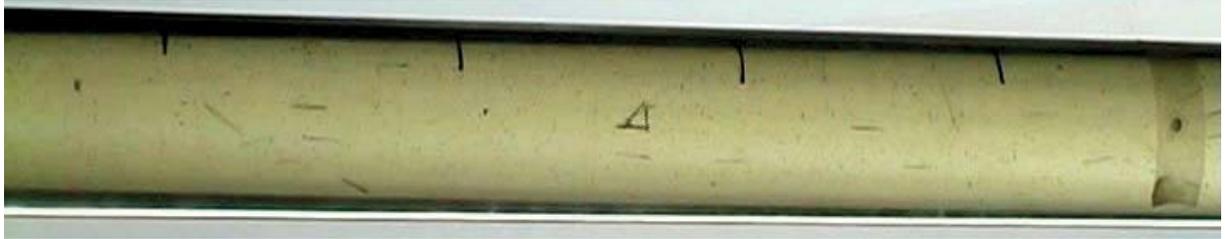


Foto 527

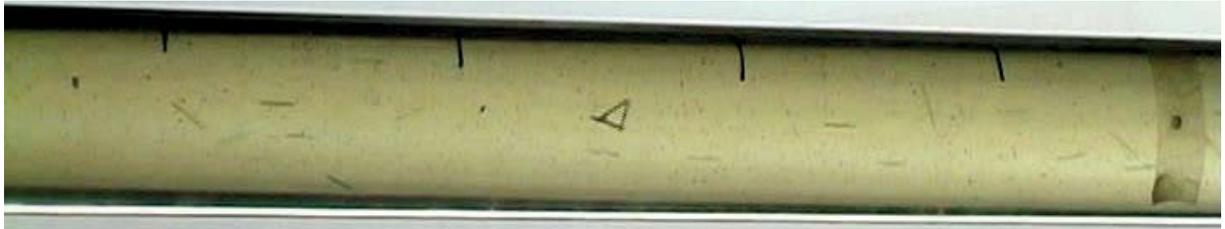


Foto 528

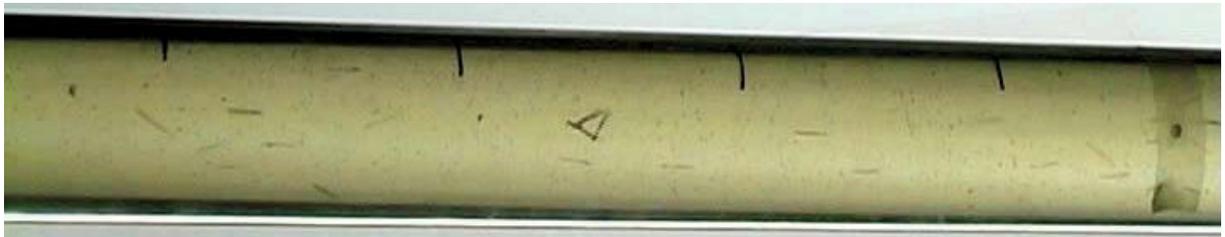


Foto 529

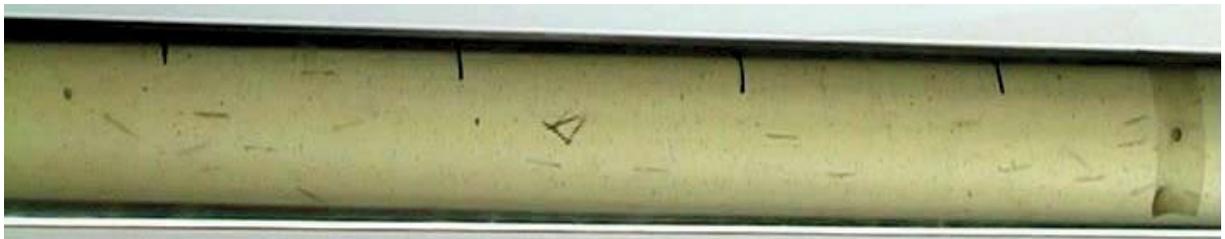


Foto 530

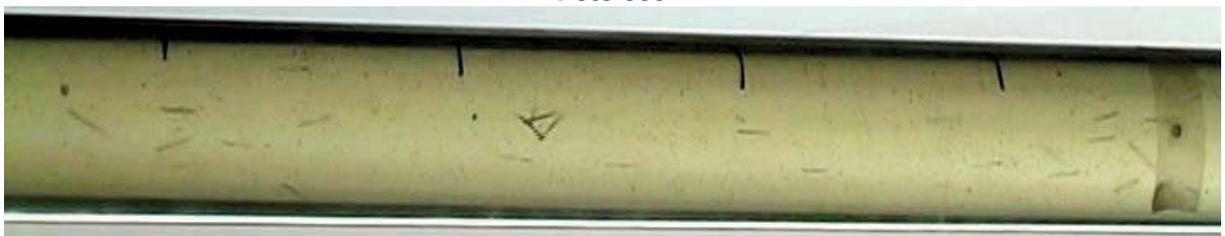


Foto 531

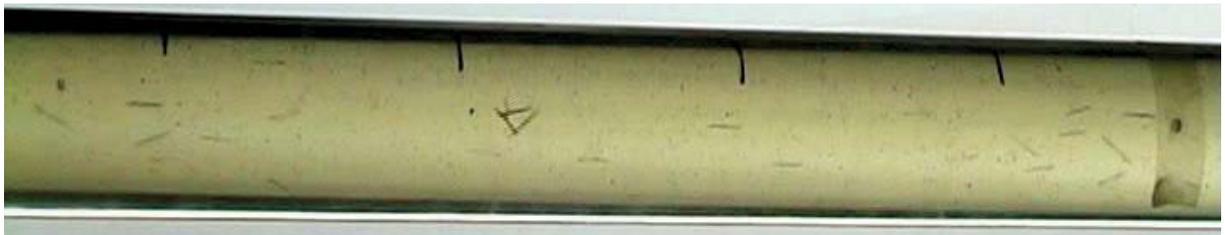


Foto 532

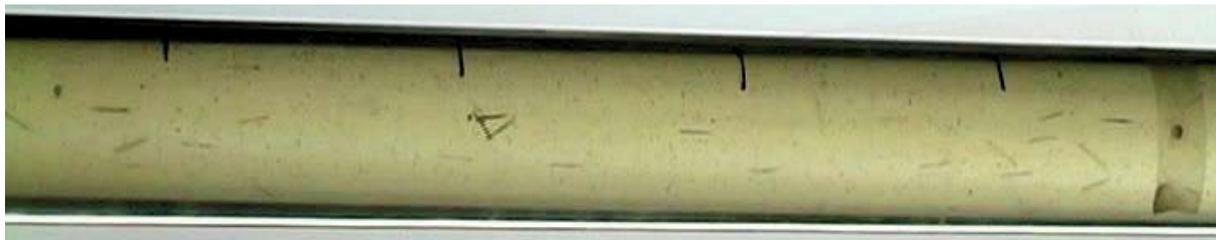


Foto 533

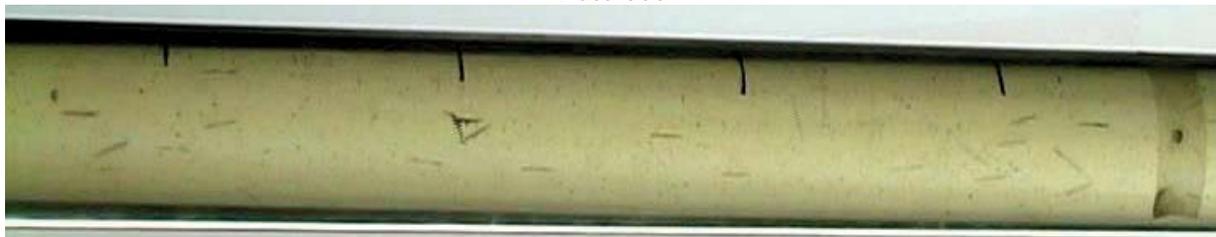


Foto 534

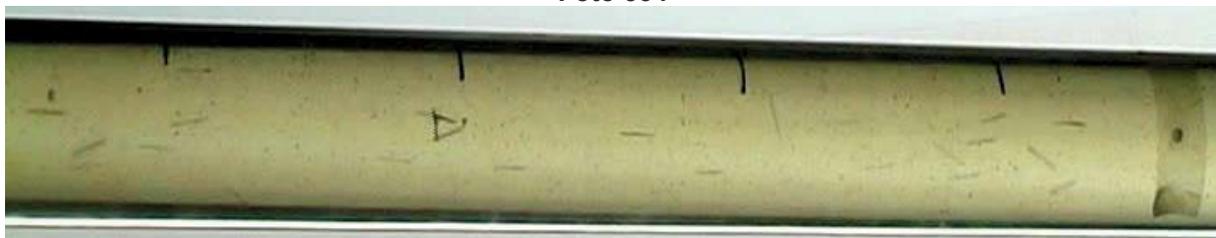


Foto 535

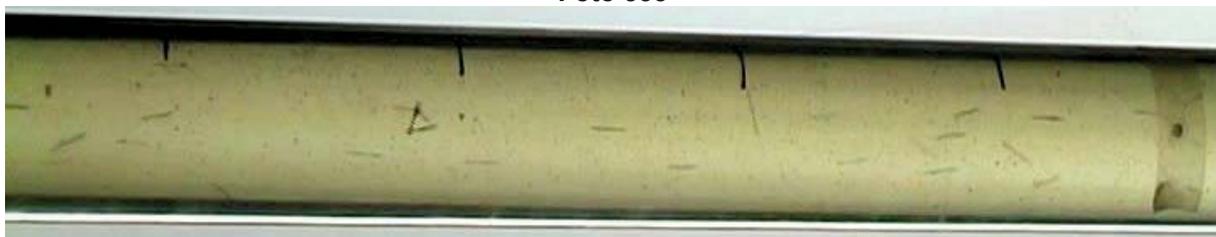


Foto 536

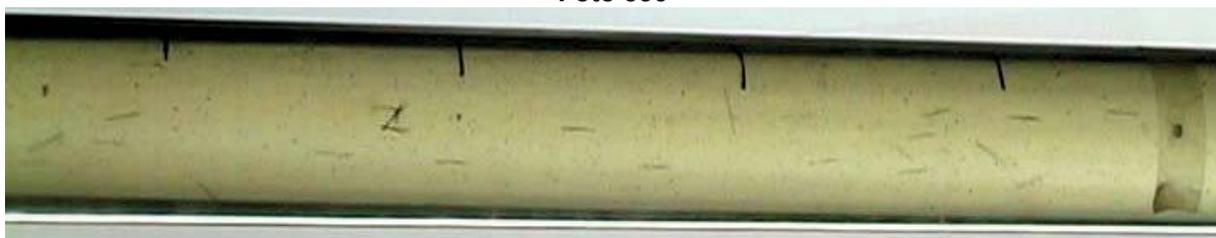


Foto 537

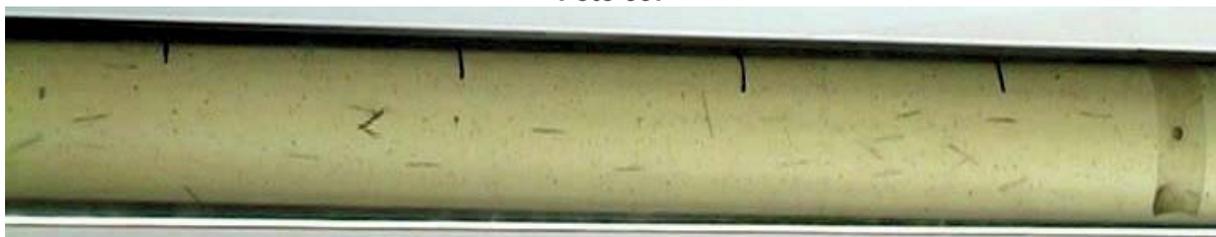


Foto 538

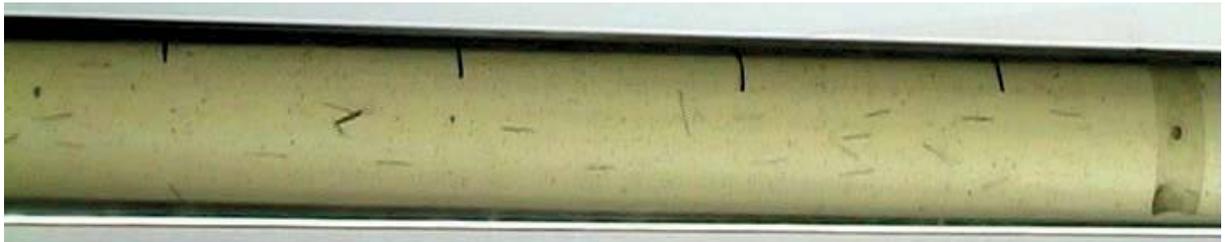


Foto 539

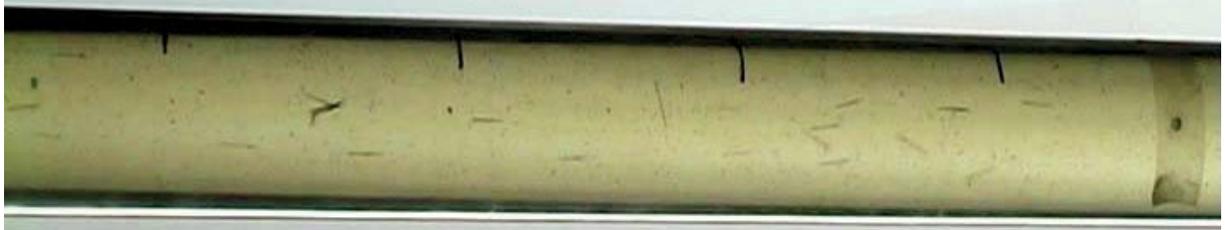


Foto 540

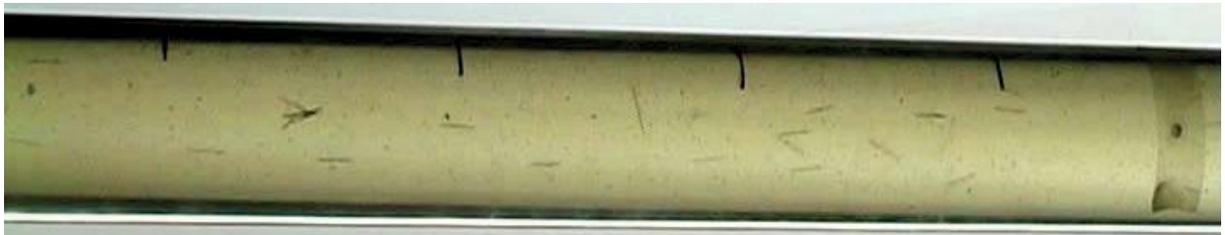


Foto 541



Foto 542

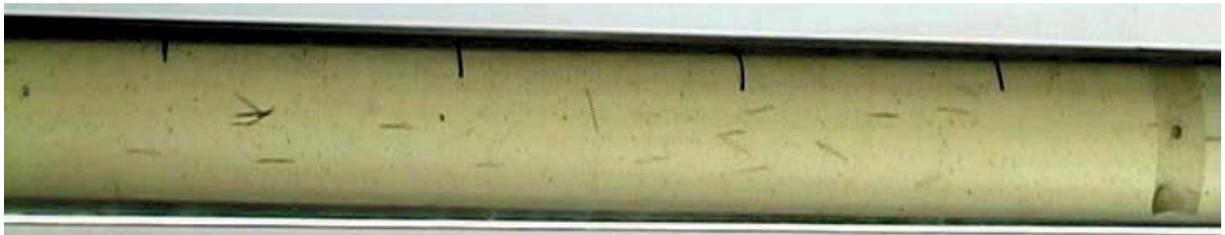


Foto 543



Foto 544

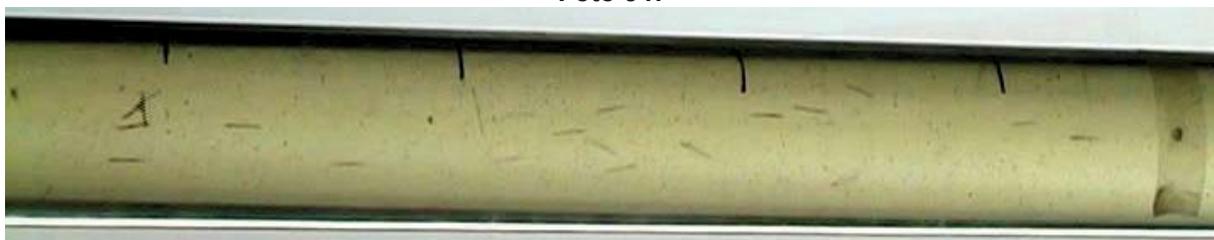
**Foto 545****Foto 546****Foto 547****Foto 548****Foto 549****Foto 550**



Foto 551

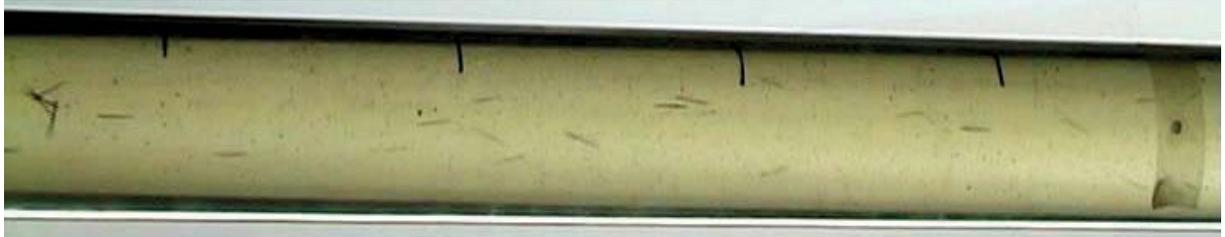


Foto 552



Foto 553

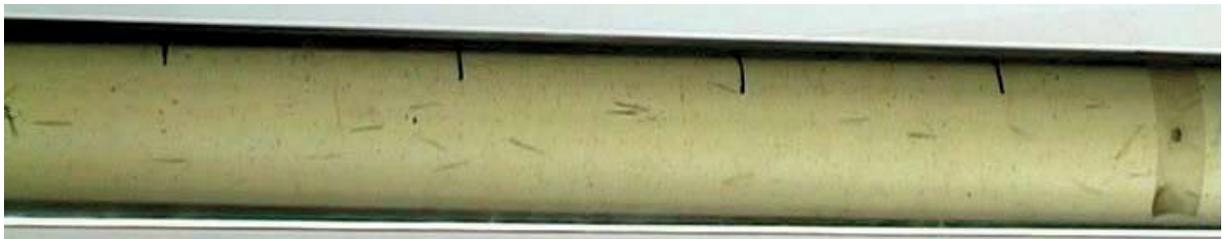


Foto 554



Foto 555

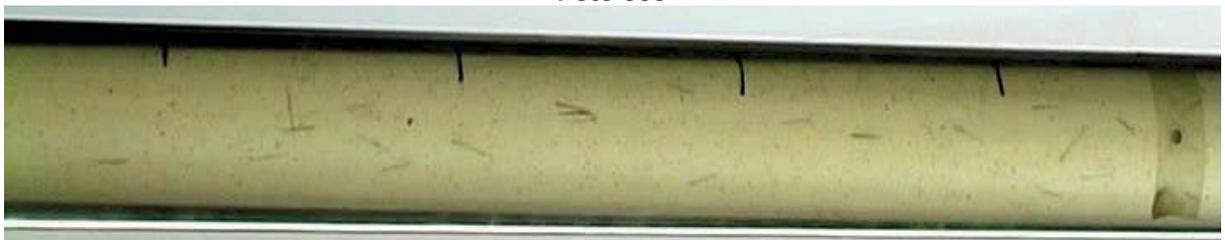


Foto 556

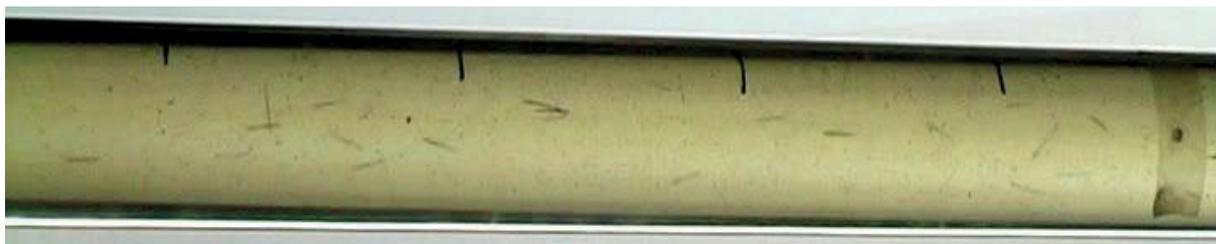


Foto 557

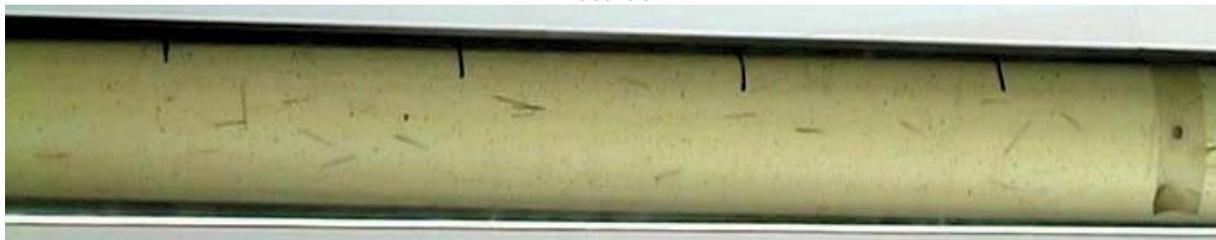


Foto 558



Foto 559



Foto 560

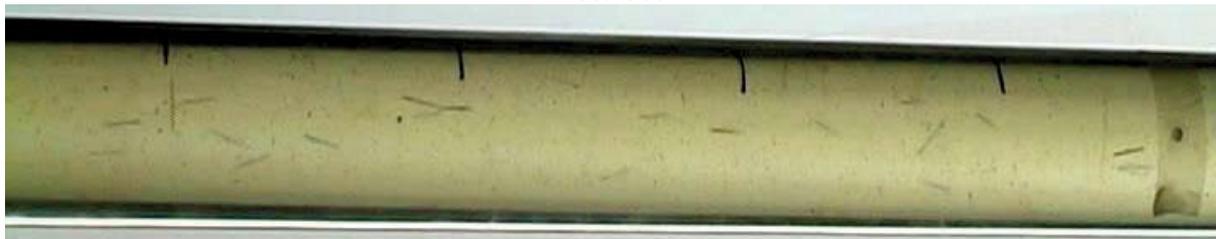


Foto 561



Foto 562

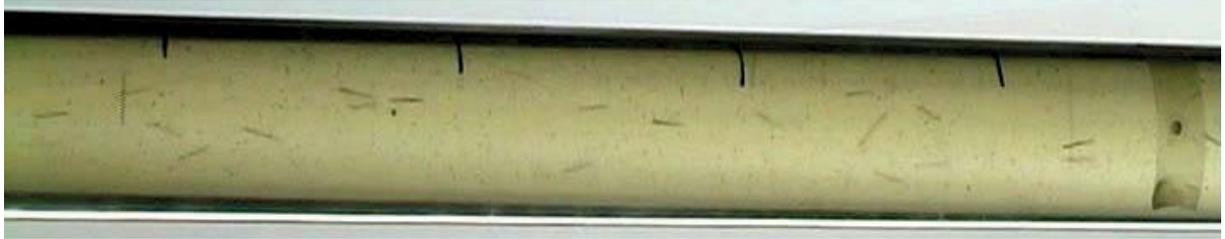


Foto 563



Foto 564



Foto 565

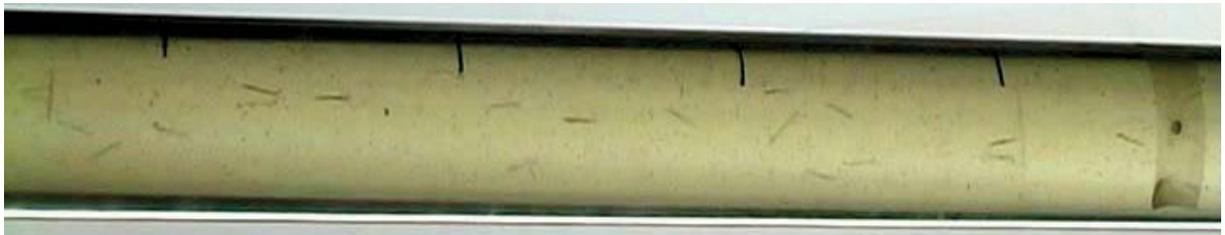


Foto 566

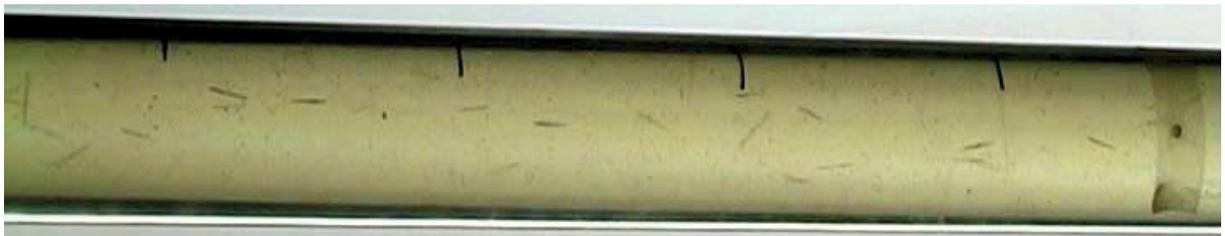


Foto 567

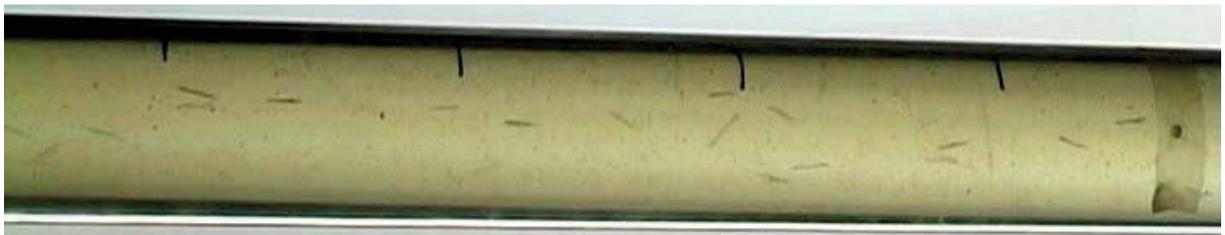


Foto 568

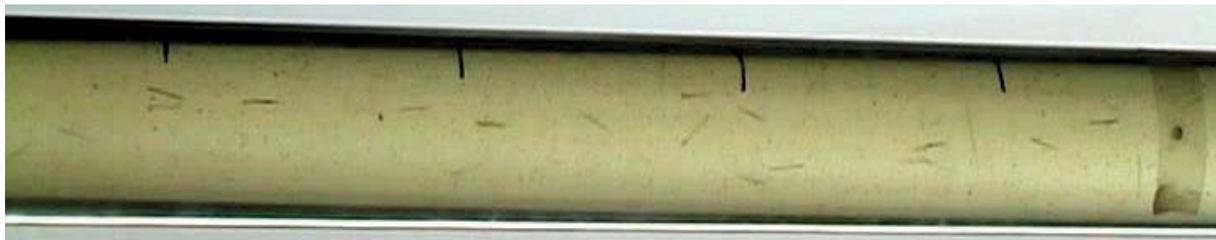


Foto 569

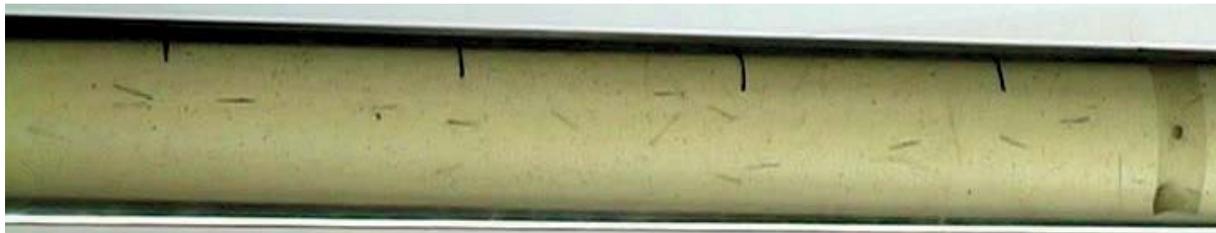


Foto 570



Foto 571



Foto 572



Foto 573



Foto 574



Foto 575

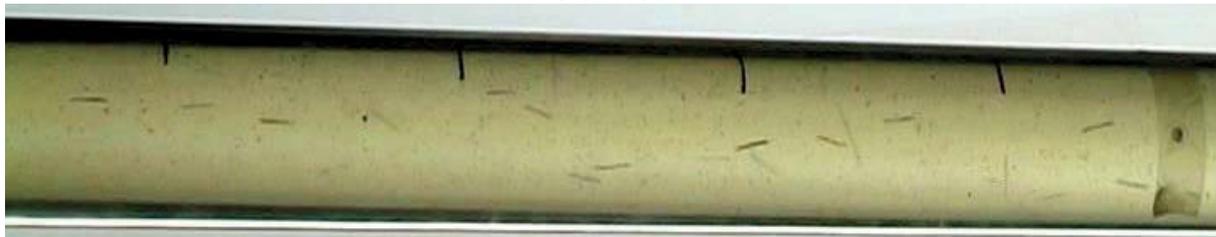


Foto 576

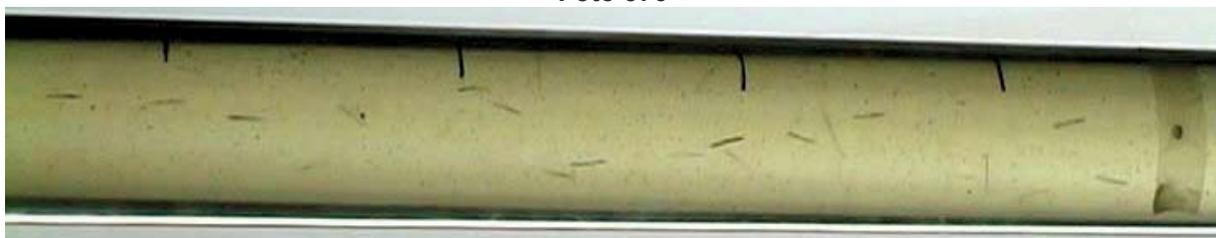


Foto 577



Foto 578

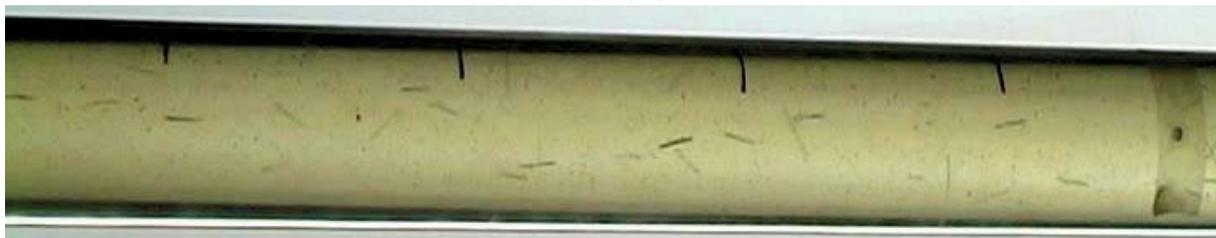


Foto 579

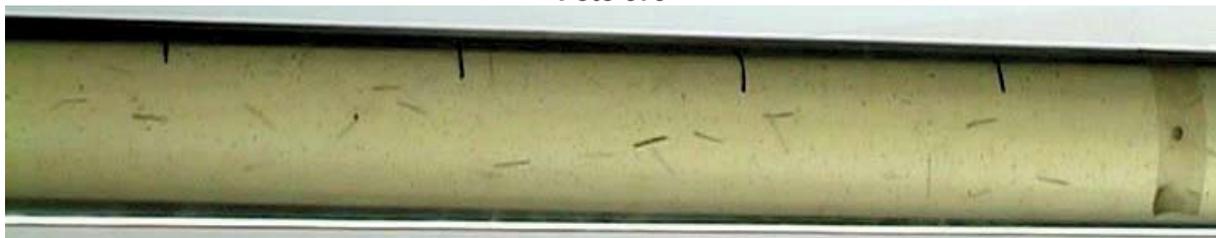
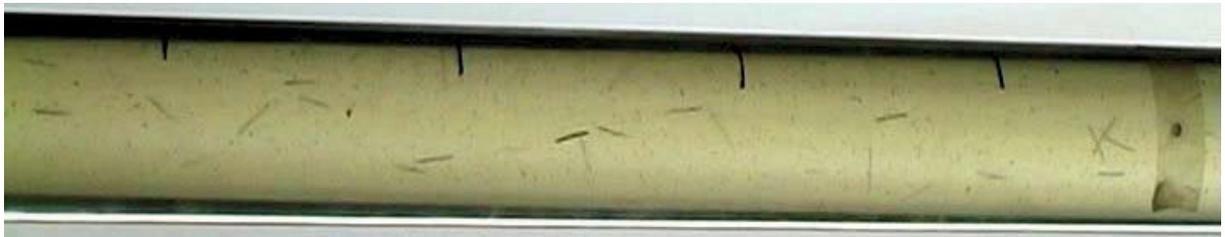
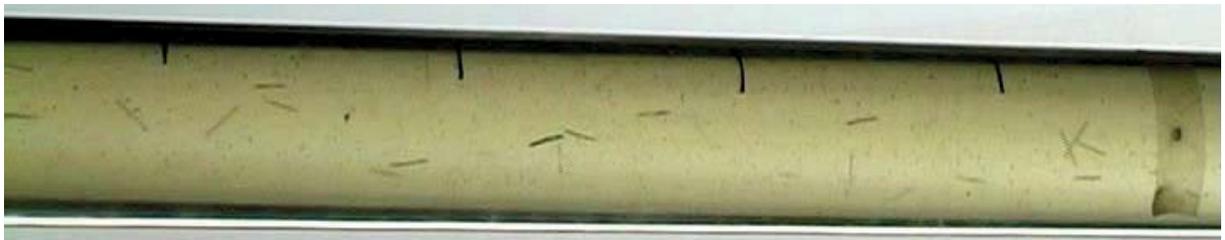
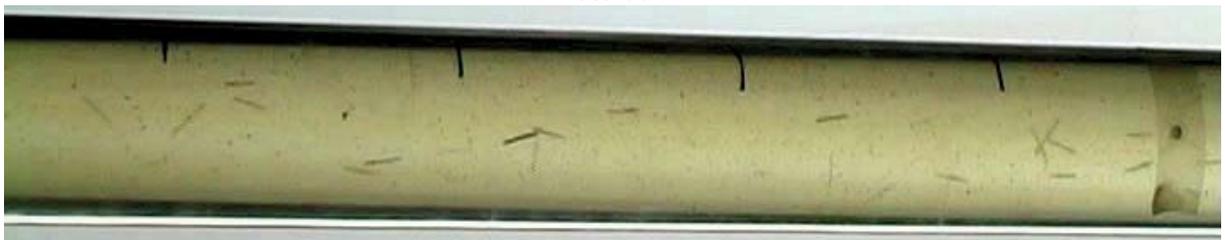
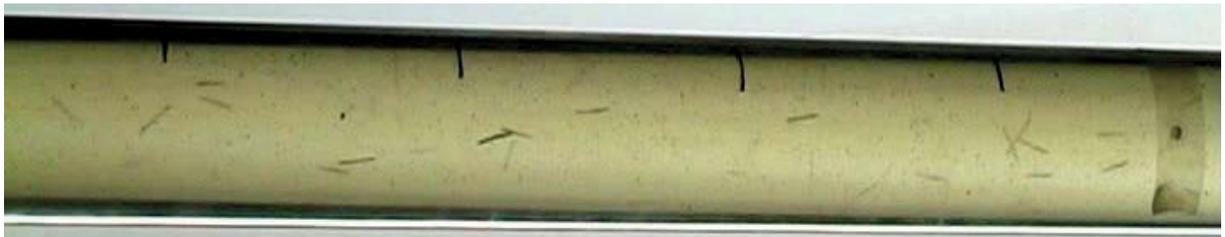


Foto 580

**Foto 581****Foto 582****Foto 583****Foto 584****Foto 585****Foto 586**

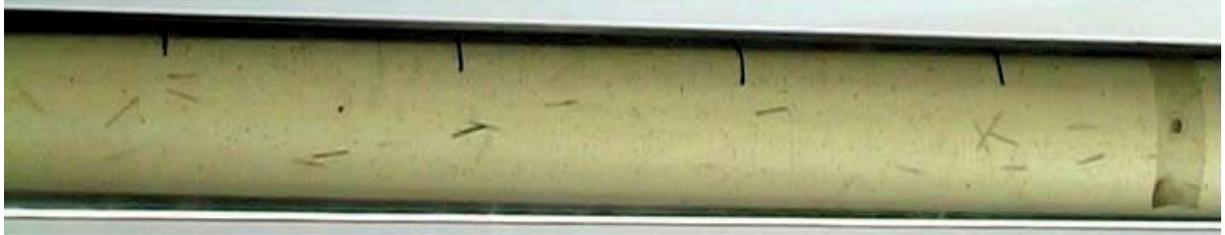


Foto 587

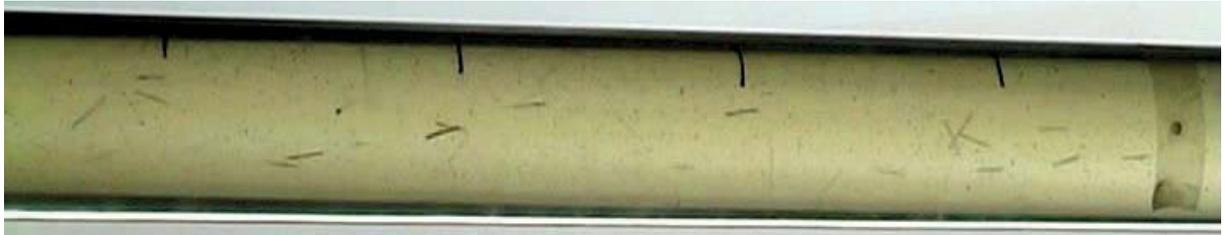


Foto 588

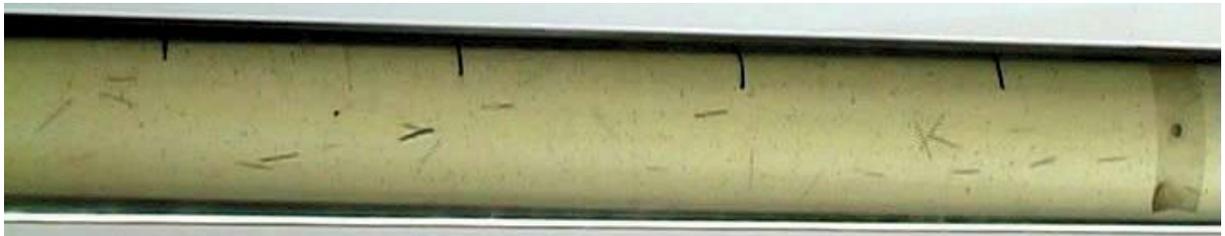


Foto 589

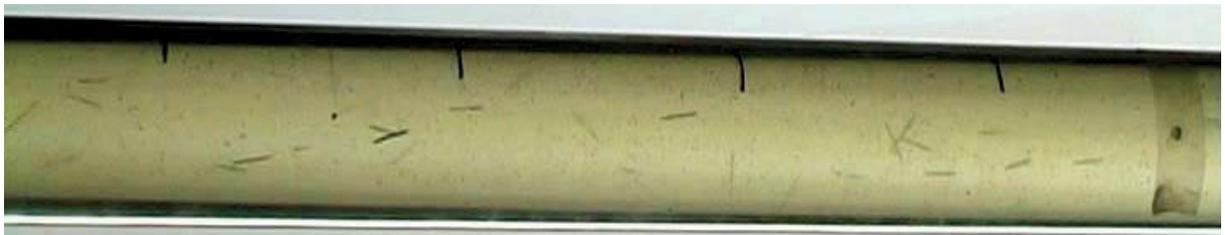


Foto 590



Foto 591

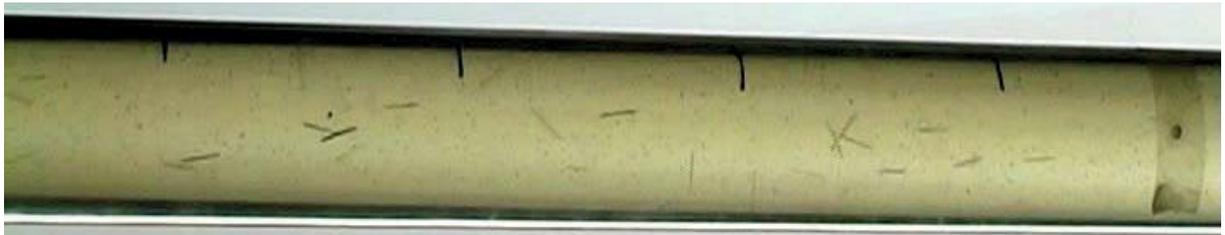
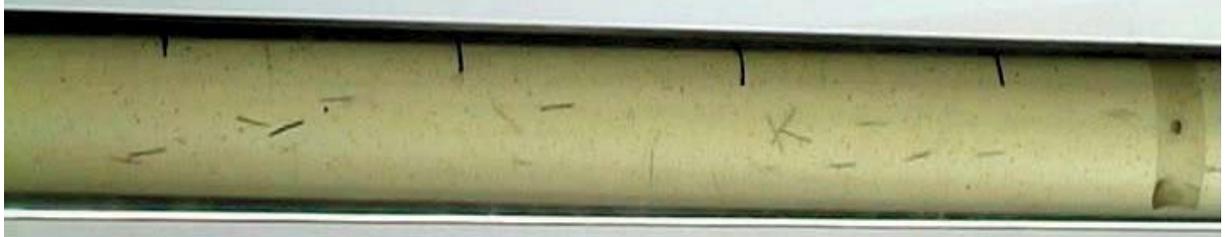
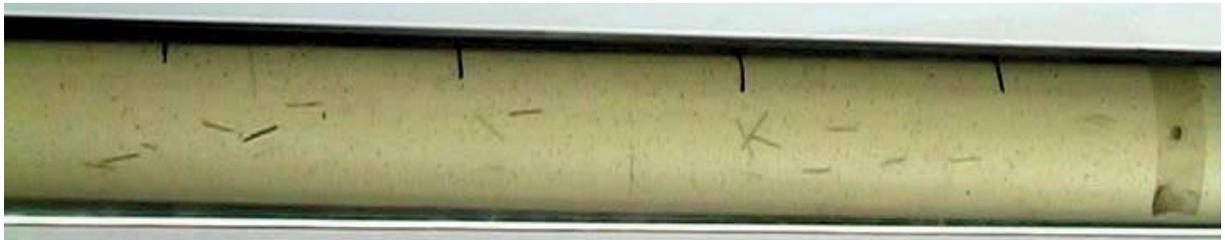
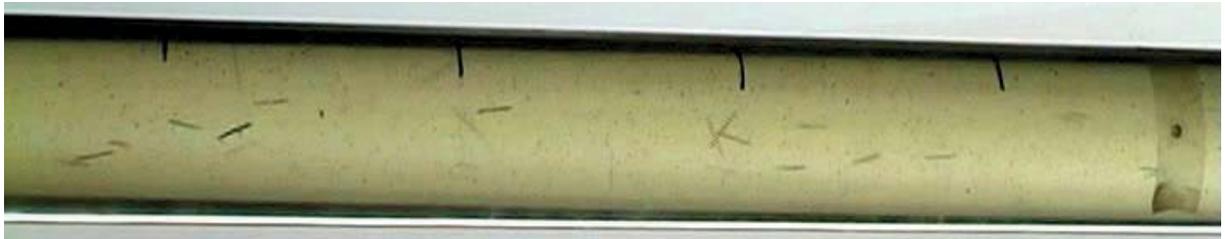
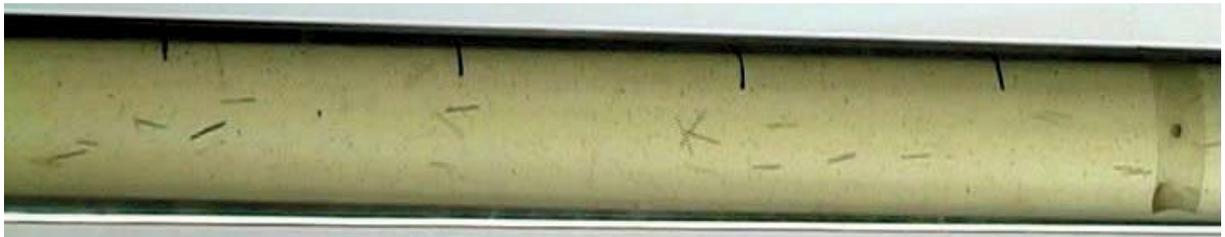
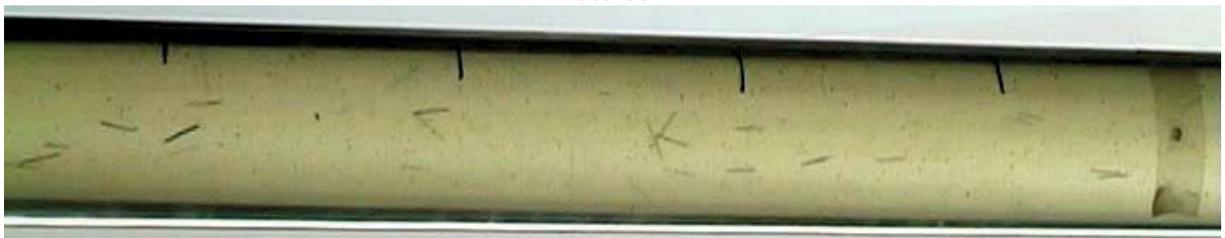


Foto 592

**Foto 593****Foto 594****Foto 595****Foto 596****Foto 597****Foto 598**

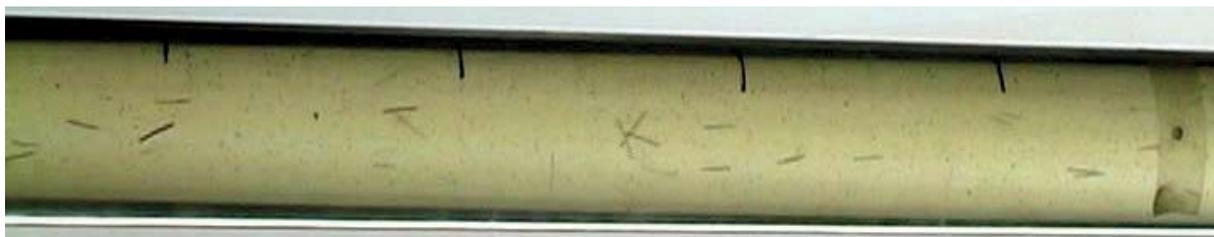


Foto 599



Foto 600



Foto 601



VERSUCH: L-BOX



Foto 602



Foto 603



Foto 604

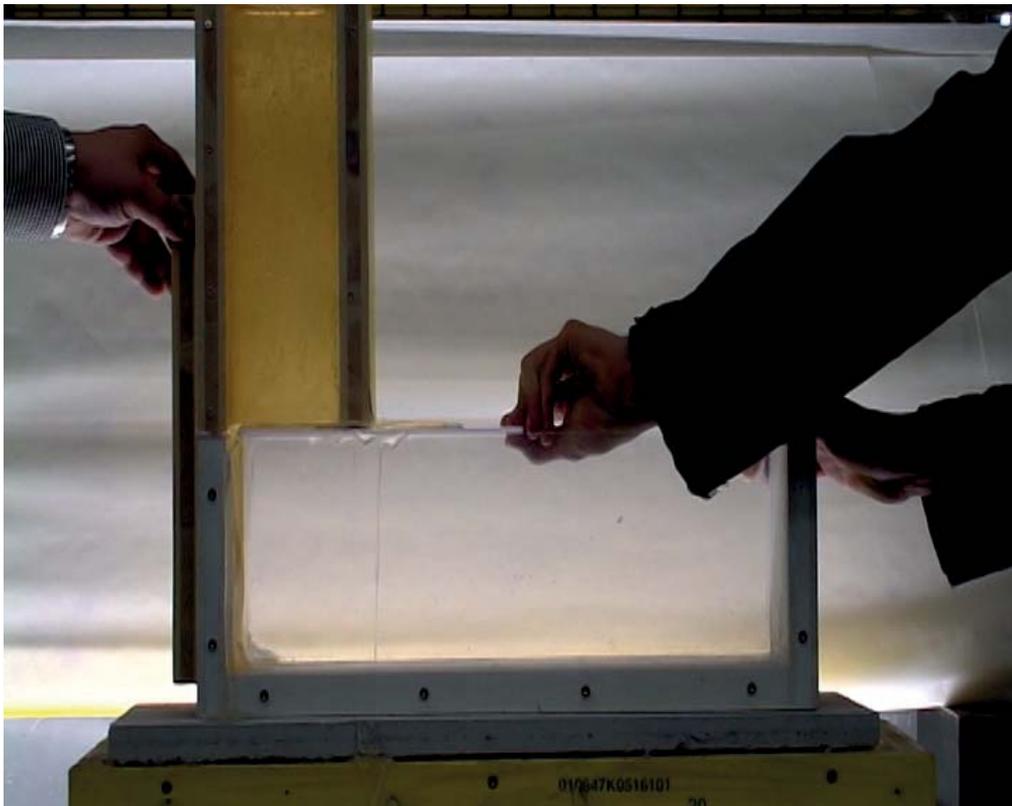


Foto 605



Foto 606



Foto 607



Foto 608



Foto 609



Foto 610



Foto 611



Foto 612



Foto 613



Foto 614

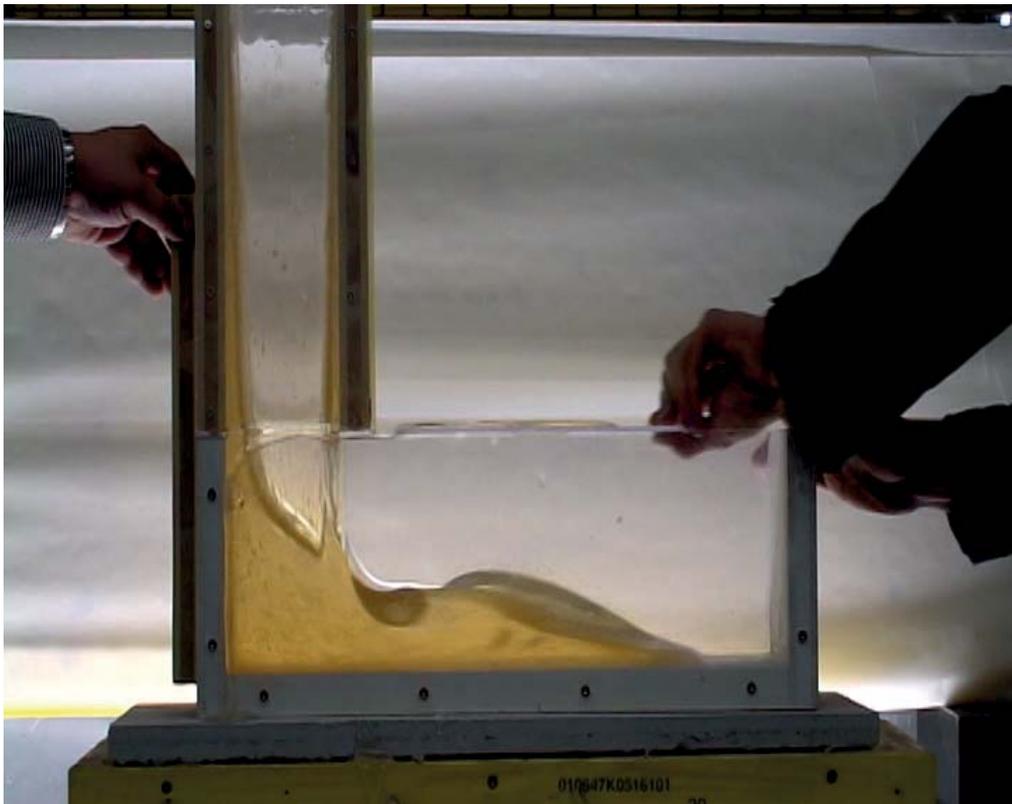


Foto 615



Foto 616



Foto 617



Foto 618



Foto 619



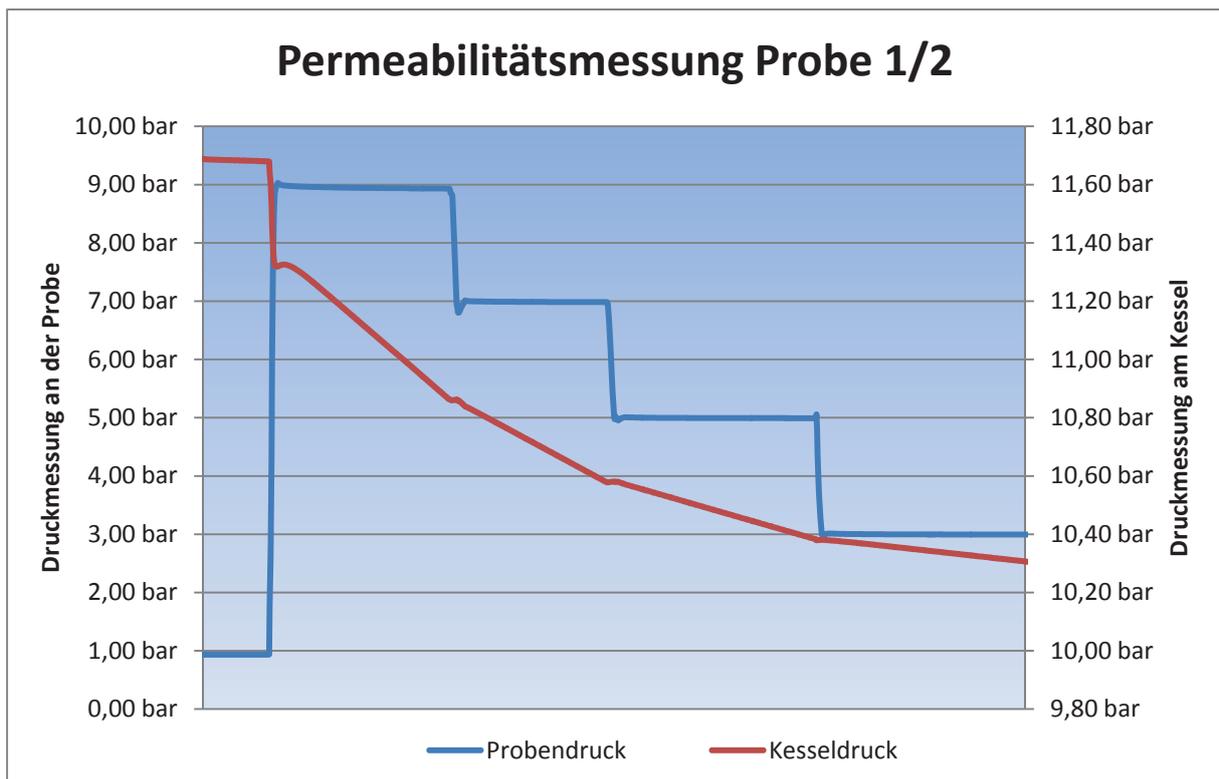
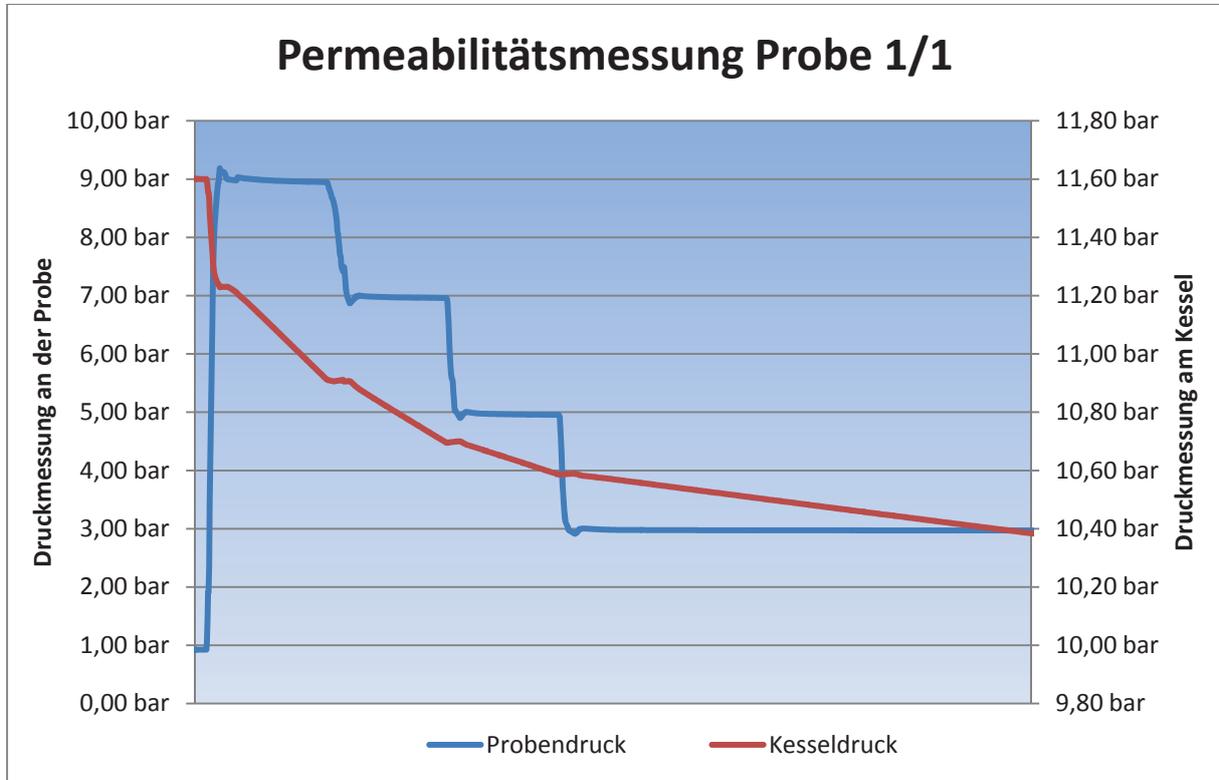
MÖRTELVERSUCHE MIT VERSCHIEDENEN FLIEßMITTELN

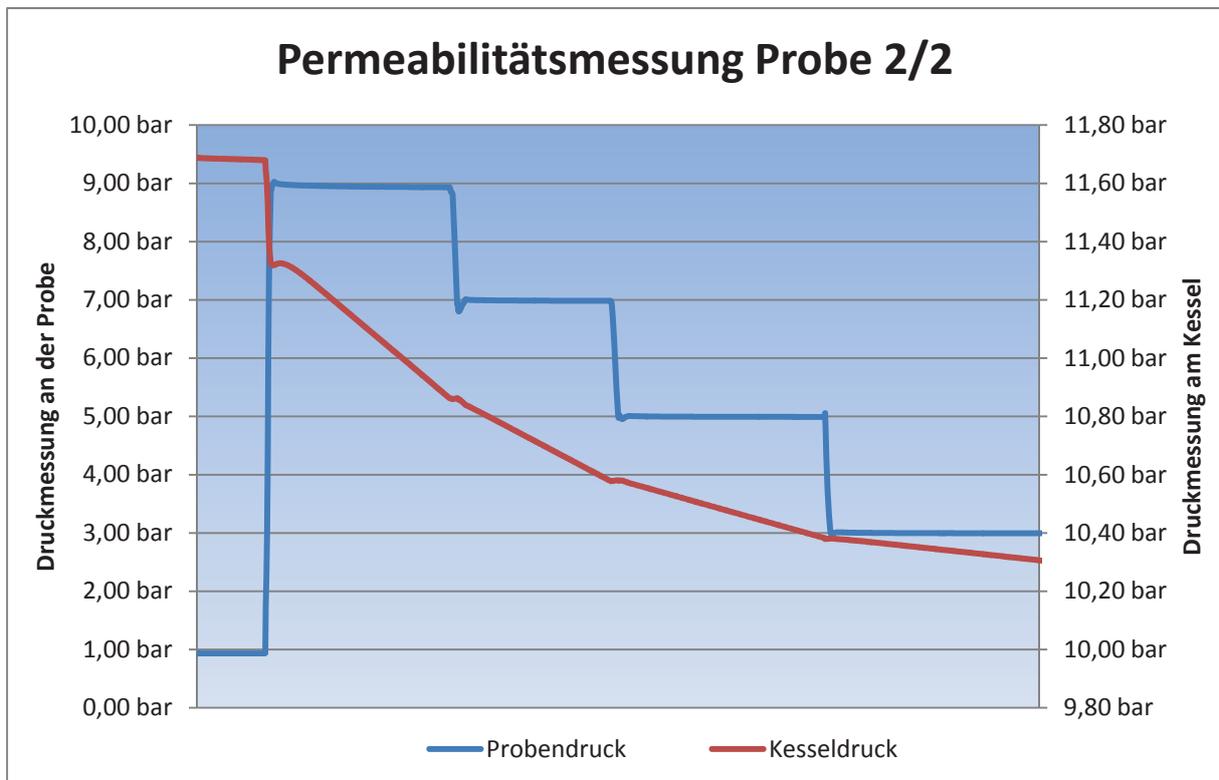
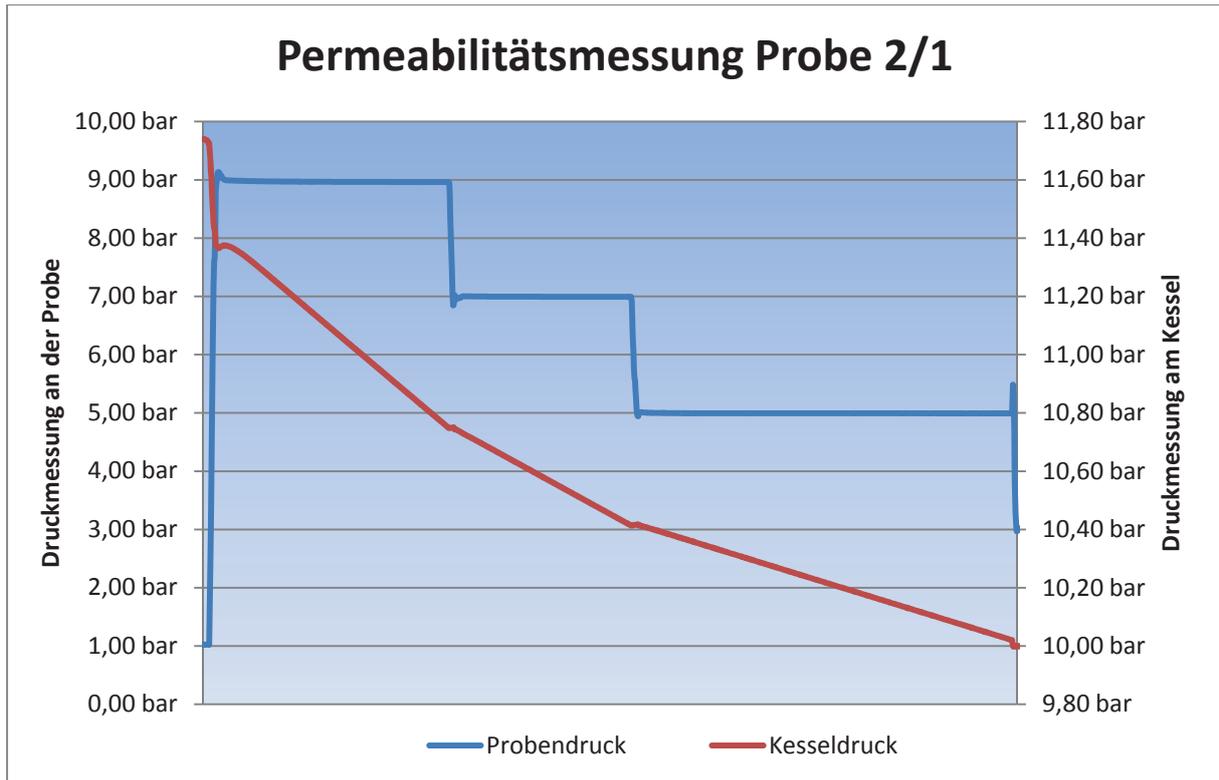
Ausgangsstoffe	Versuch							
	SCM – FM 1		SCM – FM 2		SCM – FM 3		SCM – FM 4	
SC-45	600		600		600		600	
Wasser	252		252		252		252	
W/Z	0,42		0,42		0,42		0,42	
Gesteinskörnung	1396		1396		1396		1396	
Zusatzmittel Weinsäure	0,20%		0,20%		0,20%		0,20%	
FM	BASF Glenium T 803 N		BASF Melflux 1641 F (Pulver)		BASF Glenium Sky 581		BASF Glenium C330	
	Dosierung [vom Zement]	Fließmaß (Hägemann-Trichter) [cm]	Dosierung [vom Zement]	Fließmaß (Hägemann-Trichter) [cm]	Dosierung [vom Zement]	Fließmaß (Hägemann-Trichter) [cm]	Dosierung [vom Zement]	Fließmaß (Hägemann-Trichter) [cm]
Fließmaß in Abhängigkeit der Fließmittelmenge (Zielwert ≥ 24 cm) Mischung für Abbindezeit	6,0%	18	0,7%	24	3,2%	18	3,8%	25
	11,0%	24			4,6%	26		
Erstarrungsbeginn			60 min		35 min		38 min	
Erstarrungsende			70 min		45 min		48 min	

Ausgangsstoffe	Versuch							
	SCM – FM 5		SCM – FM 6		SCM – FM 7		SCM – FM 8	
SC-45	600		600		600		600	
Wasser	252		252		252		252	
W/Z	0,42		0,42		0,42		0,42	
Gesteinskörnung	1396		1396		1396		1396	
Zusatzmittel								
Weinsäure	0,20%		0,20%		0,20%		0,20%	
FM	Betontechnik LZF (alt)		BASF Glenium C 323 Mix		Sika VC 2031		Sika VC 20 Gold	
	Dosierung [vom Zement]	Fließmaß (Hägemann-Trichter) [cm]						
Fließmaß in Abhängigkeit der Fließmittelmenge (Zielwert ≥ 24 cm) Mischung für Abbindezeit	6,0%	15	1,5%	24	4,9%	18	3,6%	18
	11,7%	20			7,0%	28	6,8%	30
	14,2%	23						
	17,4%	25						
Erstarrungsbeginn			70 min		50 min		30 min	
Erstarrungsende			80 min		65 min		40 min	

Ausgangsstoffe	Versuch							
	SCM – FM 9		SCM – FM 10		SCM – FM 11		SCM – FM 12	
SC-45	600		600		600		600	
Wasser	252		252		252		252	
W/Z	0,42		0,42		0,42		0,42	
Gesteinskörnung	1396		1396		1396		1396	
Zusatzmittel								
Weinsäure	0,20%		0,20%		0,20%		0,20%	
FM	Betontechnik LZF (neu)		BASF Glenium Sky 584		Sika VC 2031 HE (neu)		Sika VC SCC7	
	Dosierung [vom Zement]	Fließmaß (Hägemann-Trichter) [cm]						
Fließmaß in Abhängigkeit der Fließmittelmenge (Zielwert ≥ 24 cm) Mischung für Abbindezeit	3,2%	14	2,2%	17	2,3%	14	1,5%	20
	6,1%	17	3,1%	27	4,9%	23	1,7%	26
	11,0%	21			5,2%	26	2,5%	29
	16,0%	25						
Erstarrungsbeginn			50 min		40 min		38 min	
Erstarrungsende			60 min		53 min		48 min	

MESSREIHEN PERMEABILITÄT



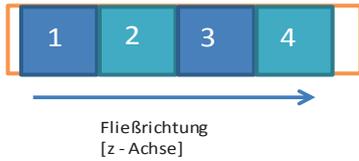


PROTOKOLLE DER FASERORIENTIERUNGSMESSUNG

Messprotokoll 1 Faserorientierung im Balken 1	301
Messprotokoll 2 Faserorientierung im Balken 2	302
Messprotokoll 3 Faserorientierung im Balken 3	303
Messprotokoll 4 Faserorientierung im Balken 4	304
Messprotokoll 5 Faserorientierung im Balken II-1	305
Messprotokoll 6 Faserorientierung im Balken II-2	306
Messprotokoll 7 Faserorientierung im Balken III-1	307
Messprotokoll 8 Faserorientierung im Balken III-2	308
Messprotokoll 9 Faserorientierung im Balken IV-1	309
Messprotokoll 10 Faserorientierung im Balken IV-2	310
Messprotokoll 11 Faserorientierung im Balken V-1	311
Messprotokoll 12 Faserorientierung im Balken V-2	312
Messprotokoll 13 Faserorientierung im Balken VI-1	313
Messprotokoll 14 Faserorientierung im Balken VI-2	314
Messprotokoll 15 Faserorientierung im Balken 9	315
Messprotokoll 16 Faserorientierung im Balken 10	316
Messprotokoll 17 Faserorientierung im Balken 11	317
Messprotokoll 18 Faserorientierung im Balken 12	318
Messprotokoll 19 Faserorientierung im Balken 13	319
Messprotokoll 20 Faserorientierung im Balken 14	320
Messprotokoll 21 Faserorientierung im Balken II-9	321
Messprotokoll 22 Faserorientierung im Balken II-10	322
Messprotokoll 23 Faserorientierung im Balken III-9	323
Messprotokoll 24 Faserorientierung im Balken III-10	324
Messprotokoll 25 Faserorientierung im Balken IV-9	325
Messprotokoll 26 Faserorientierung im Balken IV-10	326
Messprotokoll 27 Faserorientierung im Balken 5	327
Messprotokoll 28 Faserorientierung im Balken 6	328
Messprotokoll 29 Faserorientierung im Balken 7	329
Messprotokoll 30 Faserorientierung im Balken 8	330
Messprotokoll 31 Faserorientierung im Balken II-5	331
Messprotokoll 32 Faserorientierung im Balken II-6	332
Messprotokoll 33 Faserorientierung im Balken lang 1 (1/2)	333
Messprotokoll 34 Faserorientierung im Balken lang 1 (2/2)	334
Messprotokoll 35 Faserorientierung im Balken lang 2 (1/2)	335
Messprotokoll 36 Faserorientierung im Balken lang 2 (2/2)	336
Messprotokoll 37 Faserorientierung im Balken T-1	337
Messprotokoll 38 Faserorientierung im Balken T-2	338
Messprotokoll 39 Faserorientierung im Balken T-9	339
Messprotokoll 40 Faserorientierung im Balken T-10	340



Messprotokoll 41 Faserorientierung im Tübbing T1-1.....	341
Messprotokoll 42 Faserorientierung im Tübbing T1-2.....	342
Messprotokoll 43 Faserorientierung im Tübbing T1-3.....	343
Messprotokoll 44 Faserorientierung im Tübbing T1-4.....	344
Messprotokoll 45 Faserorientierung im Tübbing T1-5.....	345
Messprotokoll 46 Faserorientierung im Tübbing T2-1.....	346
Messprotokoll 47 Faserorientierung im Tübbing T2-2.....	347
Messprotokoll 48 Faserorientierung im Tübbing T2-3.....	348
Messprotokoll 49 Faserorientierung im Tübbing T2-4.....	349
Messprotokoll 50 Faserorientierung im Tübbing T2-5.....	350
Messprotokoll 51 Faserorientierung im Tübbing T2-6.....	351
Messprotokoll 52 Faserorientierung im Tübbing T2-7.....	352
Messprotokoll 53 Faserorientierung im Tübbing T2-8.....	353
Messprotokoll 54 Faserorientierung im Tübbing T2-9.....	354
Messprotokoll 55 Faserorientierung im Tübbing T2-10.....	355
Messprotokoll 56 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 1-1 & 1-2 (am Rand befüllte Prismen) mit Auswertung des Versuchs nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)	356
Messprotokoll 57 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 1-1 & 1-2 (über Rampe gefüllte Prismenform) mit Auswertung des Versuchs nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)	357
Messprotokoll 58 Faserorientierung Tübbing Zams I (1/2).....	358
Messprotokoll 59 Messprotokoll Tübbing Zams I (2/2).....	359
Messprotokoll 60 Faserorientierung Tübbing Zams II (1/2).....	360
Messprotokoll 61 Faserorientierung Tübbing Zams II (2/2).....	361



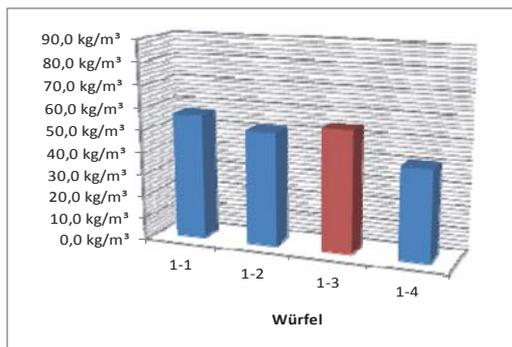
Würfel	1-1
Gemessene Menge	34,9 kg/m ³
berechnete Menge	56,5 kg/m ³
Y-Achse	25,9%
X-Achse	13,6%
Z- Achse	60,6%

Würfel	1-2
Gemessene Menge	31,7 kg/m ³
berechnete Menge	51,4 kg/m ³
Y-Achse	20,3%
X-Achse	17,8%
Z- Achse	61,9%

Würfel	1-3	Bruchzone
Gemessene Menge	33,9 kg/m ³	
berechnete Menge	54,9 kg/m ³	
Y-Achse	24,2%	
X-Achse	22,6%	
Z- Achse	53,2%	

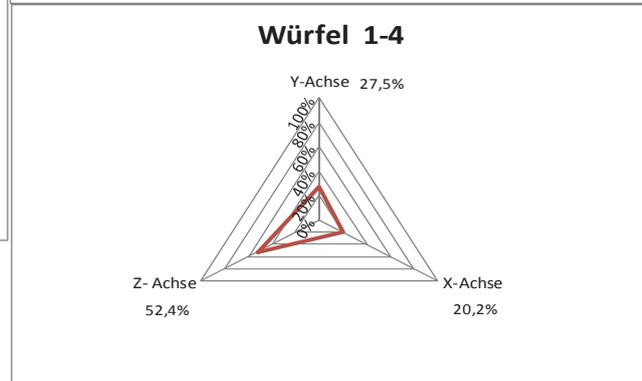
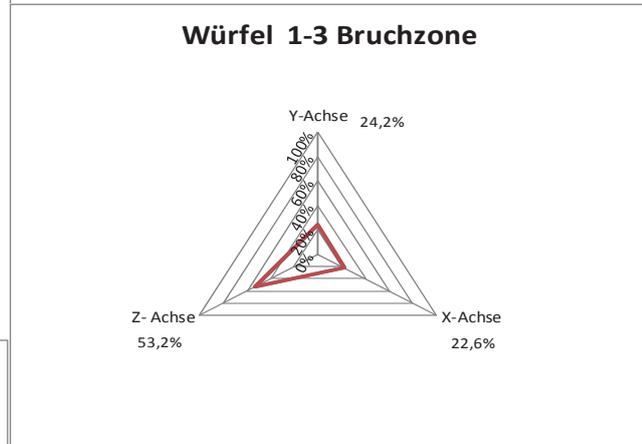
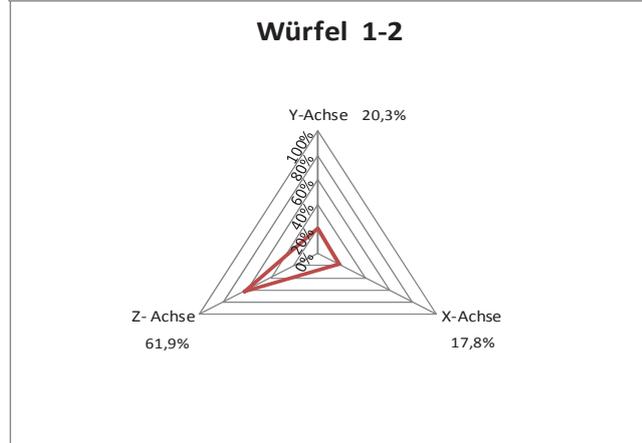
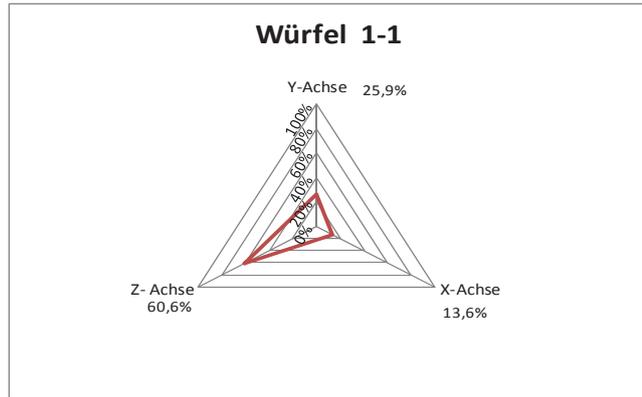
Würfel	1-4
Gemessene Menge	25,2 kg/m ³
berechnete Menge	40,8 kg/m ³
Y-Achse	27,5%
X-Achse	20,2%
Z- Achse	52,4%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 50,9 kg/m³

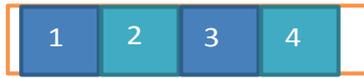


Rezeptur 1

Fließmaß 64 cm



Messprotokoll 1 Faserorientierung im Balken 1



Fließrichtung
[z - Achse]

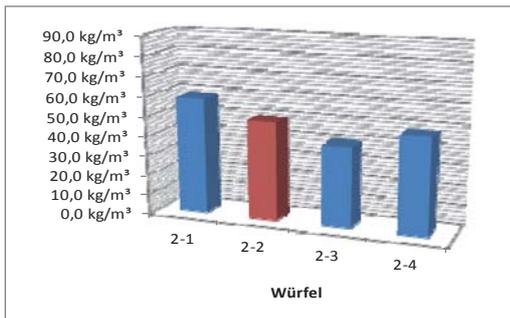
Würfel	2-1
Gemessene Menge	36,2 kg/m ³
berechnete Menge	58,6 kg/m ³
Y-Achse	20,0%
X-Achse	16,2%
Z- Achse	63,8%

Würfel	2-2	Bruchzone
Gemessene Menge	30,5 kg/m ³	
berechnete Menge	49,4 kg/m ³	
Y-Achse	19,7%	
X-Achse	23,7%	
Z- Achse	56,7%	

Würfel	2-3
Gemessene Menge	24,8 kg/m ³
berechnete Menge	40,2 kg/m ³
Y-Achse	24,3%
X-Achse	21,4%
Z- Achse	54,3%

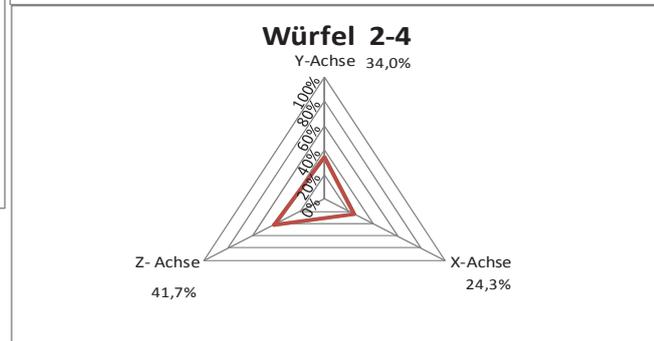
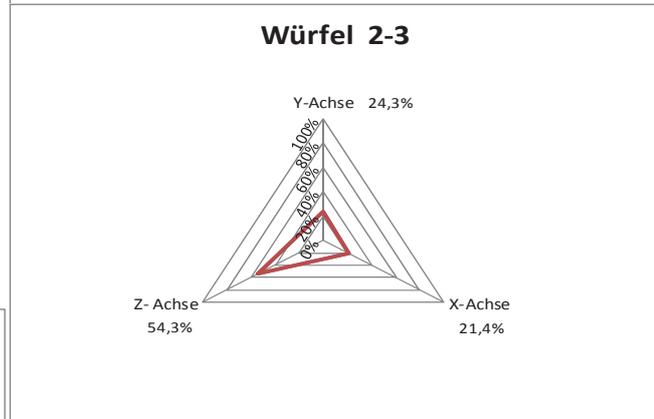
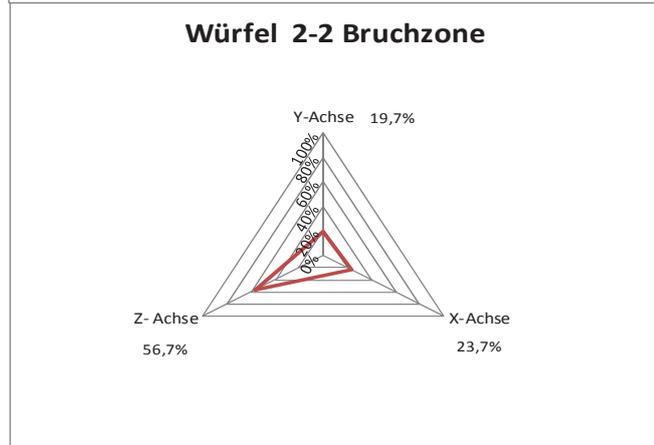
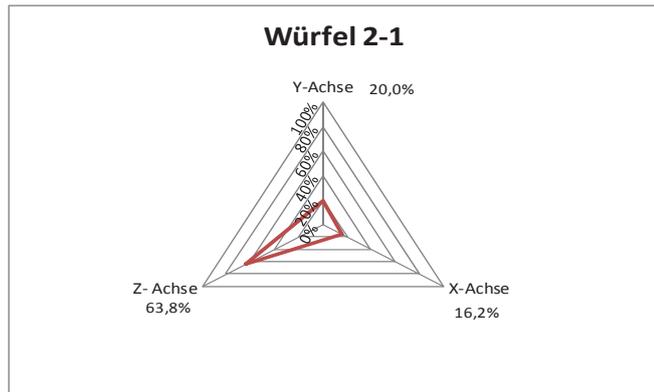
Würfel	2-4
Gemessene Menge	29,7 kg/m ³
berechnete Menge	48,1 kg/m ³
Y-Achse	34,0%
X-Achse	24,3%
Z- Achse	41,7%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 49,1 kg/m³



Rezeptur 1

Fließmaß 64 cm



Messprotokoll 2 Faserorientierung im Balken 2



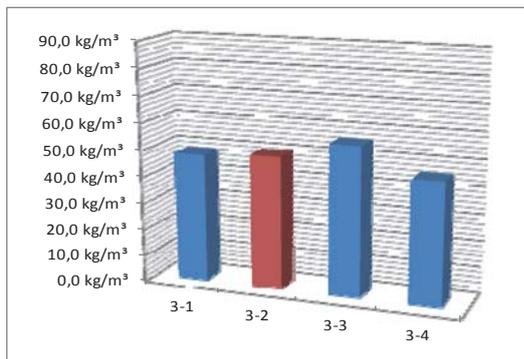
Würfel	3-1
Gemessene Menge	25,4 kg/m ³
berechnete Menge	48,1 kg/m ³
Y-Achse	22,8%
X-Achse	19,1%
Z- Achse	58,1%

Würfel	3-2	Bruchzone
Gemessene Menge	26,2 kg/m ³	
berechnete Menge	49,6 kg/m ³	
Y-Achse	21,1%	
X-Achse	16,7%	
Z- Achse	62,3%	

Würfel	3-3
Gemessene Menge	29,5 kg/m ³
berechnete Menge	55,8 kg/m ³
Y-Achse	26,9%
X-Achse	17,4%
Z- Achse	55,7%

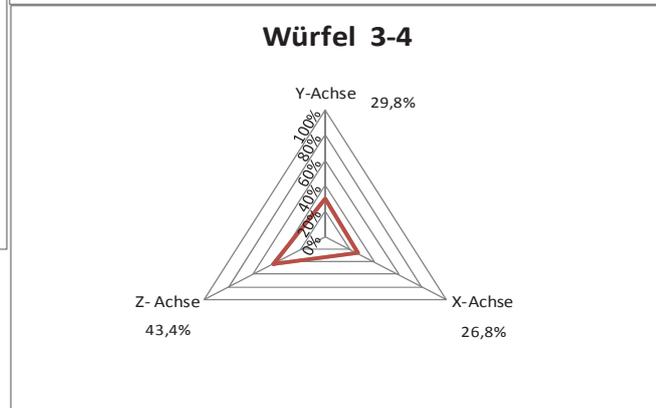
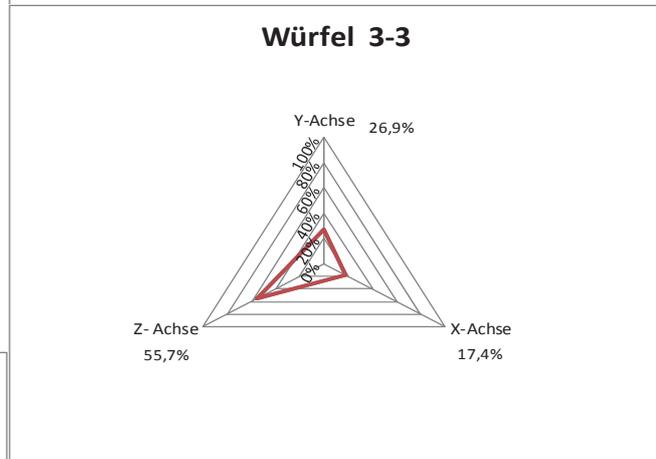
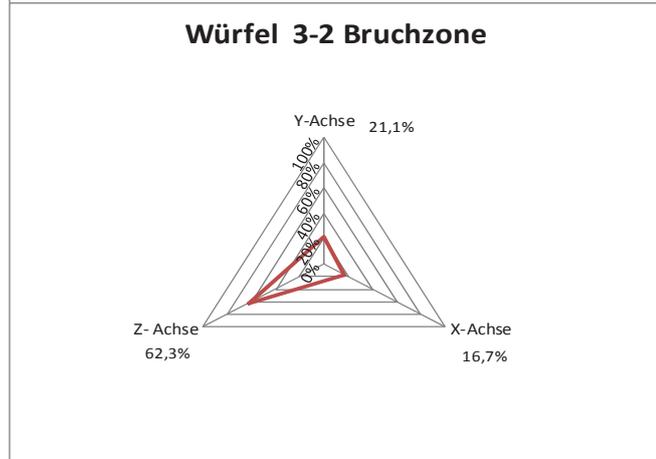
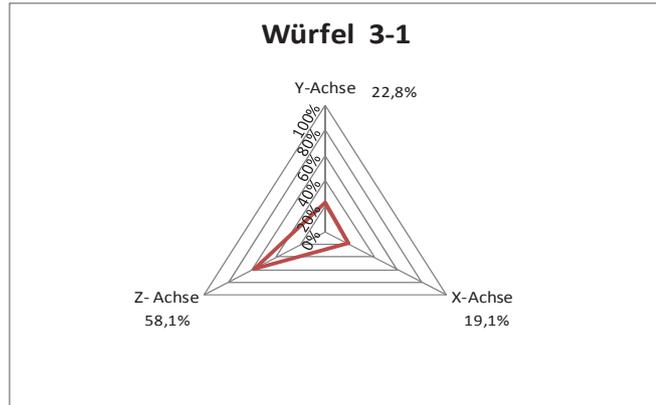
Würfel	3-4
Gemessene Menge	24,2 kg/m ³
berechnete Menge	45,8 kg/m ³
Y-Achse	29,8%
X-Achse	26,8%
Z- Achse	43,4%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 49,8 kg/m³



Rezeptur 1

Fließmaß 66 cm



Messprotokoll 3 Faserorientierung im Balken 3



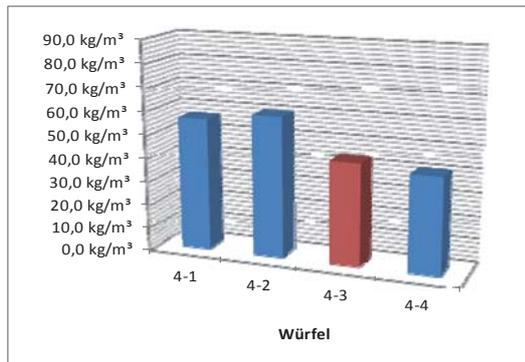
Würfel 4-1	
Gemessene Menge	29,9 kg/m ³
berechnete Menge	56,6 kg/m ³
Y-Achse	27,7%
X-Achse	14,2%
Z- Achse	58,1%

Würfel 4-2	
Gemessene Menge	31,6 kg/m ³
berechnete Menge	59,8 kg/m ³
Y-Achse	25,1%
X-Achse	19,8%
Z- Achse	55,1%

Würfel 4-3		Bruchzone
Gemessene Menge	22,9 kg/m ³	
berechnete Menge	43,4 kg/m ³	
Y-Achse	26,4%	
X-Achse	20,5%	
Z- Achse	53,1%	

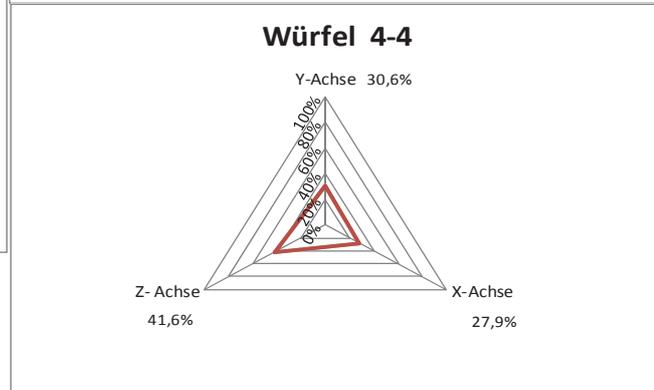
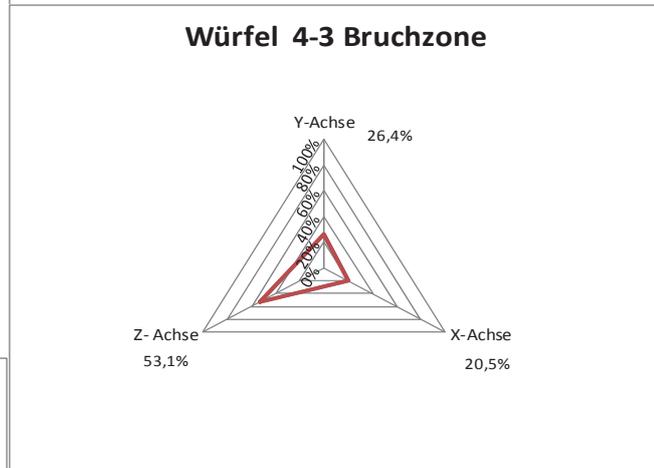
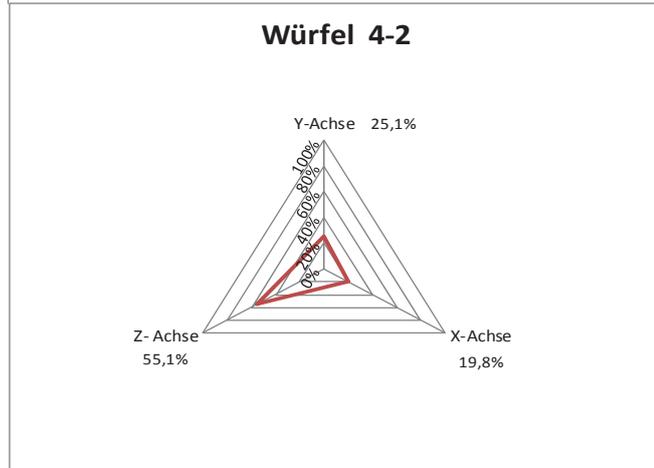
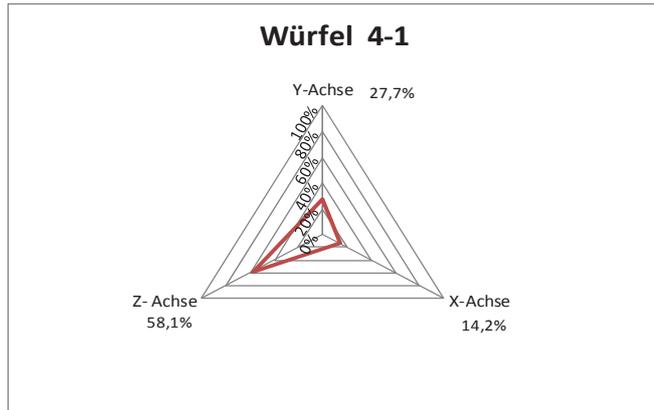
Würfel 4-4	
Gemessene Menge	21,6 kg/m ³
berechnete Menge	40,9 kg/m ³
Y-Achse	30,6%
X-Achse	27,9%
Z- Achse	41,6%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 50,2 kg/m³

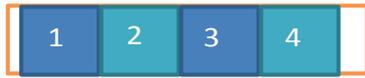


Rezeptur 1

Fließmaß 66 cm



Messprotokoll 4 Faserorientierung im Balken 4



Fließrichtung
[z - Achse]

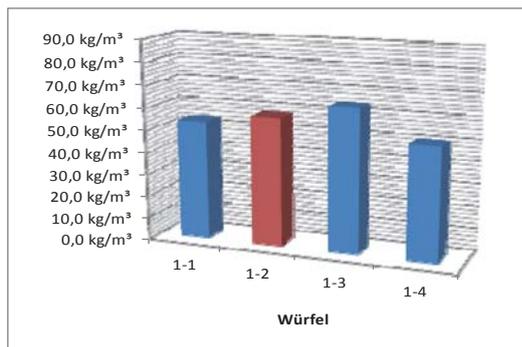
Würfel	1-1
Gemessene Menge	43,1 kg/m ³
berechnete Menge	53,6 kg/m ³
Y-Achse	32,8%
X-Achse	16,4%
Z- Achse	50,8%

Würfel	1-2	Bruchzone
Gemessene Menge	46,4 kg/m ³	
berechnete Menge	57,7 kg/m ³	
Y-Achse	29,9%	
X-Achse	21,2%	
Z- Achse	48,9%	

Würfel	1-3
Gemessene Menge	51,7 kg/m ³
berechnete Menge	64,3 kg/m ³
Y-Achse	31,4%
X-Achse	21,1%
Z- Achse	47,5%

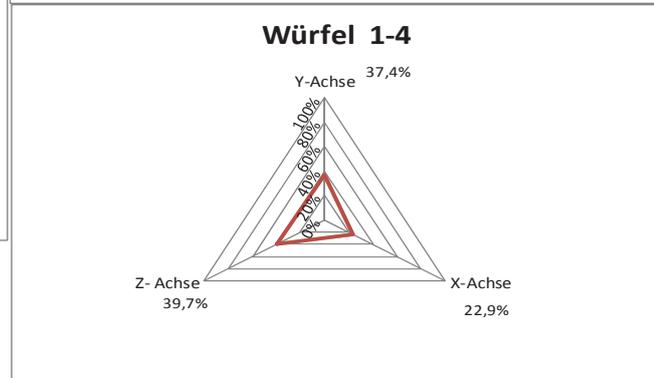
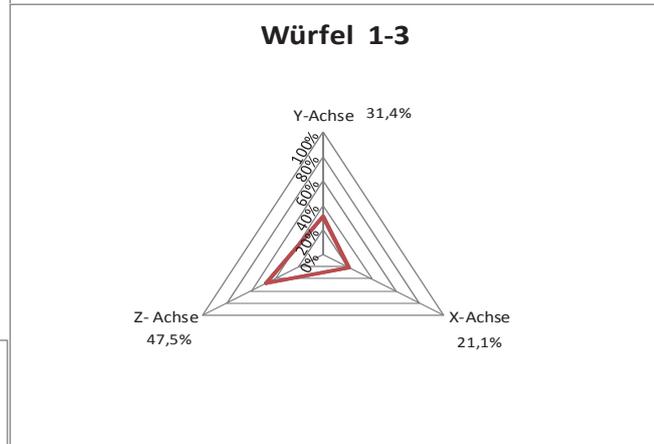
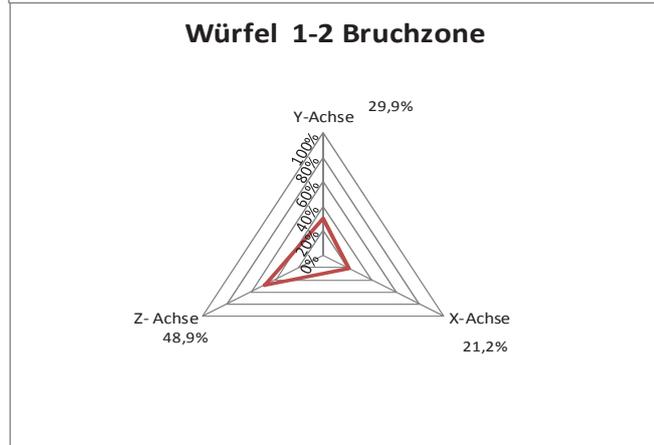
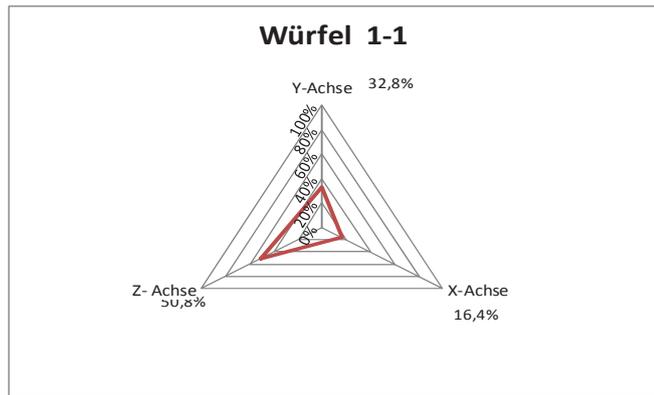
Würfel	1-4
Gemessene Menge	40,8 kg/m ³
berechnete Menge	50,7 kg/m ³
Y-Achse	37,4%
X-Achse	22,9%
Z- Achse	39,7%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 56,6 kg/m³



Rezeptur 2

Fließmaß 63 cm



Messprotokoll 5 Faserorientierung im Balken II-1



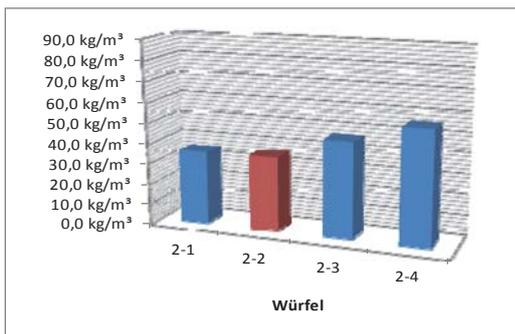
Würfel	2-1
Gemessene Menge	28,5 kg/m ³
berechnete Menge	35,4 kg/m ³
Y-Achse	20,5%
X-Achse	18,2%
Z- Achse	61,4%

Würfel	2-2	Bruchzone
Gemessene Menge	28,9 kg/m ³	
berechnete Menge	35,9 kg/m ³	
Y-Achse	26,1%	
X-Achse	24,3%	
Z- Achse	49,5%	

Würfel	2-3
Gemessene Menge	37,7 kg/m ³
berechnete Menge	46,9 kg/m ³
Y-Achse	32,2%
X-Achse	22,7%
Z- Achse	45,1%

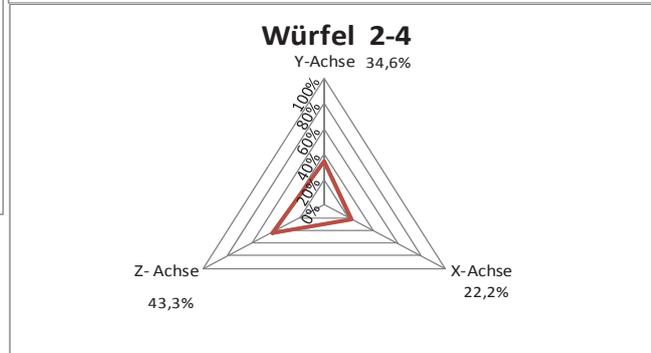
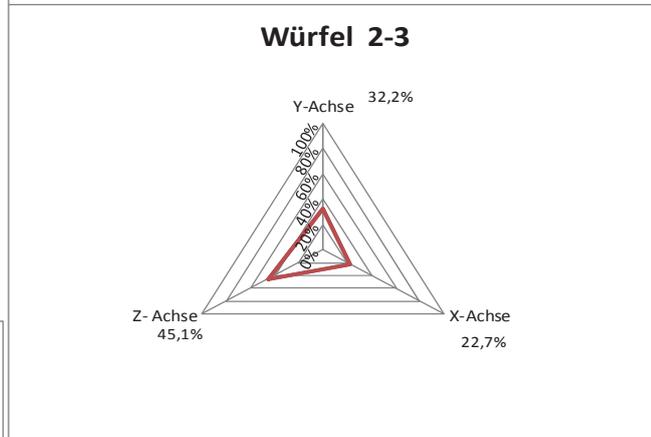
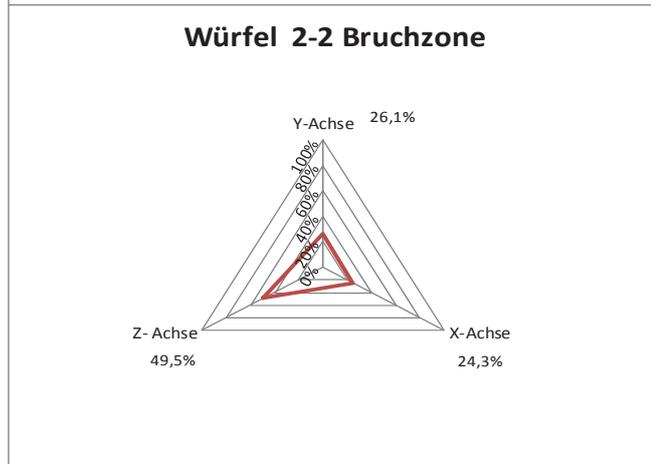
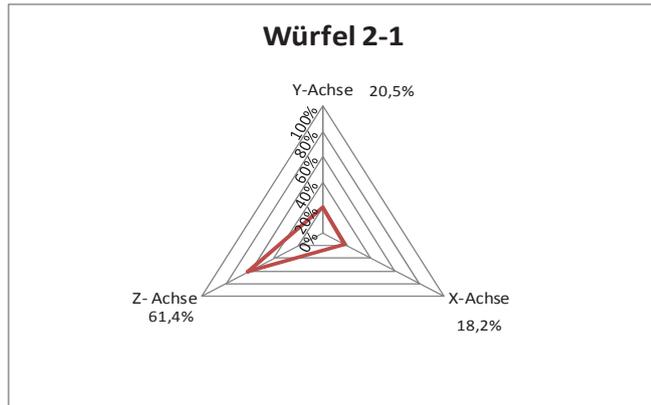
Würfel	2-4
Gemessene Menge	44,7 kg/m ³
berechnete Menge	55,6 kg/m ³
Y-Achse	34,6%
X-Achse	22,2%
Z- Achse	43,3%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 43,4 kg/m³

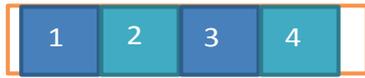


Rezeptur 2

Fließmaß 63 cm



Messprotokoll 6 Faserorientierung im Balken II-2



Fließrichtung
[z - Achse]

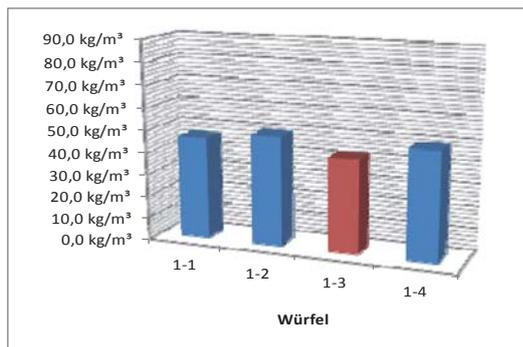
Würfel 1-1	
Gemessene Menge	37,6 kg/m ³
berechnete Menge	46,4 kg/m ³
Y-Achse	25,8%
X-Achse	17,4%
Z- Achse	56,8%

Würfel 1-2	
Gemessene Menge	40,2 kg/m ³
berechnete Menge	49,6 kg/m ³
Y-Achse	29,5%
X-Achse	25,7%
Z- Achse	44,9%

Würfel 1-3 Bruchzone	
Gemessene Menge	34,2 kg/m ³
berechnete Menge	42,2 kg/m ³
Y-Achse	22,6%
X-Achse	27,2%
Z- Achse	50,2%

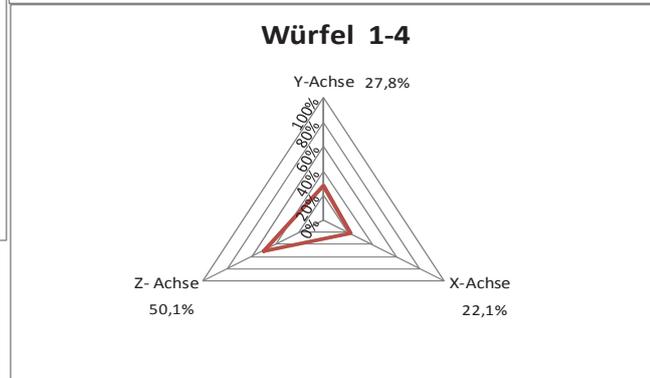
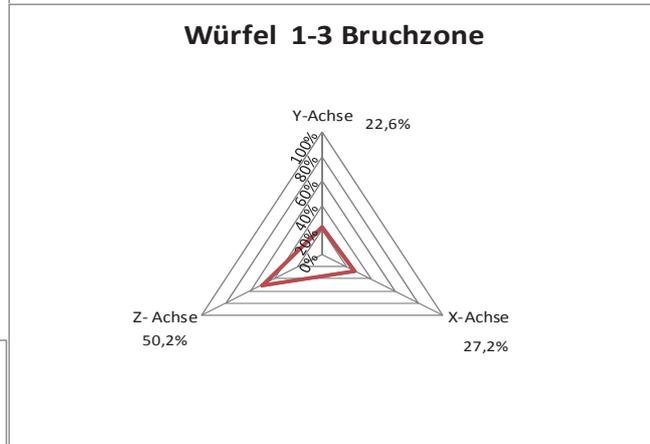
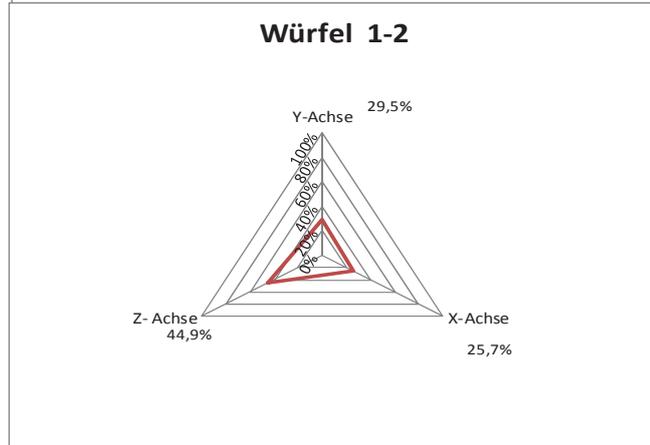
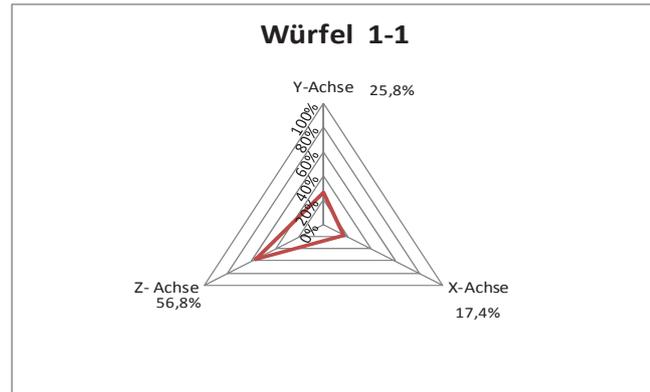
Würfel 1-4	
Gemessene Menge	39,8 kg/m ³
berechnete Menge	49,1 kg/m ³
Y-Achse	27,8%
X-Achse	22,1%
Z- Achse	50,1%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 46,8 kg/m³

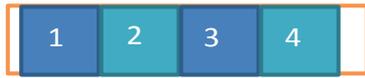


Rezeptur 3

Fließmaß 68 cm



Messprotokoll 7 Faserorientierung im Balken III-1



Fließrichtung
[z - Achse]

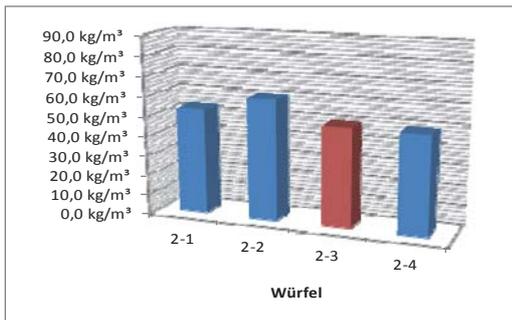
Würfel	2-1
Gemessene Menge	43,1 kg/m ³
berechnete Menge	53,2 kg/m ³
Y-Achse	27,8%
X-Achse	25,7%
Z- Achse	46,5%

Würfel	2-2
Gemessene Menge	49,1 kg/m ³
berechnete Menge	60,6 kg/m ³
Y-Achse	29,7%
X-Achse	27,3%
Z- Achse	43,0%

Würfel	2-3	Bruchzone
Gemessene Menge	40,2 kg/m ³	
berechnete Menge	49,6 kg/m ³	
Y-Achse	26,9%	
X-Achse	28,4%	
Z- Achse	44,7%	

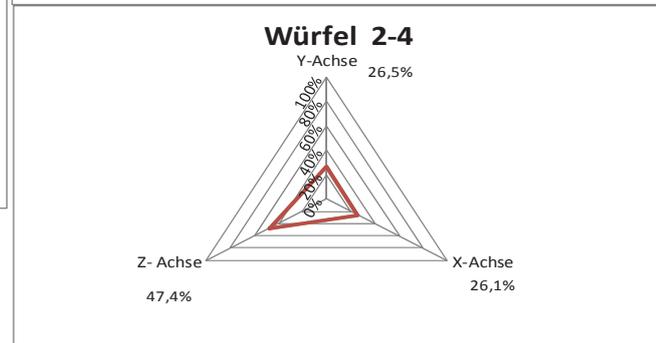
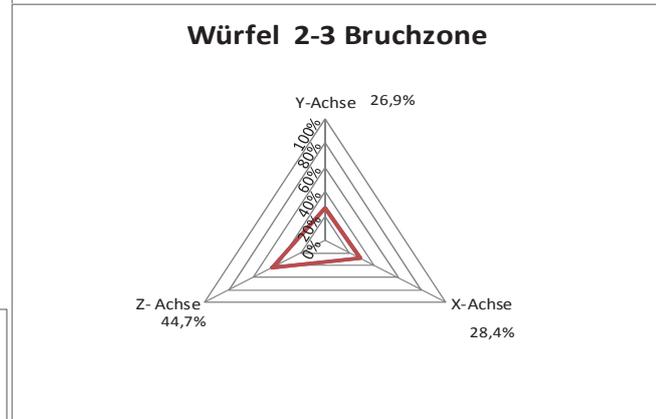
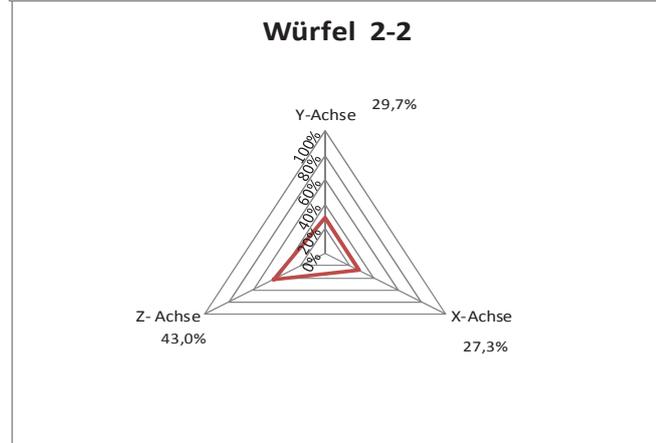
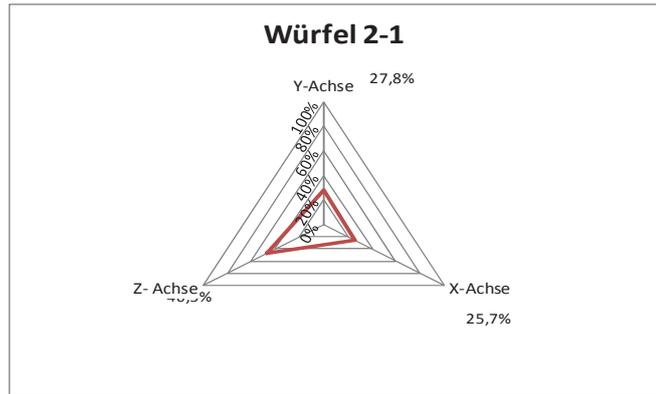
Würfel	2-4
Gemessene Menge	40,1 kg/m ³
berechnete Menge	49,5 kg/m ³
Y-Achse	26,5%
X-Achse	26,1%
Z- Achse	47,4%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 53,2 kg/m³



Rezeptur 3

Fließmaß 68 cm



Messprotokoll 8 Faserorientierung im Balken III-2



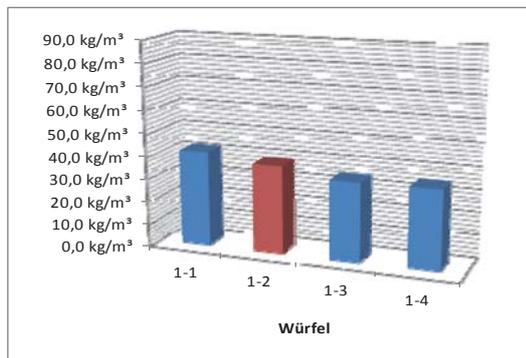
Würfel	1-1
Gemessene Menge	36,9 kg/m ³
berechnete Menge	41,7 kg/m ³
Y-Achse	28,0%
X-Achse	18,0%
Z- Achse	54,1%

Würfel	1-2	Bruchzone
Gemessene Menge	34,1 kg/m ³	
berechnete Menge	38,5 kg/m ³	
Y-Achse	24,3%	
X-Achse	24,2%	
Z- Achse	51,6%	

Würfel	1-3
Gemessene Menge	30,3 kg/m ³
berechnete Menge	34,2 kg/m ³
Y-Achse	23,9%
X-Achse	19,5%
Z- Achse	56,6%

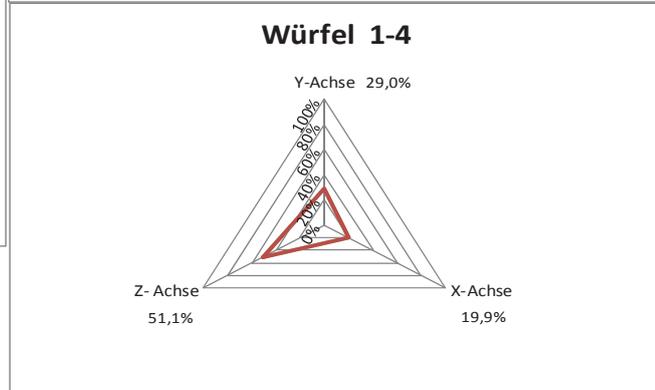
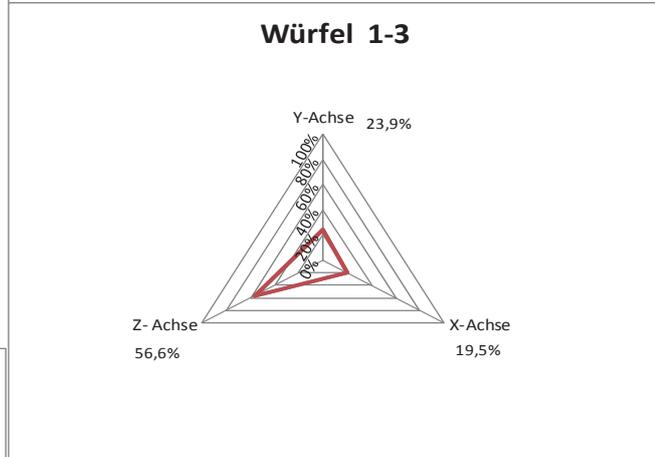
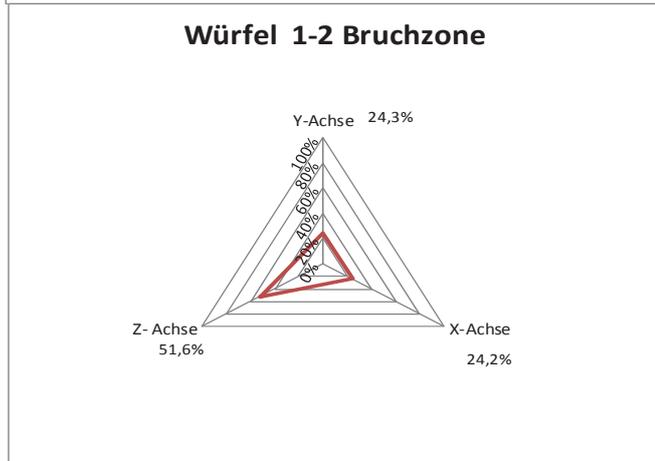
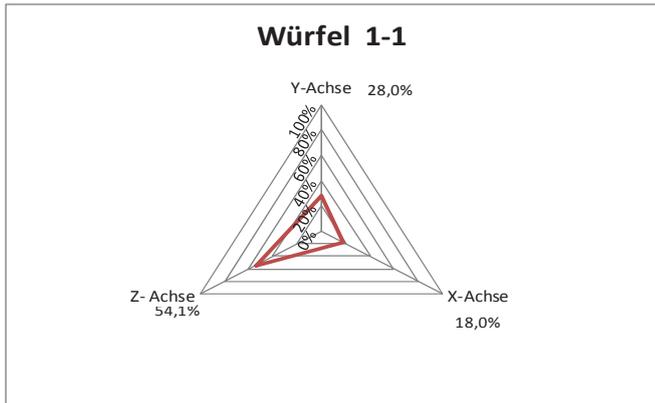
Würfel	1-4
Gemessene Menge	30,7 kg/m ³
berechnete Menge	34,7 kg/m ³
Y-Achse	29,0%
X-Achse	19,9%
Z- Achse	51,1%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 37,3 kg/m³



Rezeptur 4

Fließmaß 69 cm



Messprotokoll 9 Faserorientierung im Balken IV-1



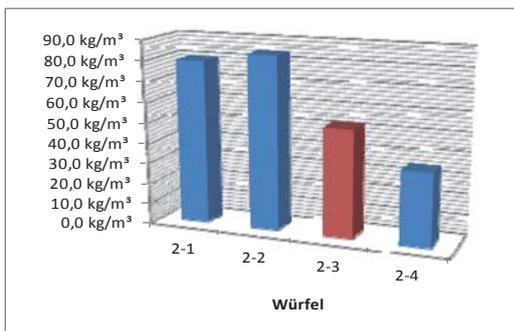
Würfel	2-1
Gemessene Menge	70,3 kg/m ³
berechnete Menge	79,5 kg/m ³
Y-Achse	27,9%
X-Achse	16,0%
Z- Achse	56,1%

Würfel	2-2
Gemessene Menge	74,2 kg/m ³
berechnete Menge	83,9 kg/m ³
Y-Achse	25,2%
X-Achse	22,3%
Z- Achse	52,5%

Würfel	2-3	Bruchzone
Gemessene Menge	46,2 kg/m ³	
berechnete Menge	52,2 kg/m ³	
Y-Achse	28,7%	
X-Achse	15,9%	
Z- Achse	55,4%	

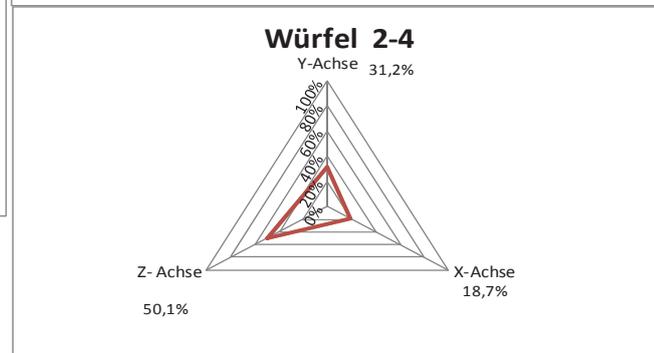
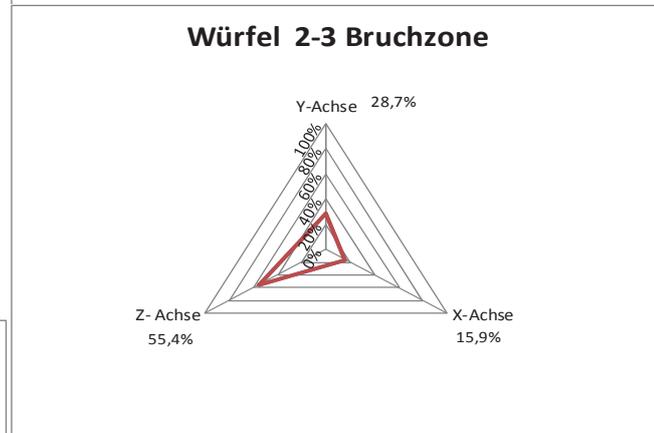
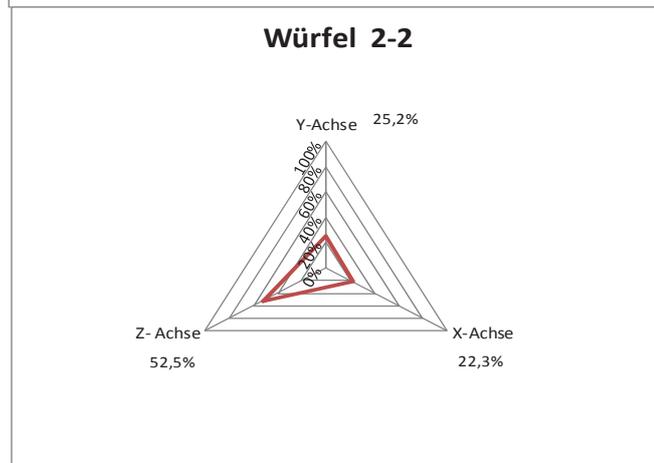
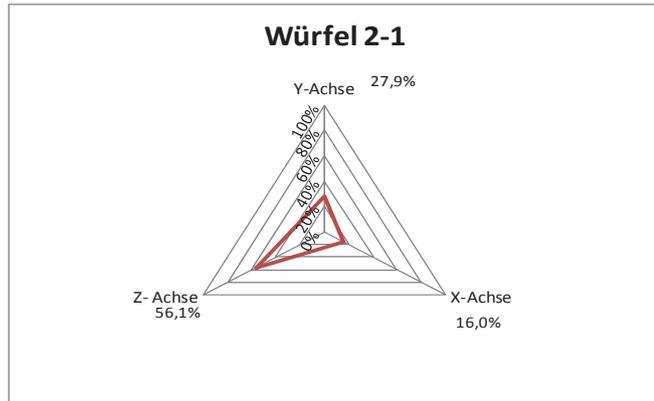
Würfel	2-4
Gemessene Menge	31,2 kg/m ³
berechnete Menge	35,3 kg/m ³
Y-Achse	31,2%
X-Achse	18,7%
Z- Achse	50,1%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 62,7 kg/m³



Rezeptur 4

Fließmaß 69 cm



Messprotokoll 10 Faserorientierung im Balken IV-2



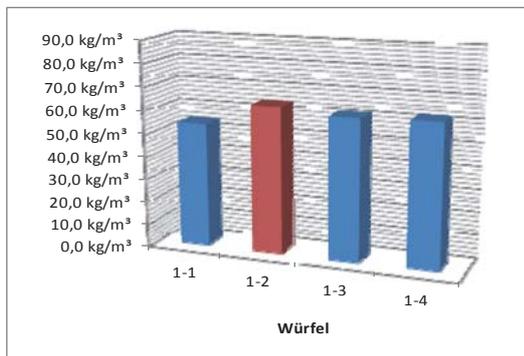
Würfel	1-1
Gemessene Menge	78,1 kg/m ³
berechnete Menge	54,1 kg/m ³
Y-Achse	36,0%
X-Achse	14,9%
Z- Achse	48,8%

Würfel	1-2	Bruchzone
Gemessene Menge	92,2 kg/m ³	
berechnete Menge	63,8 kg/m ³	
Y-Achse	34,5%	
X-Achse	19,1%	
Z- Achse	46,3%	

Würfel	1-3
Gemessene Menge	88,5 kg/m ³
berechnete Menge	61,3 kg/m ³
Y-Achse	33,9%
X-Achse	23,2%
Z- Achse	42,9%

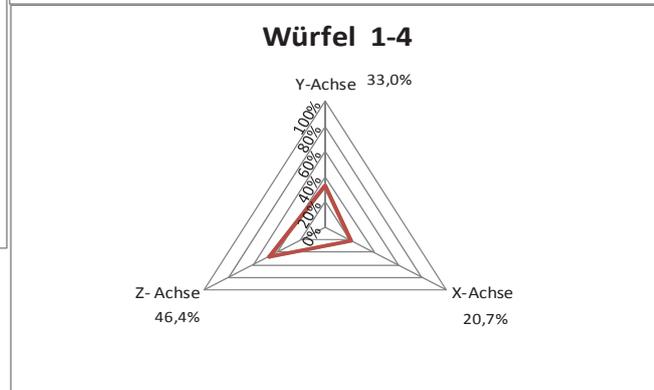
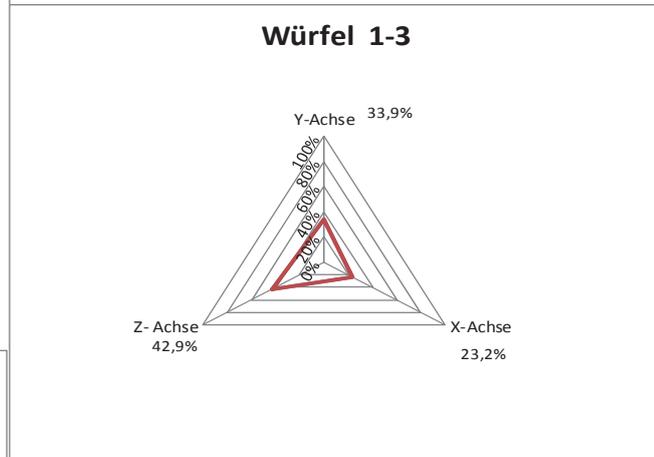
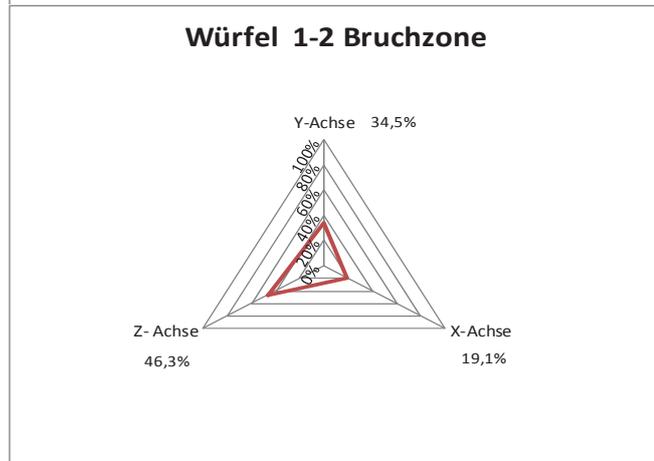
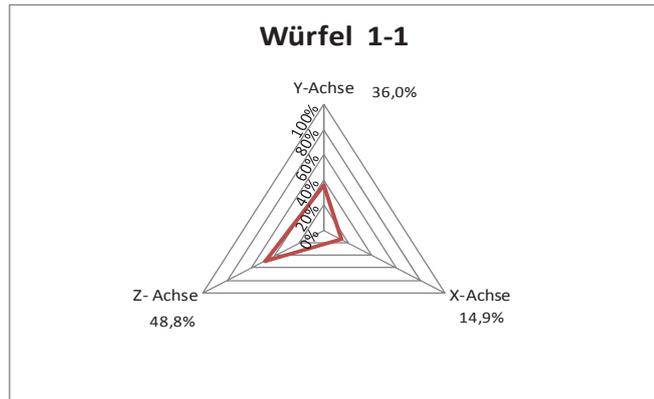
Würfel	1-4
Gemessene Menge	89,9 kg/m ³
berechnete Menge	62,2 kg/m ³
Y-Achse	33,0%
X-Achse	20,7%
Z- Achse	46,4%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 60,4 kg/m³



Rezeptur 5

Fließmaß 68 cm



Messprotokoll 11 Faserorientierung im Balken V-1



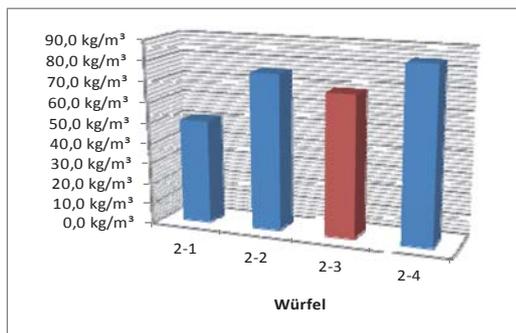
Würfel	2-1
Gemessene Menge	72,7 kg/m ³
berechnete Menge	50,3 kg/m ³
Y-Achse	30,3%
X-Achse	17,2%
Z- Achse	52,5%

Würfel	2-2
Gemessene Menge	109,2 kg/m ³
berechnete Menge	75,6 kg/m ³
Y-Achse	30,6%
X-Achse	13,0%
Z- Achse	56,4%

Würfel	2-3	Bruchzone
Gemessene Menge	98,8 kg/m ³	
berechnete Menge	68,4 kg/m ³	
Y-Achse	31,3%	
X-Achse	17,8%	
Z- Achse	50,9%	

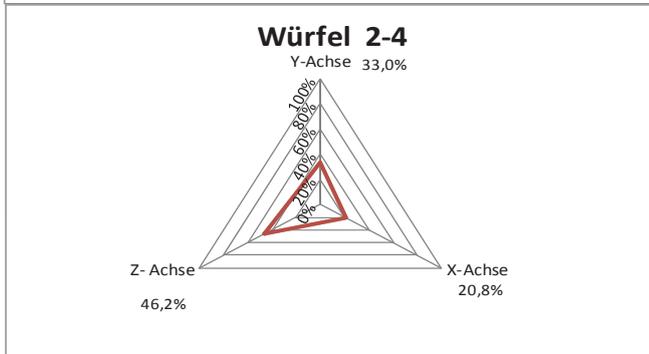
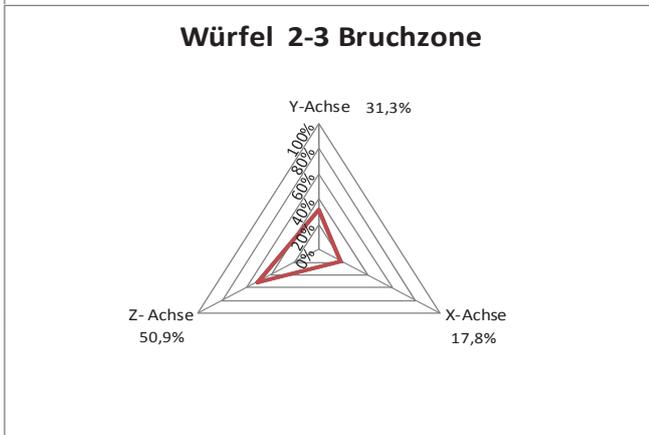
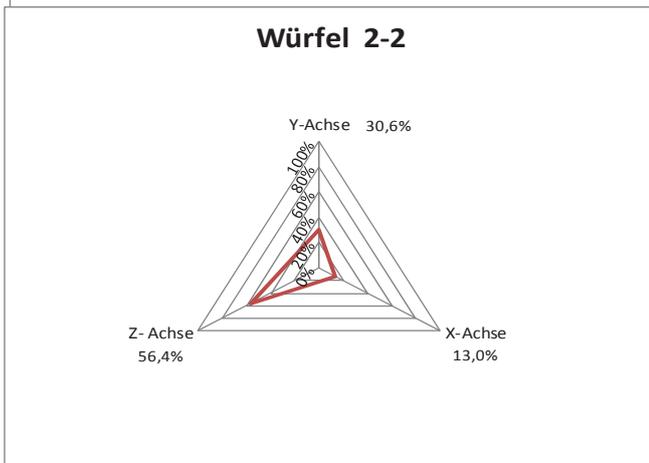
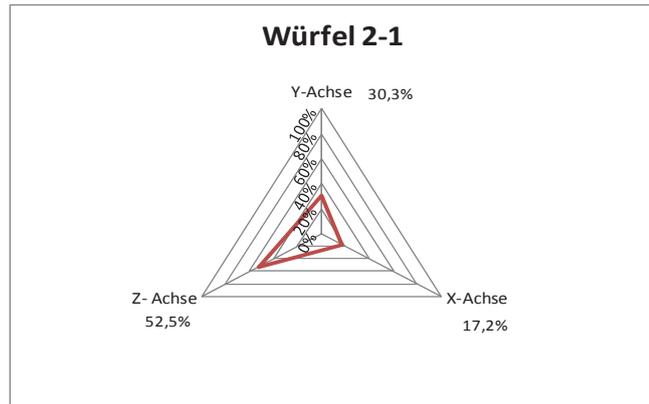
Würfel	2-4
Gemessene Menge	121,6 kg/m ³
berechnete Menge	84,2 kg/m ³
Y-Achse	33,0%
X-Achse	20,8%
Z- Achse	46,2%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 69,6 kg/m³



Rezeptur 5

Fließmaß 68 cm



Messprotokoll 12 Faserorientierung im Balken V-2



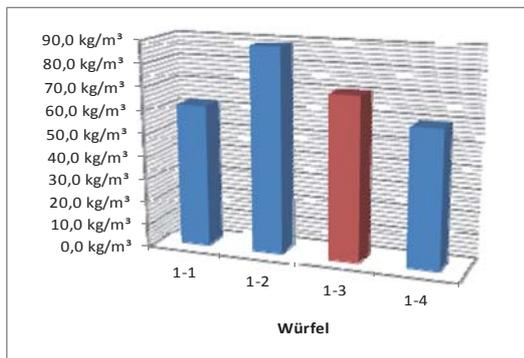
Würfel	1-1
Gemessene Menge	31,0 kg/m ³
berechnete Menge	62,0 kg/m ³
Y-Achse	25,9%
X-Achse	14,7%
Z- Achse	59,4%

Würfel	1-2
Gemessene Menge	44,1 kg/m ³
berechnete Menge	88,2 kg/m ³
Y-Achse	28,3%
X-Achse	24,1%
Z- Achse	47,6%

Würfel	1-3	Bruchzone
Gemessene Menge	35,3 kg/m ³	
berechnete Menge	70,6 kg/m ³	
Y-Achse	30,3%	
X-Achse	29,3%	
Z- Achse	40,4%	

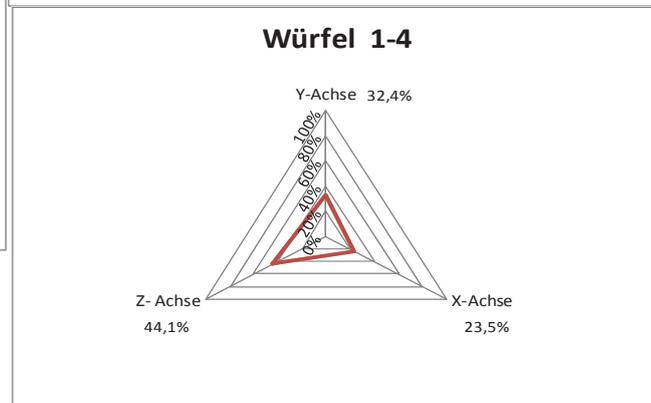
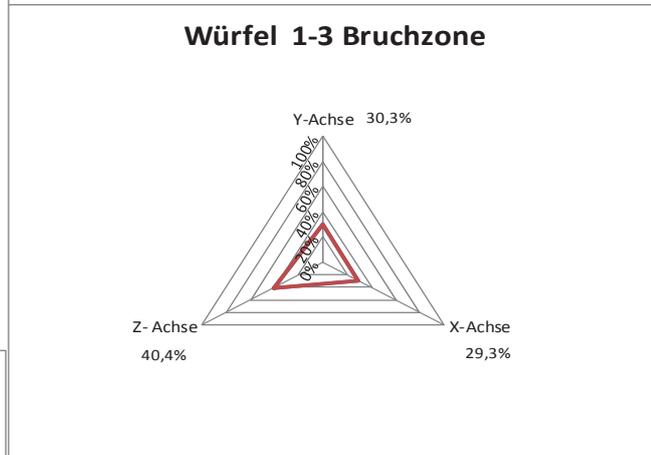
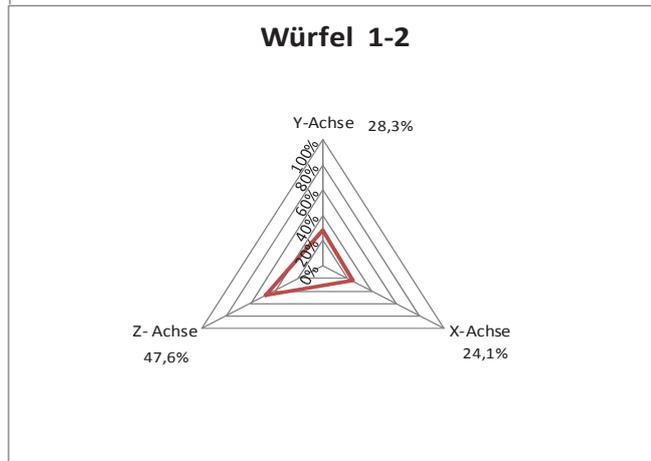
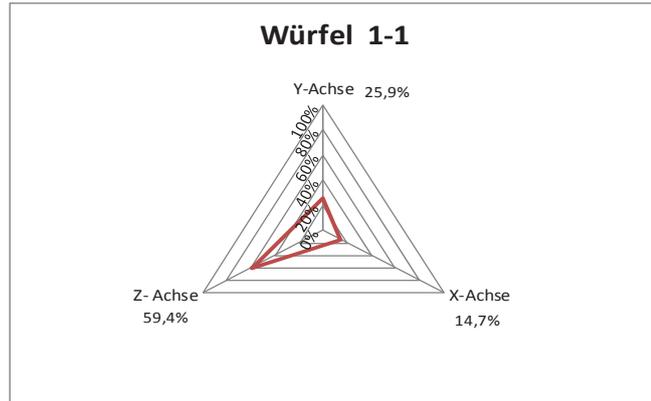
Würfel	1-4
Gemessene Menge	29,8 kg/m ³
berechnete Menge	59,6 kg/m ³
Y-Achse	32,4%
X-Achse	23,5%
Z- Achse	44,1%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 70,1 kg/m³



Rezeptur 6

Fließmaß 70 cm



Messprotokoll 13 Faserorientierung im Balken VI-1



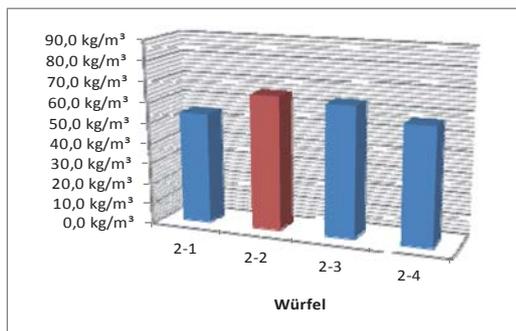
Würfel	2-1
Gemessene Menge	27,2 kg/m ³
berechnete Menge	54,4 kg/m ³
Y-Achse	28,9%
X-Achse	26,3%
Z-Achse	44,7%

Würfel	2-2	Bruchzone
Gemessene Menge	32,6 kg/m ³	
berechnete Menge	65,2 kg/m ³	
Y-Achse	25,1%	
X-Achse	34,4%	
Z-Achse	40,5%	

Würfel	2-3
Gemessene Menge	31,7 kg/m ³
berechnete Menge	63,4 kg/m ³
Y-Achse	31,3%
X-Achse	30,0%
Z-Achse	38,7%

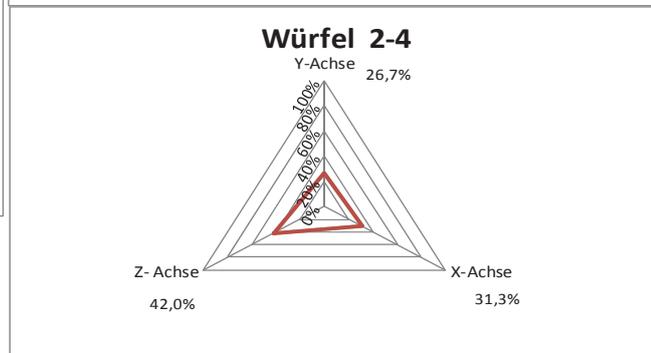
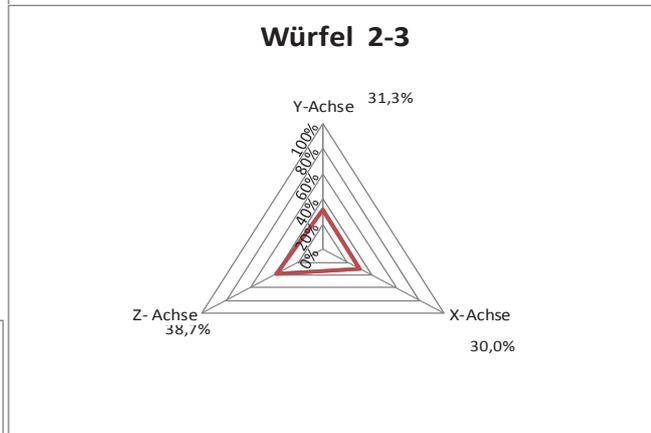
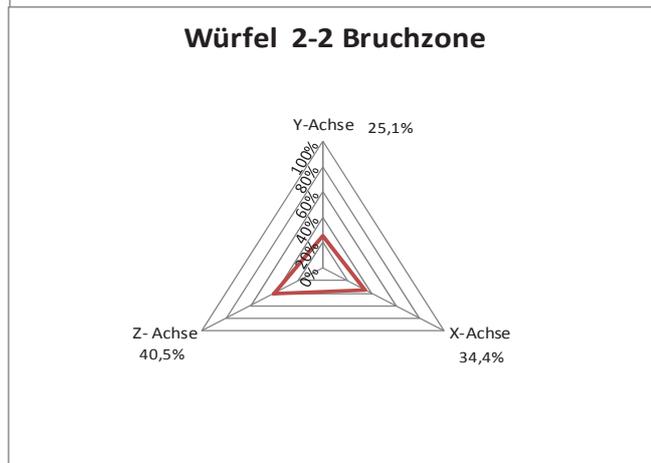
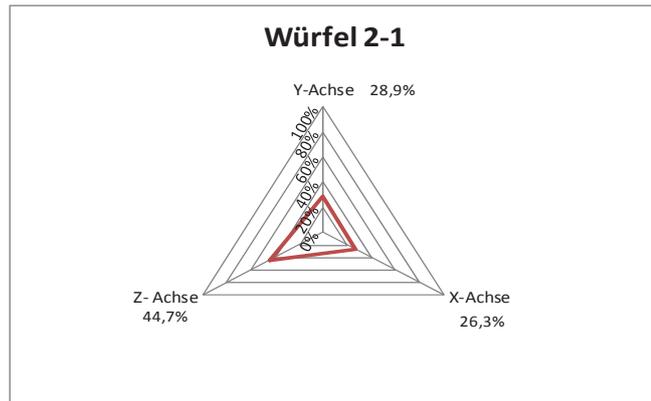
Würfel	2-4
Gemessene Menge	28,4 kg/m ³
berechnete Menge	56,8 kg/m ³
Y-Achse	26,7%
X-Achse	31,3%
Z-Achse	42,0%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 59,9 kg/m³



Rezeptur 6

Fließmaß 70 cm



Messprotokoll 14 Faserorientierung im Balken VI-2



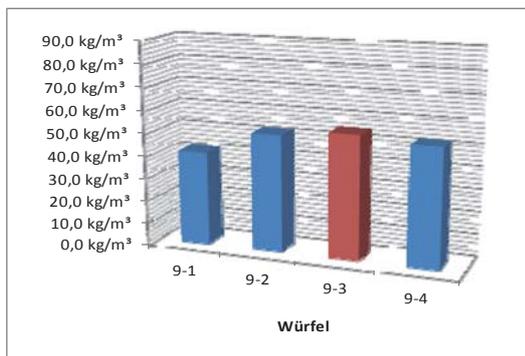
Würfel	9-1
Gemessene Menge	16,3 kg/m ³
berechnete Menge	41,4 kg/m ³
Y-Achse	35,1%
X-Achse	23,0%
Z- Achse	41,8%

Würfel	9-2
Gemessene Menge	20,4 kg/m ³
berechnete Menge	51,8 kg/m ³
Y-Achse	28,5%
X-Achse	15,8%
Z- Achse	55,7%

Würfel	9-3	Bruchzone
Gemessene Menge	21,5 kg/m ³	
berechnete Menge	54,6 kg/m ³	
Y-Achse	29,7%	
X-Achse	17,0%	
Z- Achse	53,3%	

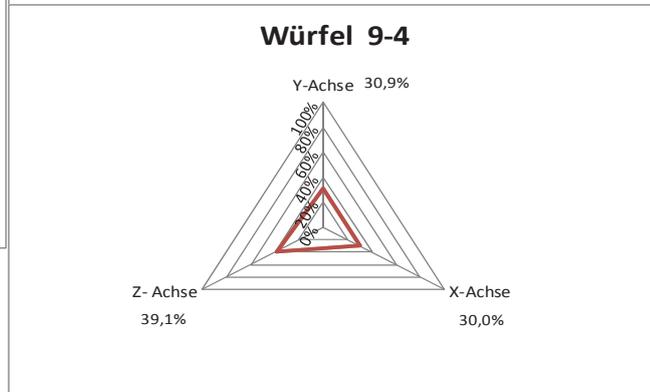
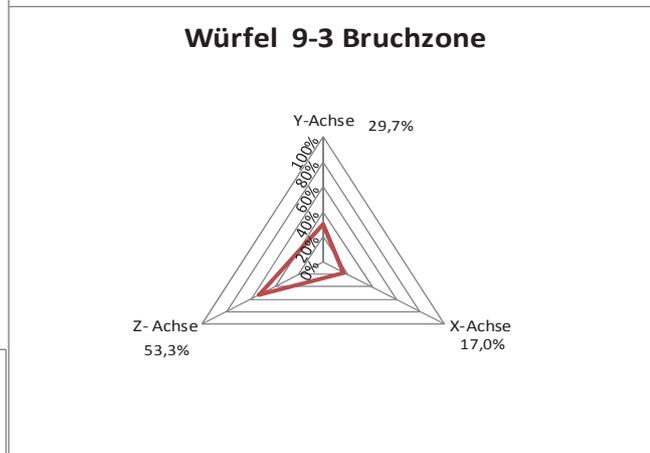
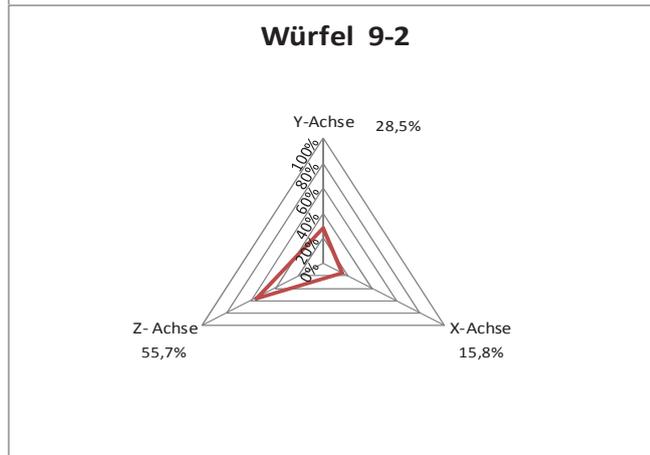
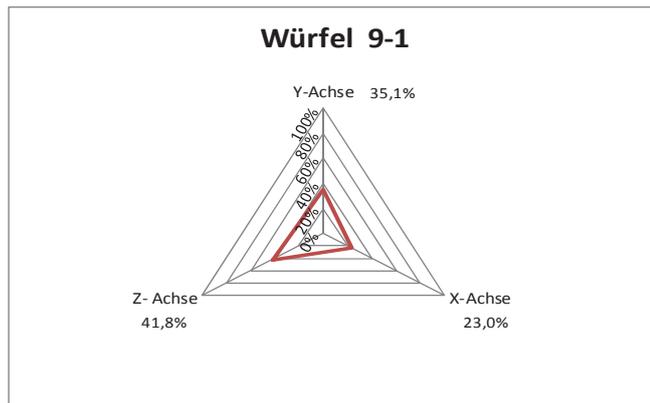
Würfel	9-4
Gemessene Menge	20,5 kg/m ³
berechnete Menge	52,1 kg/m ³
Y-Achse	30,9%
X-Achse	30,0%
Z- Achse	39,1%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 50,0 kg/m³



Rezeptur 1

Fließmaß 58 cm



Messprotokoll 15 Faserorientierung im Balken 9



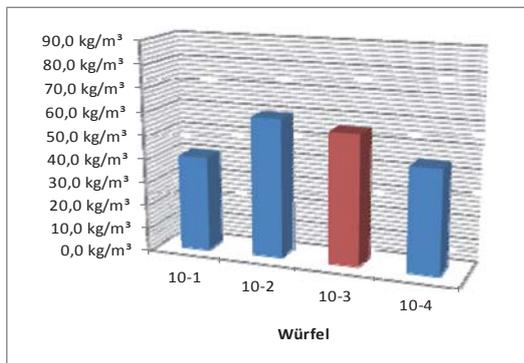
Würfel	10-1
Gemessene Menge	15,9 kg/m ³
berechnete Menge	40,4 kg/m ³
Y-Achse	34,6%
X-Achse	23,6%
Z- Achse	41,7%

Würfel	10-2
Gemessene Menge	23,4 kg/m ³
berechnete Menge	59,4 kg/m ³
Y-Achse	32,0%
X-Achse	14,4%
Z- Achse	53,6%

Würfel	10-3	Bruchzone
Gemessene Menge	22,0 kg/m ³	
berechnete Menge	55,9 kg/m ³	
Y-Achse	29,3%	
X-Achse	11,7%	
Z- Achse	59,0%	

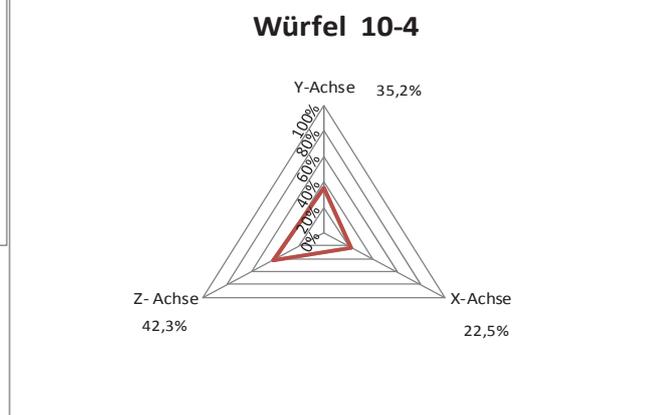
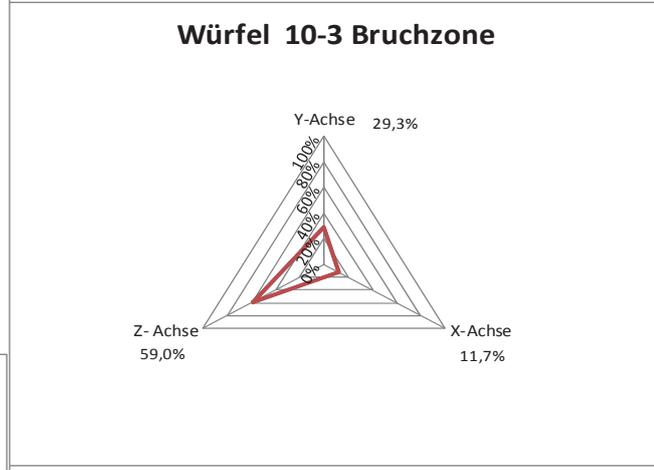
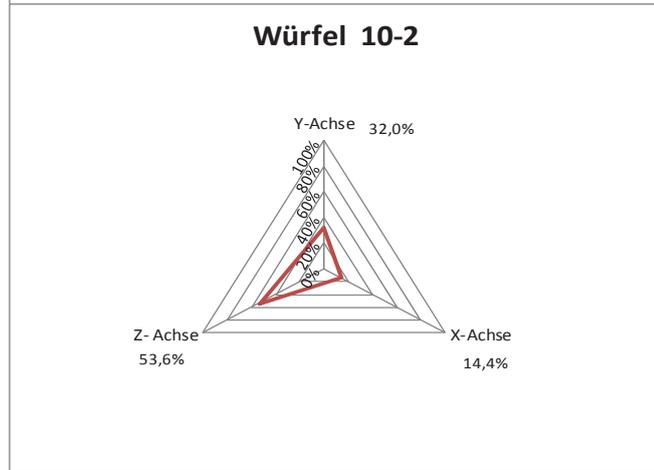
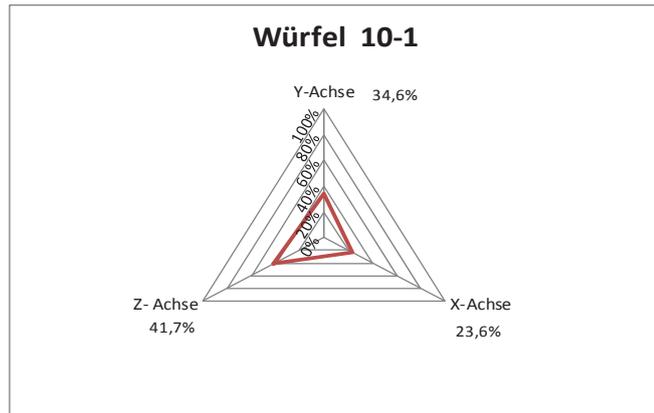
Würfel	10-4
Gemessene Menge	17,5 kg/m ³
berechnete Menge	44,4 kg/m ³
Y-Achse	35,2%
X-Achse	22,5%
Z- Achse	42,3%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 50,0 kg/m³



Rezeptur 1

Fließmaß 58 cm



Messprotokoll 16 Faserorientierung im Balken 10



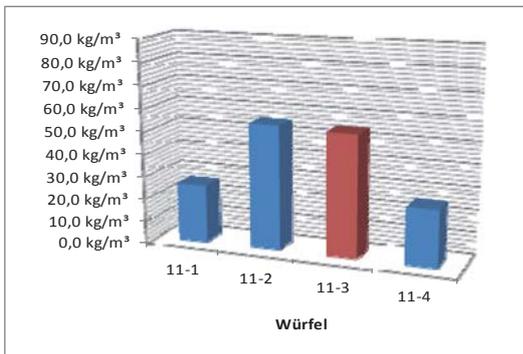
Würfel	11-1
Gemessene Menge	12,3 kg/m ³
berechnete Menge	25,6 kg/m ³
Y-Achse	35,3%
X-Achse	20,5%
Z-Achse	44,2%

Würfel	11-2	Bruchzone leicht
Gemessene Menge	26,4 kg/m ³	
berechnete Menge	55,0 kg/m ³	
Y-Achse	31,1%	
X-Achse	14,8%	
Z-Achse	54,2%	

Würfel	11-3	Bruchzone
Gemessene Menge	25,9 kg/m ³	
berechnete Menge	54,0 kg/m ³	
Y-Achse	31,3%	
X-Achse	15,8%	
Z-Achse	52,9%	

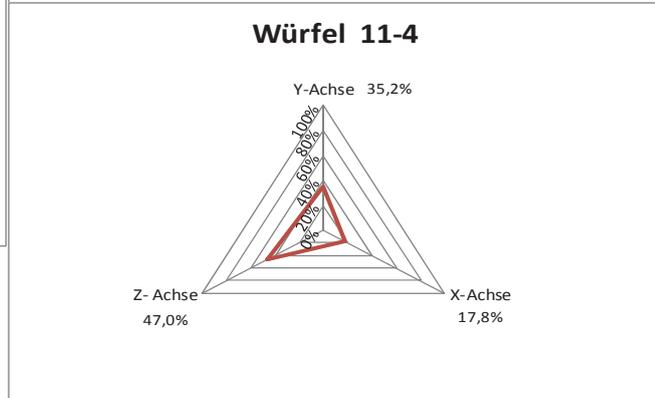
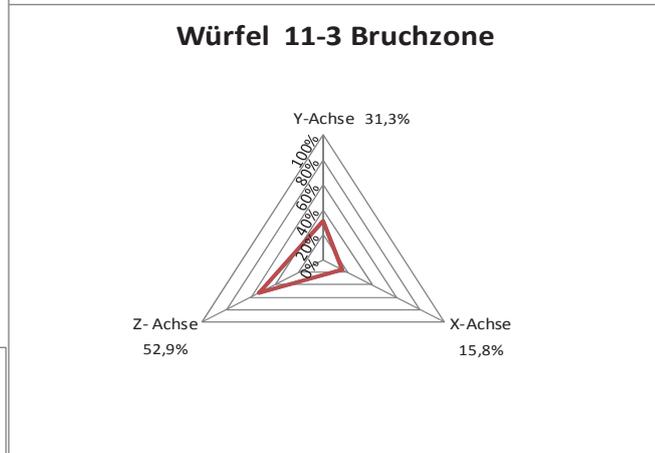
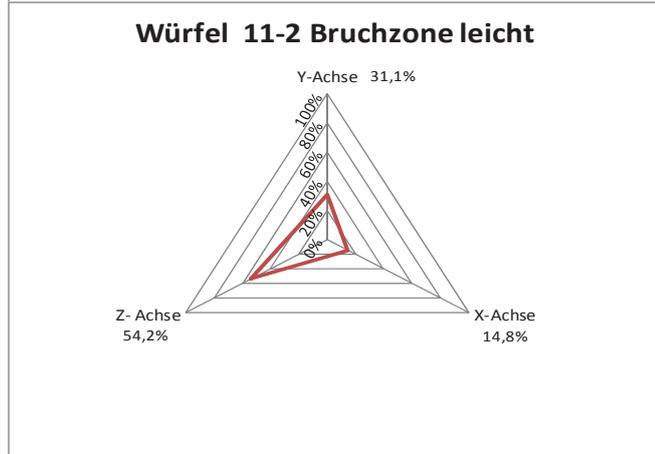
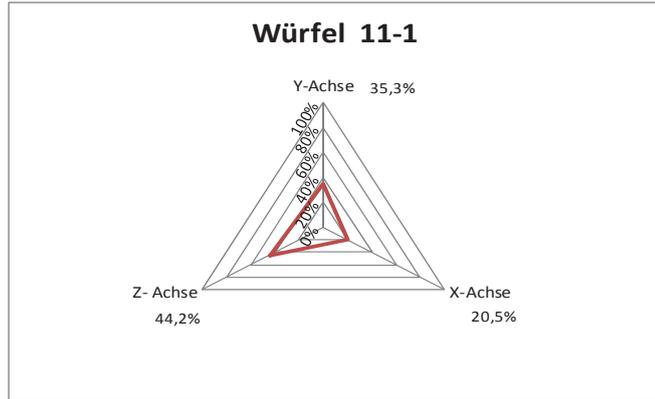
Würfel	11-4
Gemessene Menge	12,0 kg/m ³
berechnete Menge	25,0 kg/m ³
Y-Achse	35,2%
X-Achse	17,8%
Z-Achse	47,0%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 39,9 kg/m³



Rezeptur 1

Fließmaß 67 cm



Messprotokoll 17 Faserorientierung im Balken 11



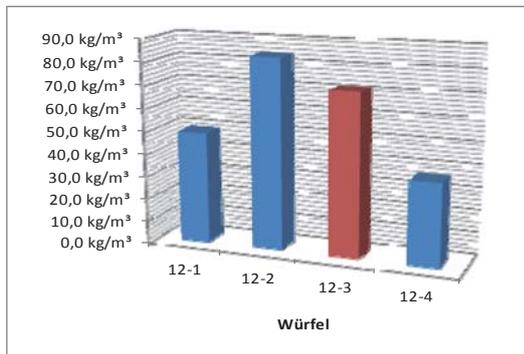
Würfel	12-1
Gemessene Menge	23,6 kg/m ³
berechnete Menge	49,2 kg/m ³
Y-Achse	36,8%
X-Achse	20,7%
Z-Achse	42,4%

Würfel	12-2	Bruchzone leicht
Gemessene Menge	40,1 kg/m ³	
berechnete Menge	83,6 kg/m ³	
Y-Achse	34,3%	
X-Achse	10,5%	
Z-Achse	55,2%	

Würfel	12-3	Bruchzone
Gemessene Menge	34,2 kg/m ³	
berechnete Menge	71,3 kg/m ³	
Y-Achse	37,2%	
X-Achse	11,4%	
Z-Achse	51,3%	

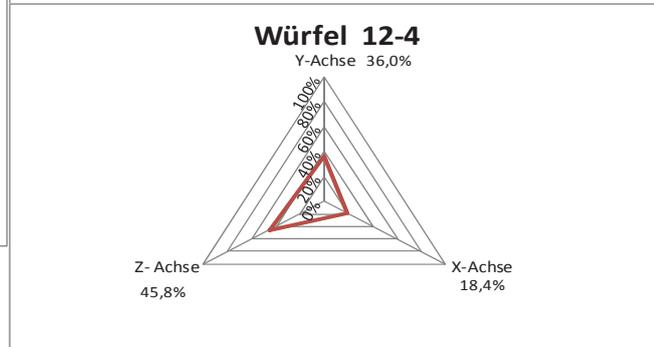
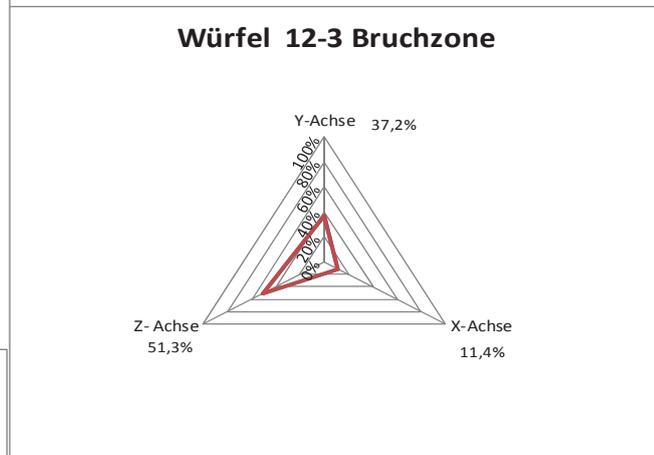
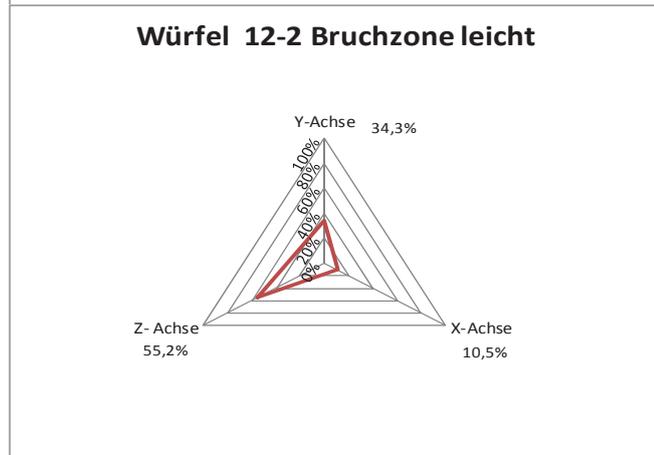
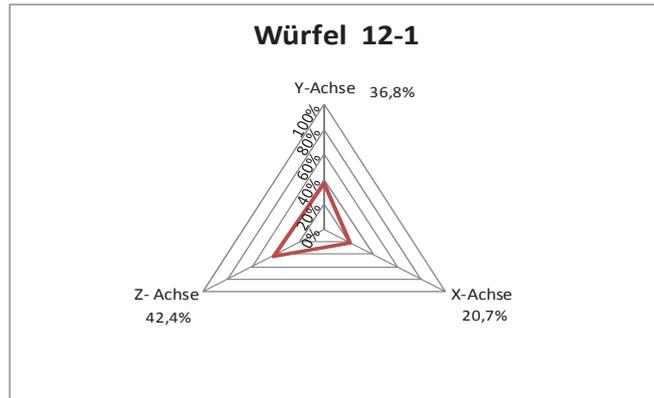
Würfel	12-4
Gemessene Menge	17,4 kg/m ³
berechnete Menge	36,3 kg/m ³
Y-Achse	36,0%
X-Achse	18,4%
Z-Achse	45,8%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 60,1 kg/m³



Rezeptur 1

Fließmaß 67 cm



Messprotokoll 18 Faserorientierung im Balken 12



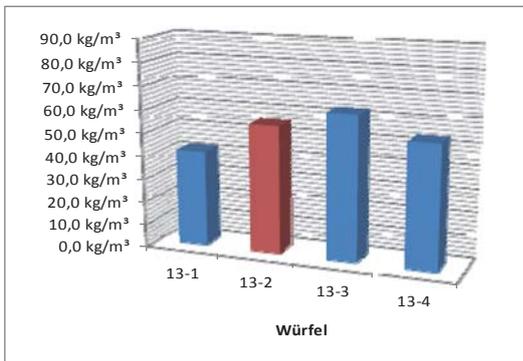
Würfel	13-1
Gemessene Menge	16,3 kg/m ³
berechnete Menge	41,9 kg/m ³
Y-Achse	33,7%
X-Achse	22,6%
Z-Achse	43,7%

Würfel	13-2	Bruchzone
Gemessene Menge	21,5 kg/m ³	
berechnete Menge	55,3 kg/m ³	
Y-Achse	30,4%	
X-Achse	14,2%	
Z-Achse	55,4%	

Würfel	13-3
Gemessene Menge	24,4 kg/m ³
berechnete Menge	62,8 kg/m ³
Y-Achse	31,5%
X-Achse	17,8%
Z-Achse	50,8%

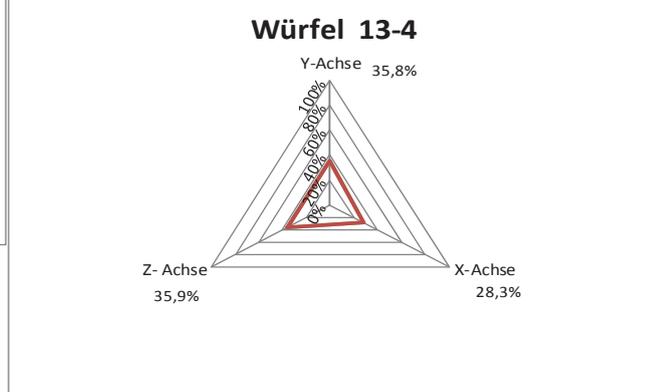
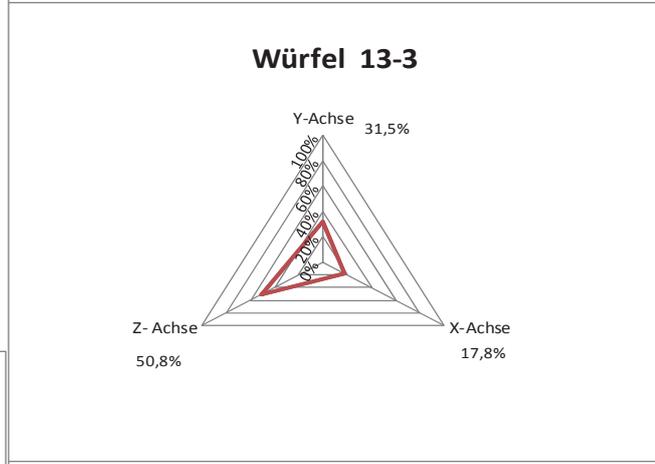
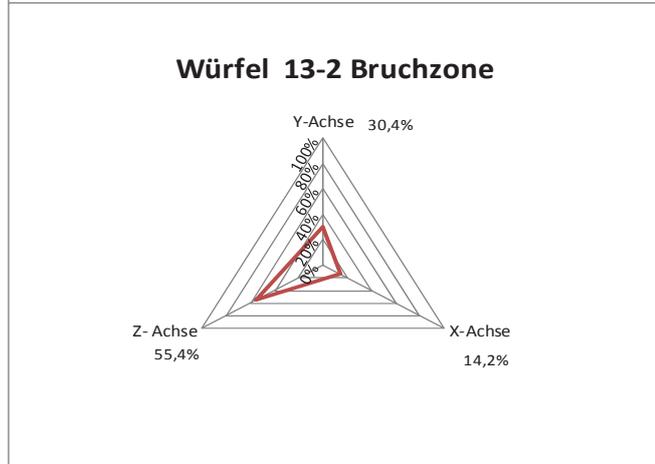
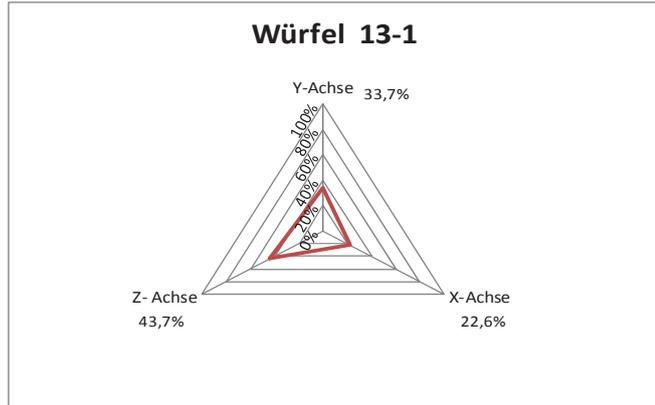
Würfel	13-4
Gemessene Menge	20,8 kg/m ³
berechnete Menge	53,5 kg/m ³
Y-Achse	35,8%
X-Achse	28,3%
Z-Achse	35,9%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 53,4 kg/m³



Rezeptur 1

Fließmaß 64 cm



Messprotokoll 19 Faserorientierung im Balken 13



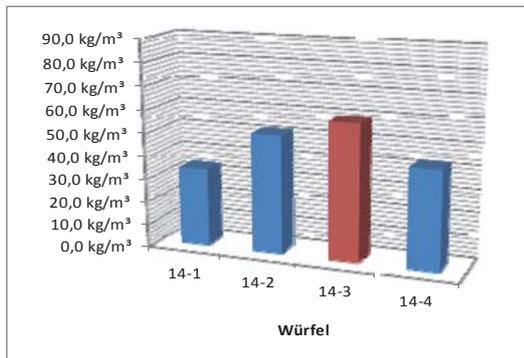
Würfel 14-1	
Gemessene Menge	13,1 kg/m ³
berechnete Menge	33,7 kg/m ³
Y-Achse	31,3%
X-Achse	22,4%
Z-Achse	46,3%

Würfel 14-2	
Gemessene Menge	20,0 kg/m ³
berechnete Menge	51,4 kg/m ³
Y-Achse	29,4%
X-Achse	14,3%
Z-Achse	56,3%

Würfel 14-3 Bruchzone	
Gemessene Menge	22,9 kg/m ³
berechnete Menge	58,9 kg/m ³
Y-Achse	33,3%
X-Achse	14,1%
Z-Achse	52,7%

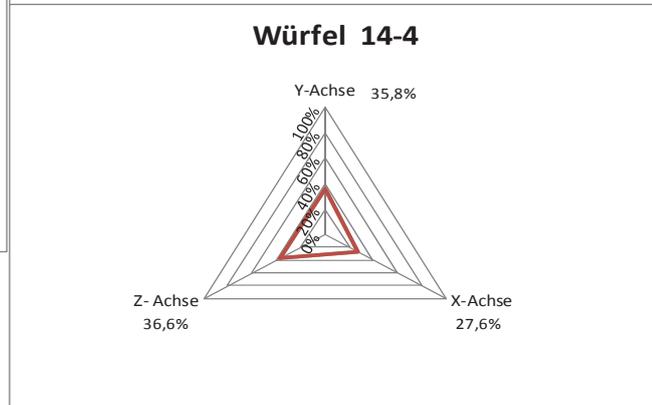
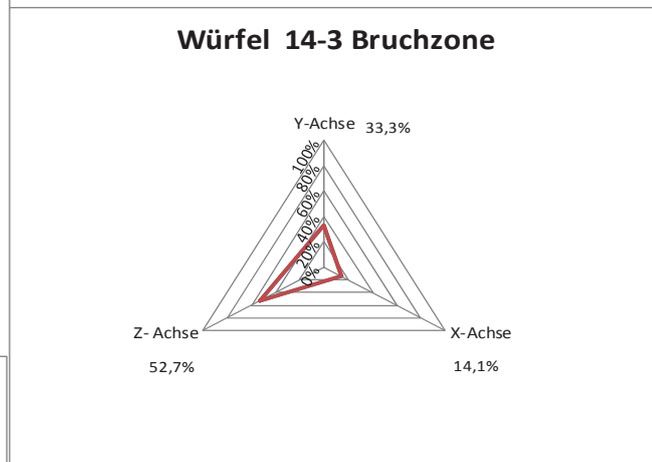
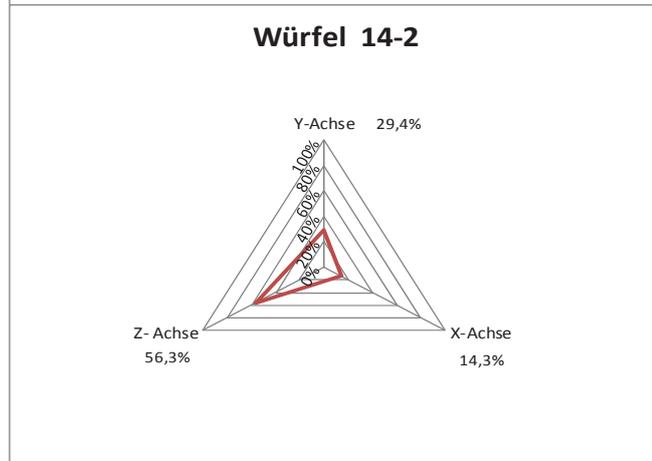
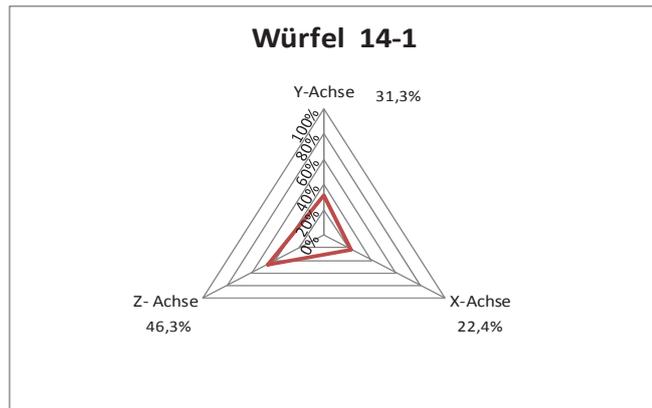
Würfel 14-4	
Gemessene Menge	16,5 kg/m ³
berechnete Menge	42,4 kg/m ³
Y-Achse	35,8%
X-Achse	27,6%
Z-Achse	36,6%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 46,6 kg/m³



Rezeptur 1

Fließmaß 64 cm



Messprotokoll 20 Faserorientierung im Balken 14



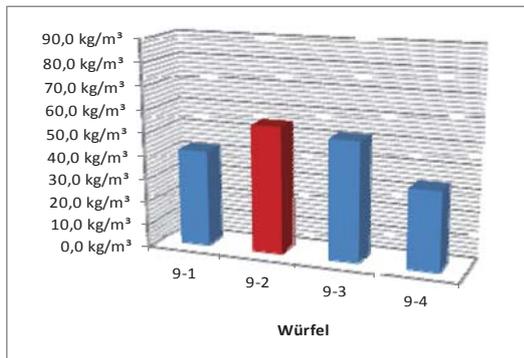
Würfel	9-1
Gemessene Menge	33,5 kg/m ³
berechnete Menge	42,1 kg/m ³
Y-Achse	28,9%
X-Achse	22,5%
Z-Achse	48,6%

Würfel	9-2	Bruchzone
Gemessene Menge	43,7 kg/m ³	
berechnete Menge	54,9 kg/m ³	
Y-Achse	29,8%	
X-Achse	15,9%	
Z-Achse	54,3%	

Würfel	9-3
Gemessene Menge	41,2 kg/m ³
berechnete Menge	51,8 kg/m ³
Y-Achse	29,4%
X-Achse	12,5%
Z-Achse	58,0%

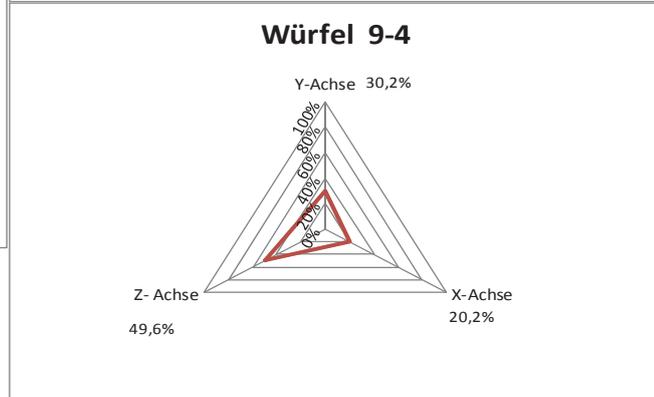
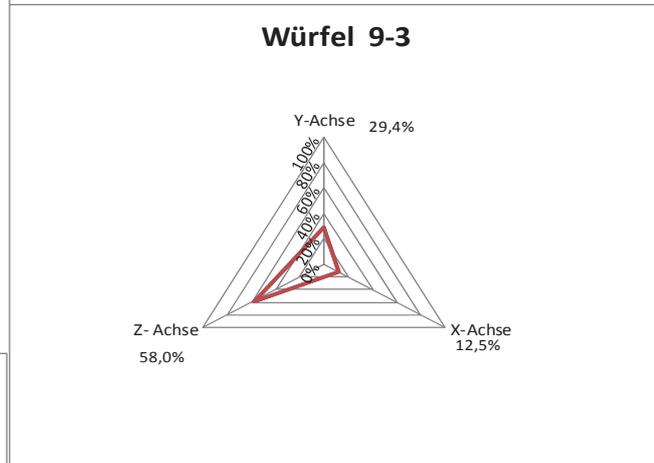
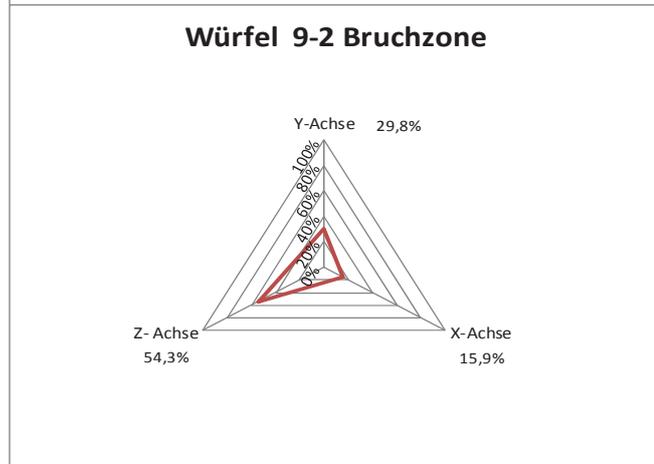
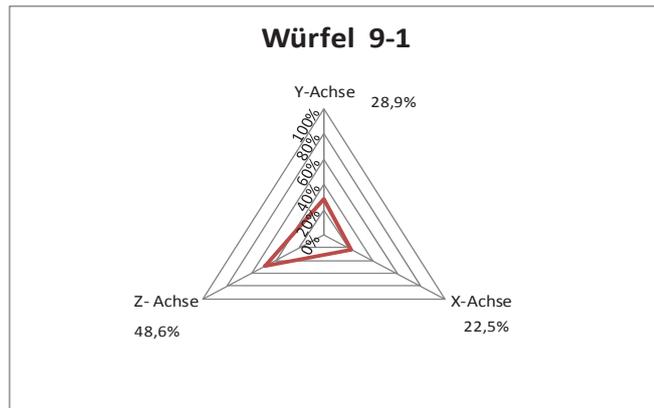
Würfel	9-4
Gemessene Menge	27,1 kg/m ³
berechnete Menge	34,0 kg/m ³
Y-Achse	30,2%
X-Achse	20,2%
Z-Achse	49,6%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 45,7 kg/m³



Rezeptur 2

Fließmaß 68 cm



Messprotokoll 21 Faserorientierung im Balken II-9



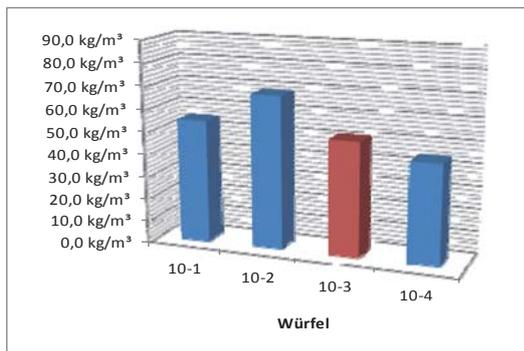
Würfel	10-1
Gemessene Menge	43,5 kg/m ³
berechnete Menge	54,6 kg/m ³
Y-Achse	34,7%
X-Achse	21,2%
Z-Achse	44,1%

Würfel	10-2
Gemessene Menge	53,9 kg/m ³
berechnete Menge	67,7 kg/m ³
Y-Achse	31,9%
X-Achse	14,2%
Z-Achse	53,9%

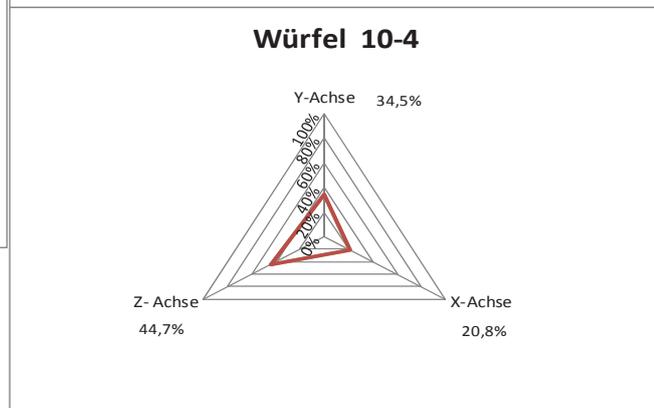
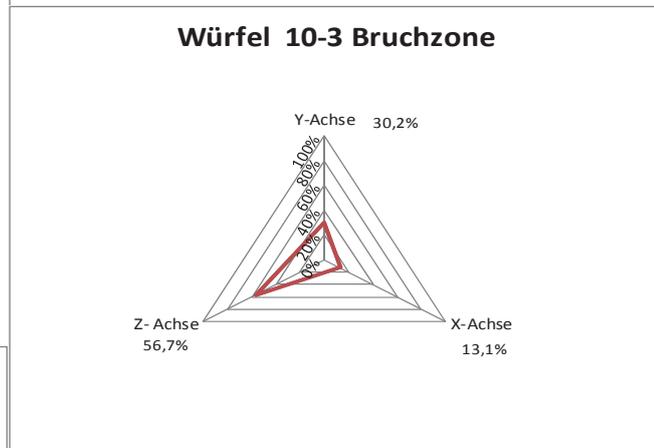
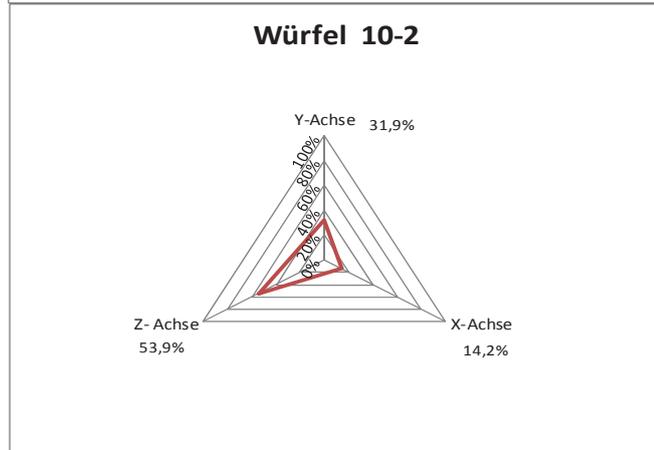
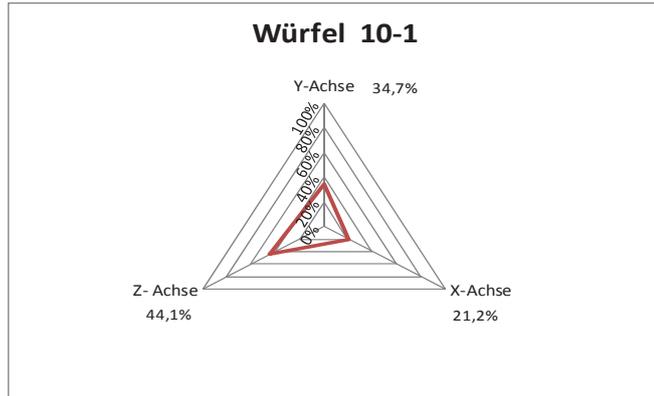
Würfel	10-3	Bruchzone
Gemessene Menge	40,4 kg/m ³	
berechnete Menge	50,8 kg/m ³	
Y-Achse	30,2%	
X-Achse	13,1%	
Z-Achse	56,7%	

Würfel	10-4
Gemessene Menge	35,1 kg/m ³
berechnete Menge	44,1 kg/m ³
Y-Achse	34,5%
X-Achse	20,8%
Z-Achse	44,7%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 54,3 kg/m³



Rezeptur 2
Fließmaß 68 cm



Messprotokoll 22 Faserorientierung im Balken II-10



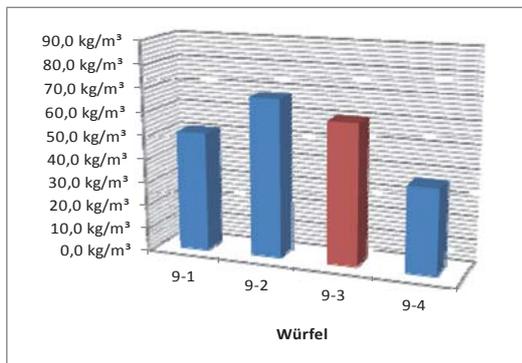
Würfel	9-1
Gemessene Menge	45,6 kg/m ³
berechnete Menge	51,1 kg/m ³
Y-Achse	30,7%
X-Achse	20,7%
Z-Achse	48,6%

Würfel	9-2	Nebenbruch
Gemessene Menge	60,2 kg/m ³	
berechnete Menge	67,5 kg/m ³	
Y-Achse	27,5%	
X-Achse	12,5%	
Z-Achse	60,0%	

Würfel	9-3	Bruchzone
Gemessene Menge	53,7 kg/m ³	
berechnete Menge	60,2 kg/m ³	
Y-Achse	28,2%	
X-Achse	10,9%	
Z-Achse	60,3%	

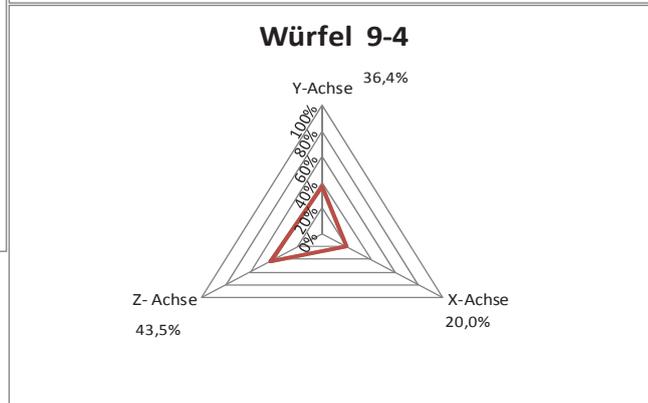
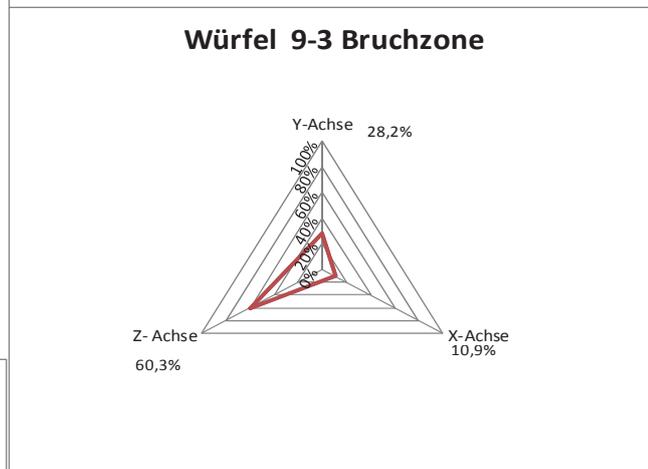
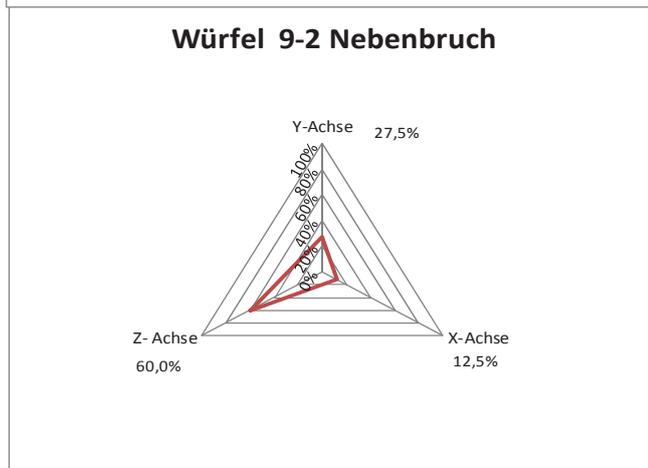
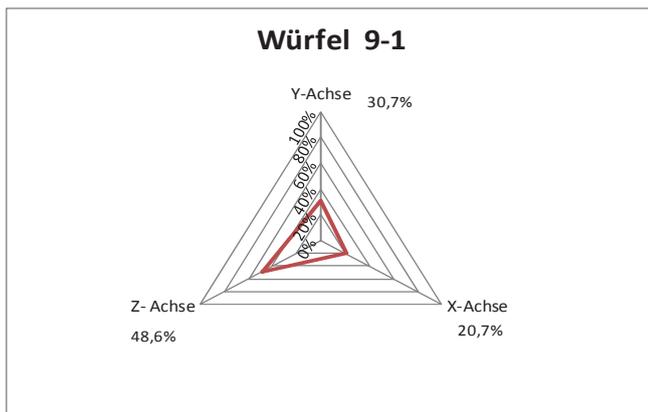
Würfel	9-4
Gemessene Menge	32,8 kg/m ³
berechnete Menge	36,8 kg/m ³
Y-Achse	36,4%
X-Achse	20,0%
Z-Achse	43,5%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 53,9 kg/m³



Rezeptur 3

Fließmaß 68 cm



Messprotokoll 23 Faserorientierung Im Balken III-9



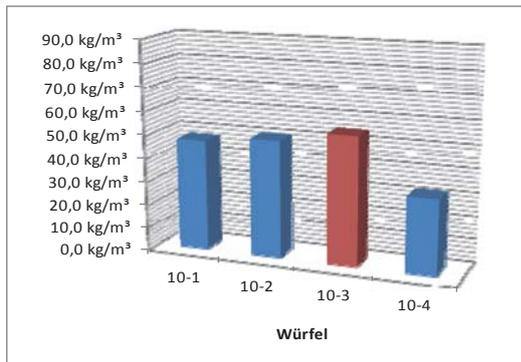
Würfel 10-1	
Gemessene Menge	42,4 kg/m ³
berechnete Menge	47,5 kg/m ³
Y-Achse	34,3%
X-Achse	24,6%
Z-Achse	41,1%

Würfel 10-2	
Gemessene Menge	44,7 kg/m ³
berechnete Menge	50,1 kg/m ³
Y-Achse	31,3%
X-Achse	17,4%
Z-Achse	50,1%

Würfel 10-3		Bruchzone
Gemessene Menge	48,8 kg/m ³	
berechnete Menge	54,7 kg/m ³	
Y-Achse	28,2%	
X-Achse	15,8%	
Z-Achse	56,0%	

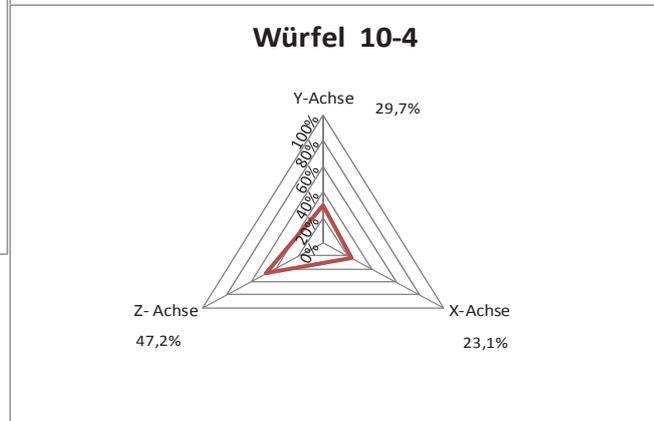
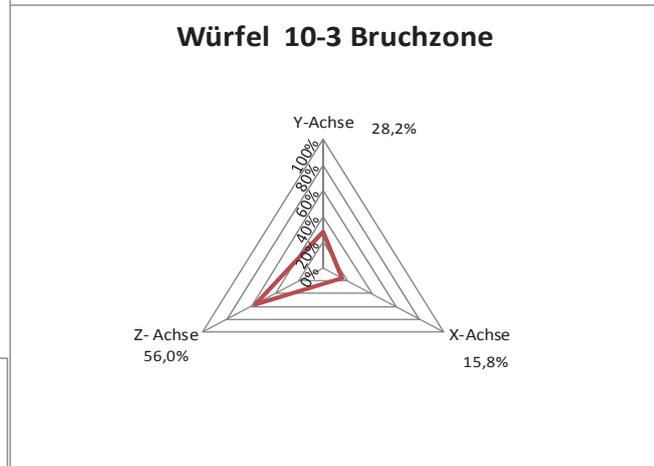
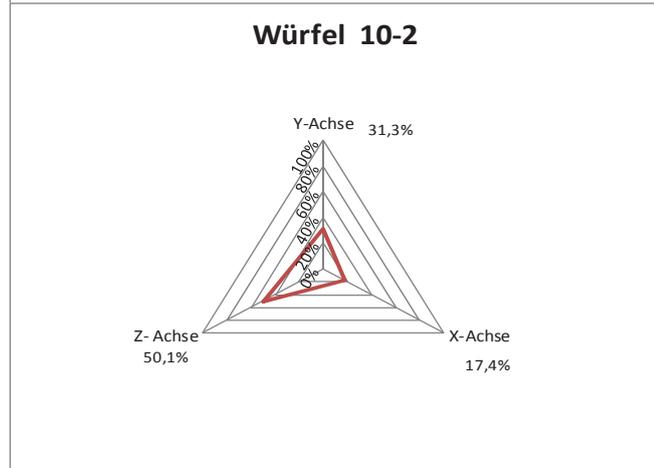
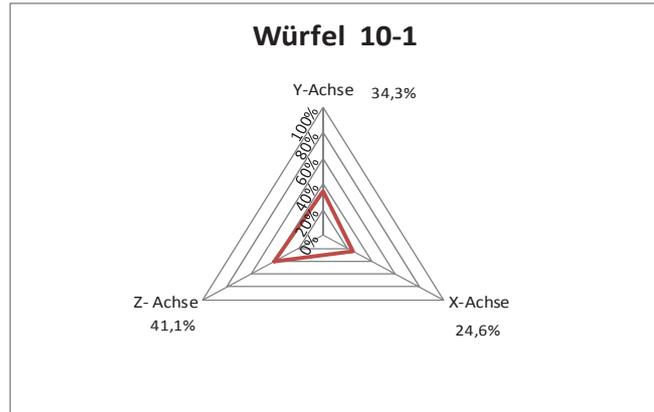
Würfel 10-4	
Gemessene Menge	28,6 kg/m ³
berechnete Menge	32,1 kg/m ³
Y-Achse	29,7%
X-Achse	23,1%
Z-Achse	47,2%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 46,1 kg/m³



Rezeptur 3

Fließmaß 68 cm



Messprotokoll 24 Faserorientierung im Balken III-10



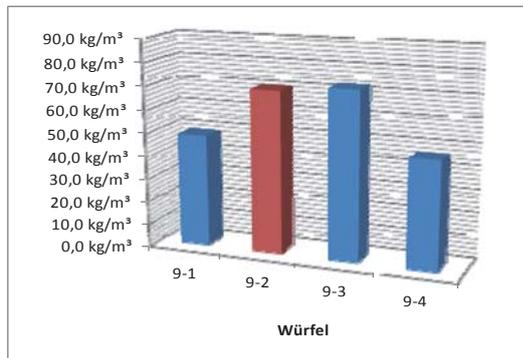
Würfel	9-1
Gemessene Menge	45,7 kg/m ³
berechnete Menge	48,7 kg/m ³
Y-Achse	36,2%
X-Achse	24,6%
Z-Achse	39,2%

Würfel	9-2	Bruchzone
Gemessene Menge	65,7 kg/m ³	
berechnete Menge	70,0 kg/m ³	
Y-Achse	32,6%	
X-Achse	13,9%	
Z-Achse	53,5%	

Würfel	9-3
Gemessene Menge	68,1 kg/m ³
berechnete Menge	72,5 kg/m ³
Y-Achse	31,5%
X-Achse	14,3%
Z-Achse	54,2%

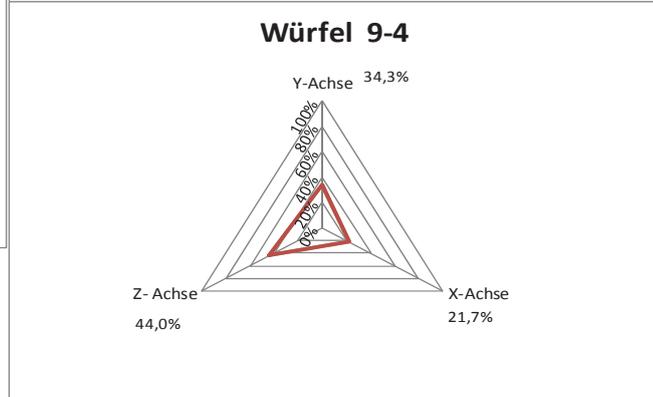
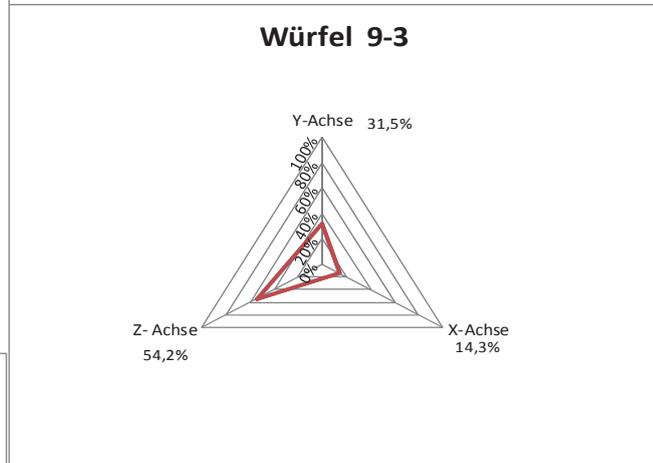
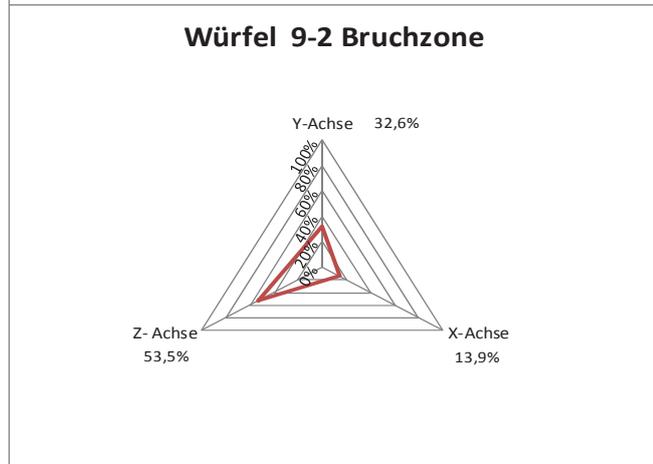
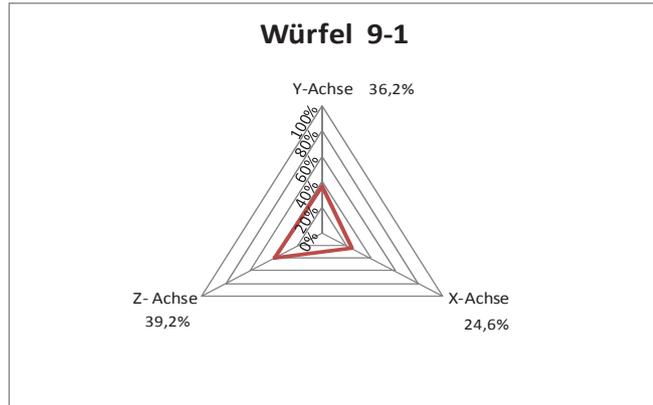
Würfel	9-4
Gemessene Menge	43,6 kg/m ³
berechnete Menge	46,4 kg/m ³
Y-Achse	34,3%
X-Achse	21,7%
Z-Achse	44,0%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 59,4 kg/m³



Rezeptur 4

Fließmaß 70 cm



Messprotokoll 25 Faserorientierung im Balken IV-9



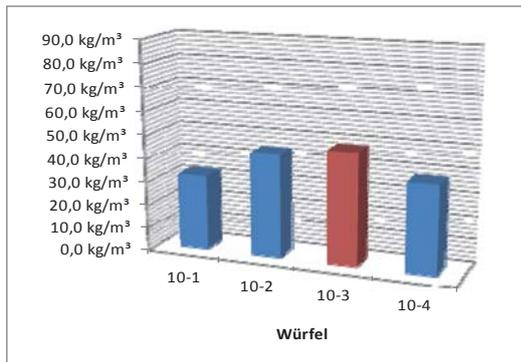
Würfel	10-1
Gemessene Menge	30,3 kg/m ³
berechnete Menge	32,3 kg/m ³
Y-Achse	40,1%
X-Achse	21,3%
Z- Achse	38,6%

Würfel	10-2
Gemessene Menge	41,5 kg/m ³
berechnete Menge	44,2 kg/m ³
Y-Achse	32,0%
X-Achse	19,6%
Z- Achse	48,4%

Würfel	10-3	Bruchzone
Gemessene Menge	45,0 kg/m ³	
berechnete Menge	47,9 kg/m ³	
Y-Achse	30,3%	
X-Achse	17,2%	
Z- Achse	52,5%	

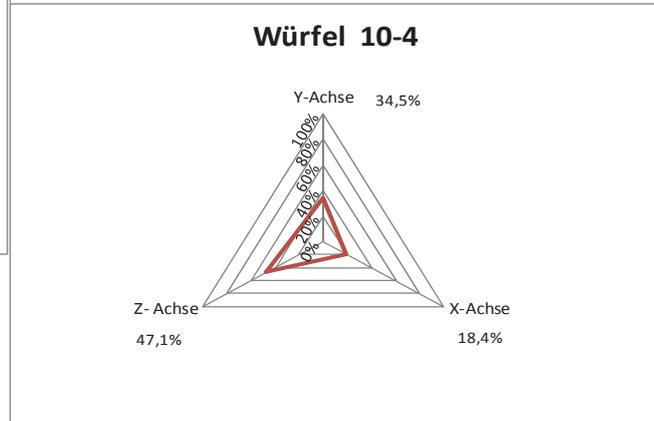
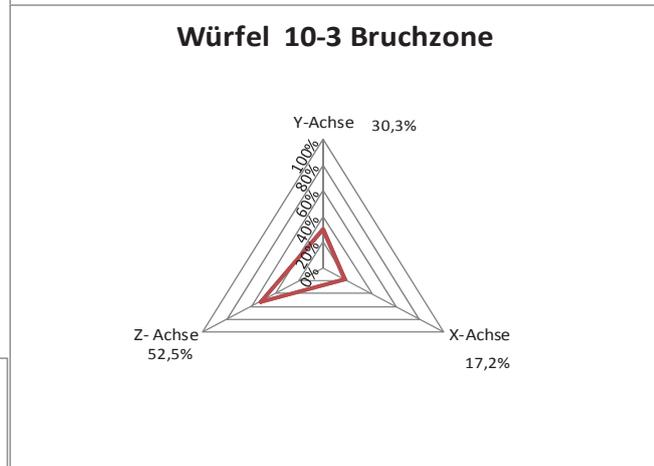
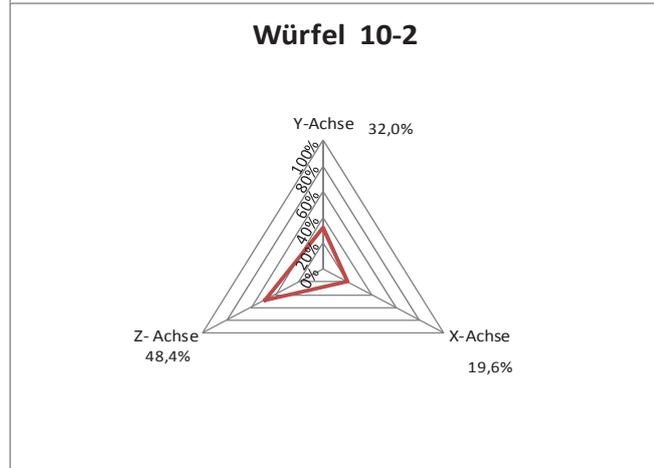
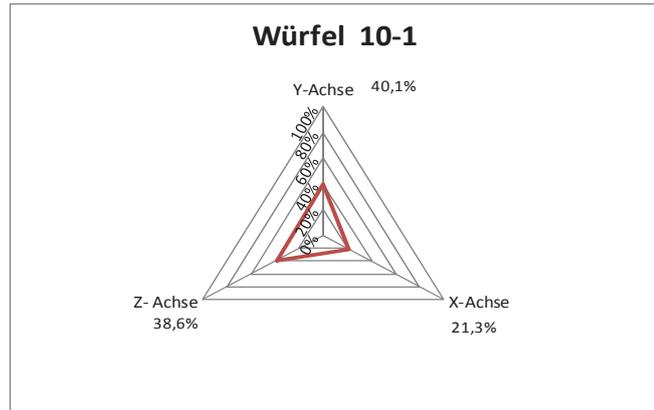
Würfel	10-4
Gemessene Menge	35,6 kg/m ³
berechnete Menge	37,9 kg/m ³
Y-Achse	34,5%
X-Achse	18,4%
Z- Achse	47,1%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 40,6 kg/m³



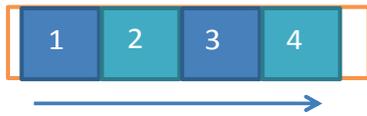
Rezeptur 4

Fließmaß 70 cm



Messprotokoll 26 Faserorientierung im Balken IV-10

Mit Rampe



Fließrichtung
[z - Achse]

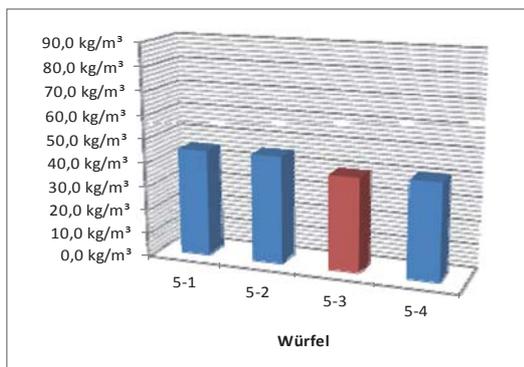
Würfel	5-1
Gemessene Menge	22,0 kg/m ³
berechnete Menge	44,6 kg/m ³
Y-Achse	30,3%
X-Achse	24,3%
Z- Achse	45,4%

Würfel	5-2
Gemessene Menge	22,2 kg/m ³
berechnete Menge	45,0 kg/m ³
Y-Achse	31,1%
X-Achse	36,6%
Z- Achse	32,3%

Würfel	5-3	Bruchzone
Gemessene Menge	19,4 kg/m ³	
berechnete Menge	39,4 kg/m ³	
Y-Achse	26,9%	
X-Achse	36,5%	
Z- Achse	36,5%	

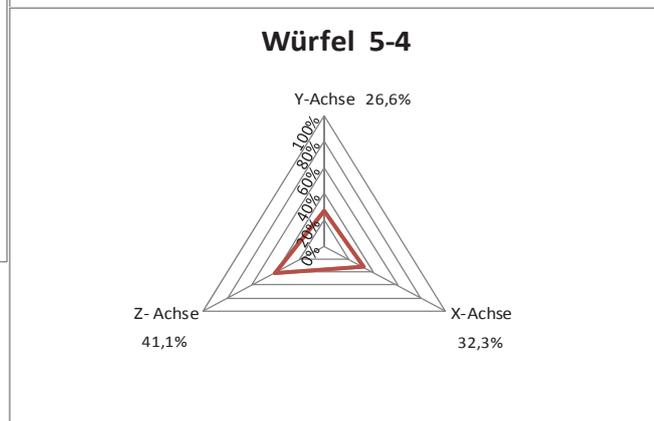
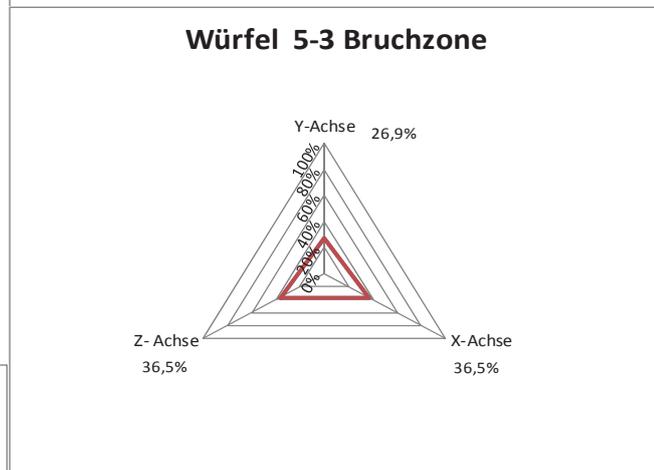
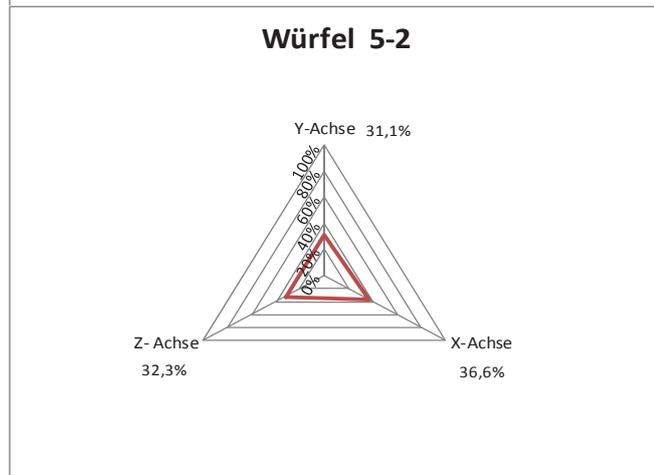
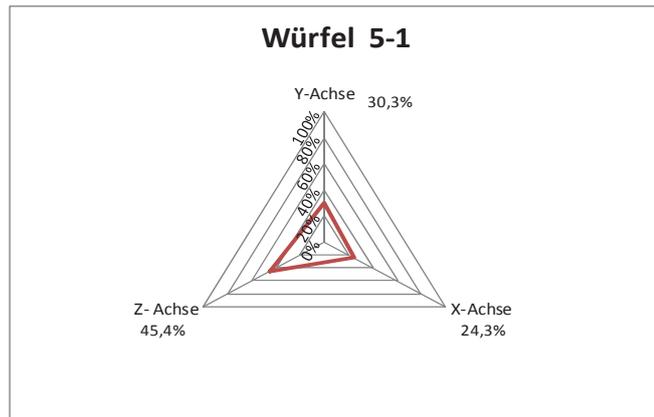
Würfel	5-4
Gemessene Menge	20,0 kg/m ³
berechnete Menge	40,6 kg/m ³
Y-Achse	26,6%
X-Achse	32,3%
Z- Achse	41,1%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 42,4 kg/m³



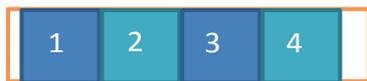
Rezeptur 1

Fließmaß 62 cm



Messprotokoll 27 Faserorientierung im Balken 5

Mit Rampe



Fließrichtung
[z - Achse]

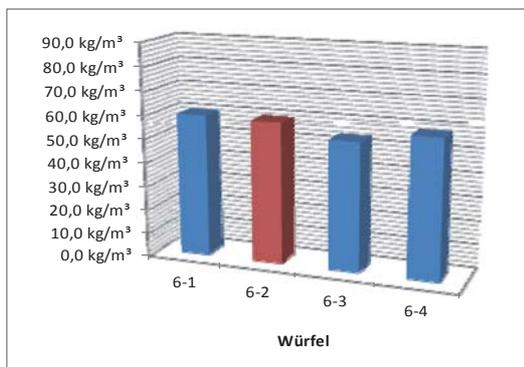
Würfel 6-1	
Gemessene Menge	29,5 kg/m ³
berechnete Menge	59,8 kg/m ³
Y-Achse	23,3%
X-Achse	18,0%
Z- Achse	58,7%

Würfel	6-2	Bruchzone
Gemessene Menge	29,2 kg/m ³	
berechnete Menge	59,2 kg/m ³	
Y-Achse	27,4%	
X-Achse	20,6%	
Z- Achse	52,1%	

Würfel 6-3	
Gemessene Menge	26,4 kg/m ³
berechnete Menge	53,5 kg/m ³
Y-Achse	28,4%
X-Achse	34,6%
Z- Achse	37,0%

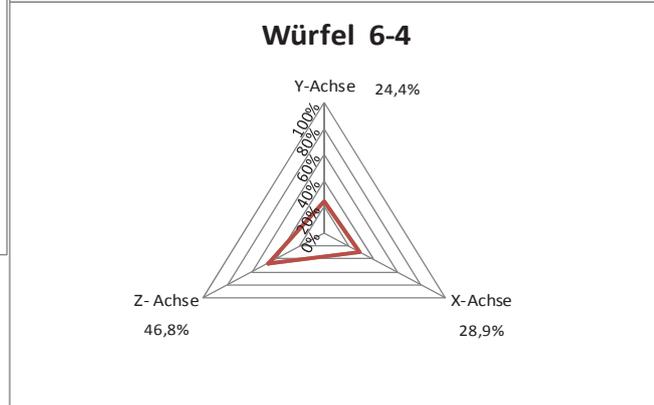
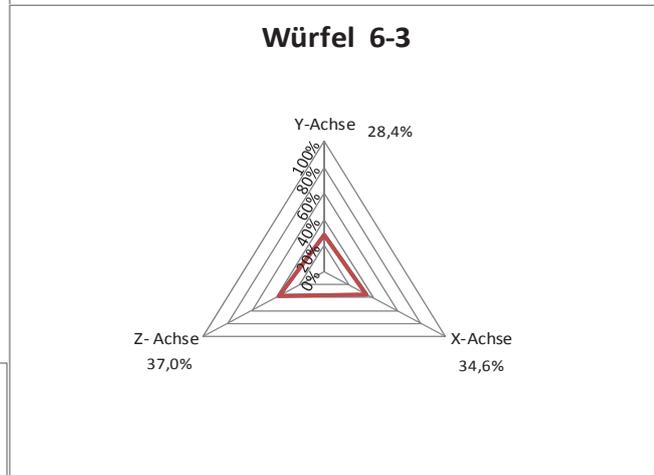
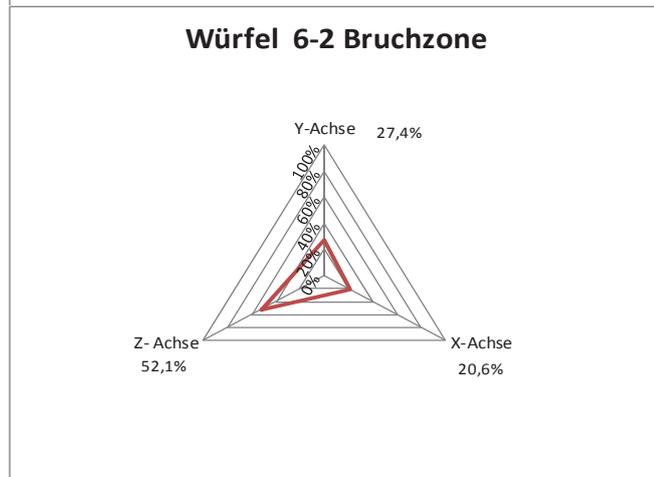
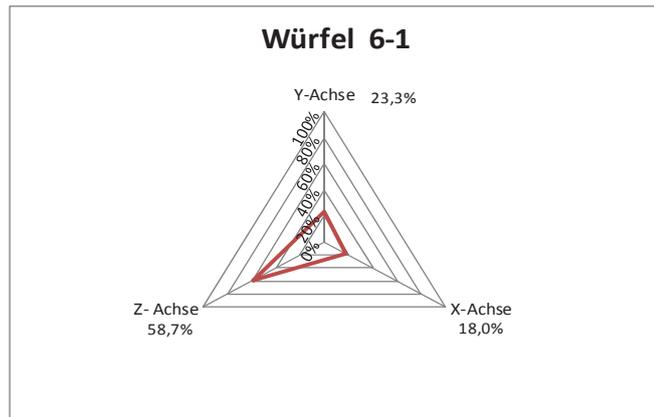
Würfel 6-4	
Gemessene Menge	28,5 kg/m ³
berechnete Menge	57,8 kg/m ³
Y-Achse	24,4%
X-Achse	28,9%
Z- Achse	46,8%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 57,6 kg/m³



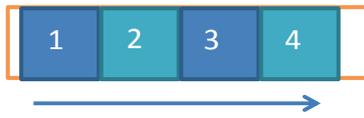
Rezeptur 1

Fließmaß 62 cm



Messprotokoll 28 Faserorientierung im Balken 6

Mit Rampe



Fließrichtung
[z - Achse]

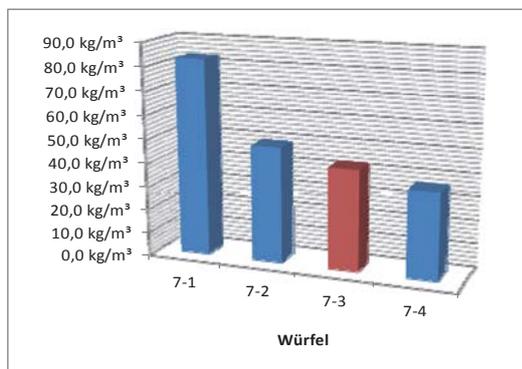
Würfel 7-1	
Gemessene Menge	31,6 kg/m ³
berechnete Menge	82,9 kg/m ³
Y-Achse	28,5%
X-Achse	22,4%
Z- Achse	49,1%

Würfel 7-2	
Gemessene Menge	18,7 kg/m ³
berechnete Menge	49,1 kg/m ³
Y-Achse	27,5%
X-Achse	38,0%
Z- Achse	34,5%

Würfel 7-3 Bruchzone	
Gemessene Menge	16,3 kg/m ³
berechnete Menge	42,8 kg/m ³
Y-Achse	26,5%
X-Achse	35,4%
Z- Achse	38,0%

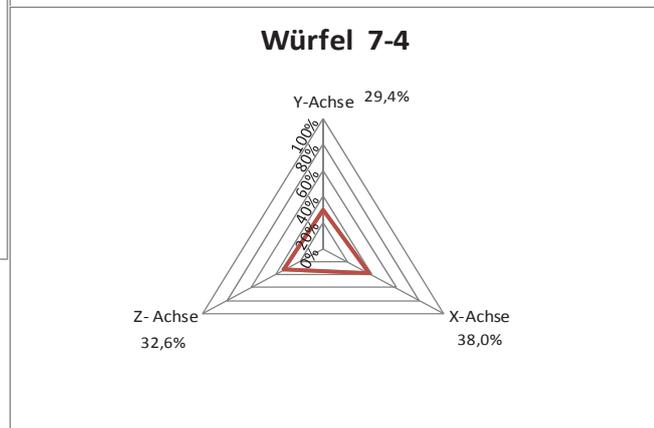
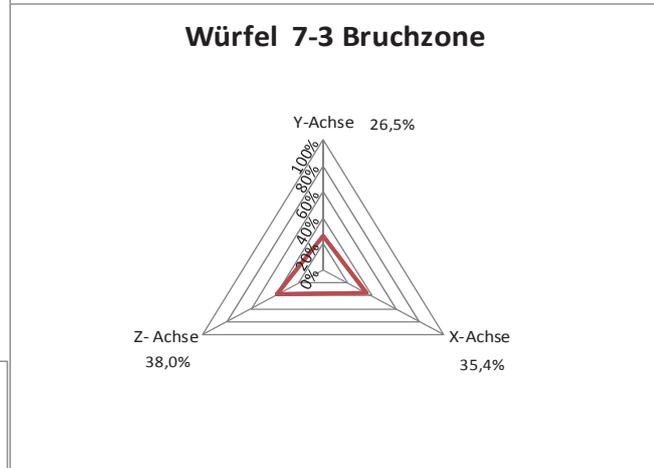
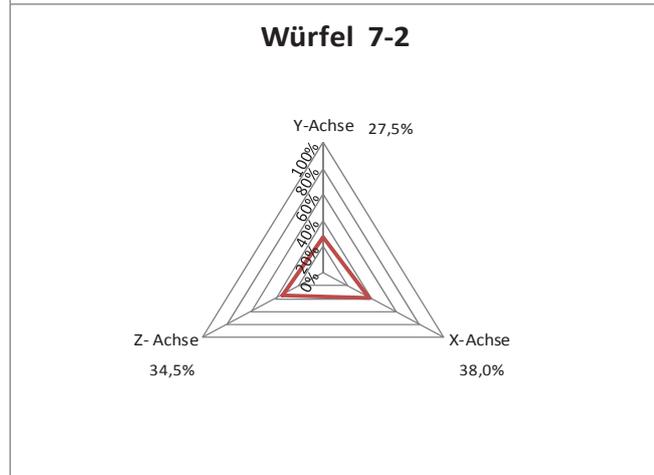
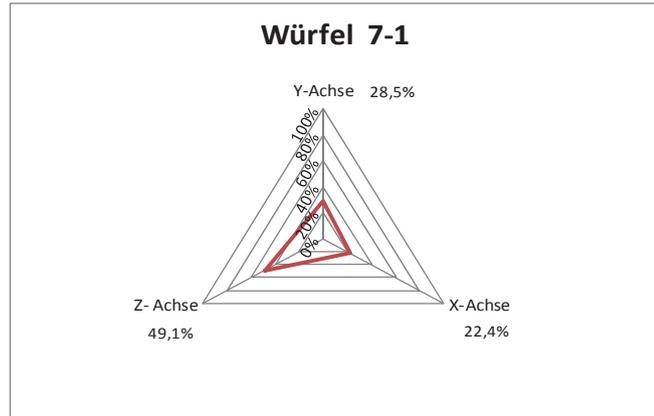
Würfel 7-4	
Gemessene Menge	14,0 kg/m ³
berechnete Menge	36,7 kg/m ³
Y-Achse	29,4%
X-Achse	38,0%
Z- Achse	32,6%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 52,9 kg/m³



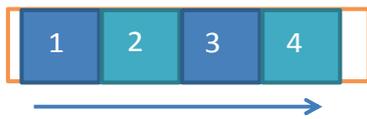
Rezeptur 1

Fließmaß 62 cm



Messprotokoll 29 Faserorientierung im Balken 7

Mit Rampe



Fließrichtung
[z - Achse]

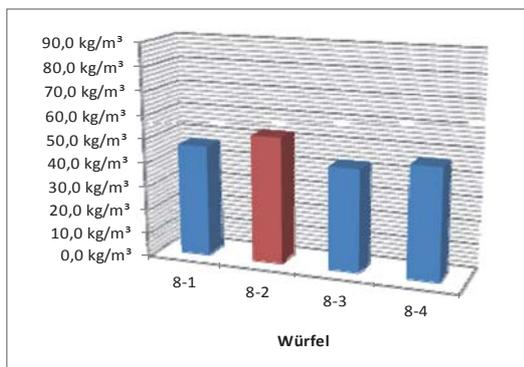
Würfel 8-1	
Gemessene Menge	17,7 kg/m ³
berechnete Menge	46,5 kg/m ³
Y-Achse	34,0%
X-Achse	36,5%
Z- Achse	29,5%

Würfel 8-2 Bruchzone	
Gemessene Menge	20,1 kg/m ³
berechnete Menge	52,8 kg/m ³
Y-Achse	32,1%
X-Achse	36,2%
Z- Achse	31,7%

Würfel 8-3	
Gemessene Menge	16,3 kg/m ³
berechnete Menge	42,8 kg/m ³
Y-Achse	32,5%
X-Achse	35,8%
Z- Achse	31,7%

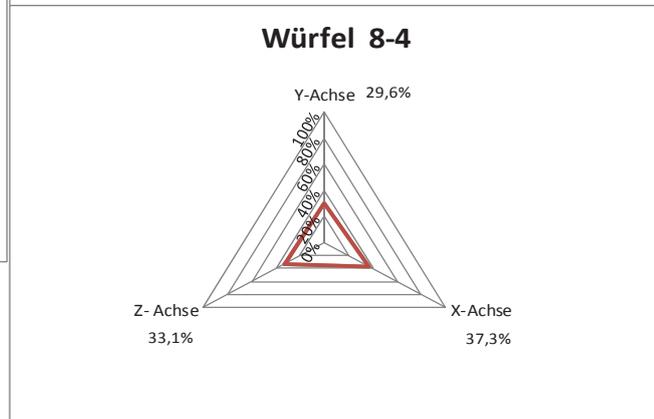
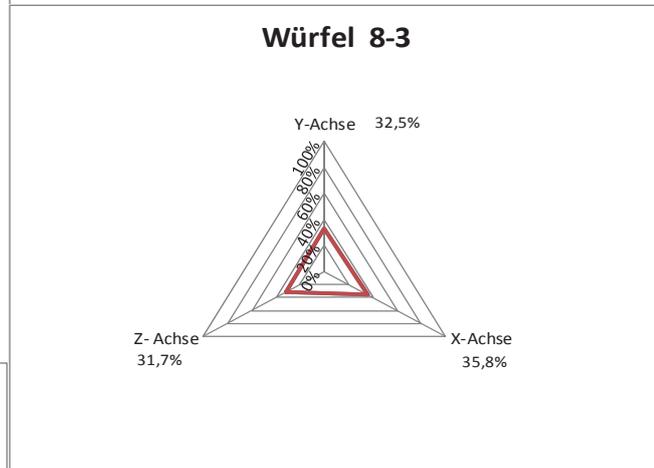
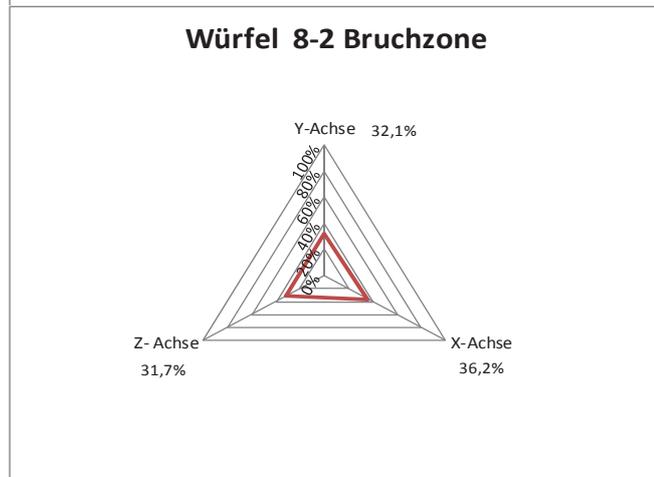
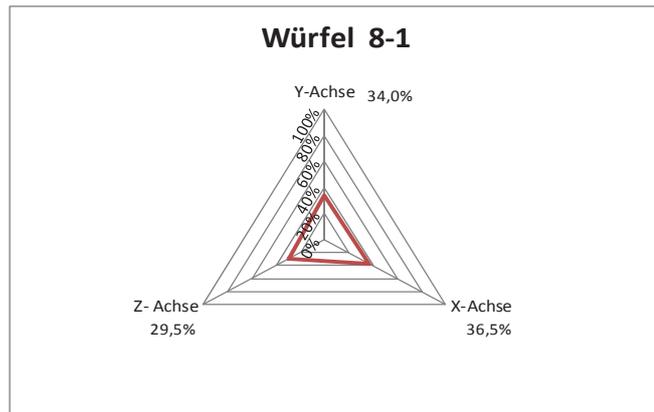
Würfel 8-4	
Gemessene Menge	17,7 kg/m ³
berechnete Menge	46,5 kg/m ³
Y-Achse	29,6%
X-Achse	37,3%
Z- Achse	33,1%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 47,1 kg/m³



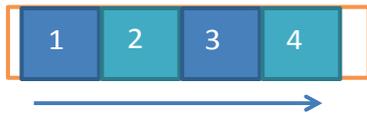
Rezeptur 1

Fließmaß 62 cm



Messprotokoll 30 Faserorientierung im Balken 8

Mit Rampe



Fließrichtung
[z - Achse]

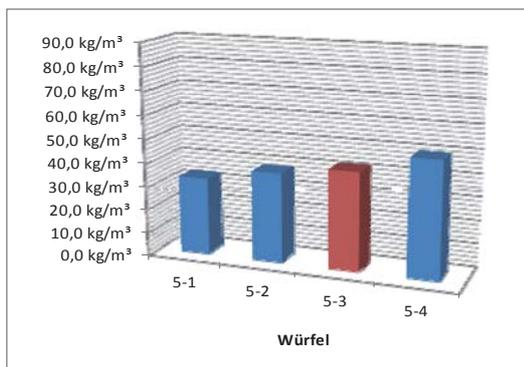
Würfel	5-1
Gemessene Menge	26,8 kg/m ³
berechnete Menge	33,2 kg/m ³
Y-Achse	33,3%
X-Achse	18,1%
Z- Achse	48,6%

Würfel	5-2
Gemessene Menge	30,9 kg/m ³
berechnete Menge	38,3 kg/m ³
Y-Achse	27,7%
X-Achse	21,9%
Z- Achse	50,4%

Würfel	5-3	Bruchzone
Gemessene Menge	33,8 kg/m ³	
berechnete Menge	41,9 kg/m ³	
Y-Achse	26,8%	
X-Achse	31,5%	
Z- Achse	41,7%	

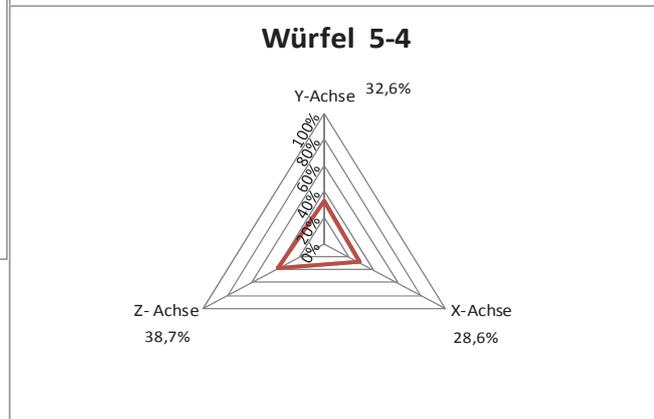
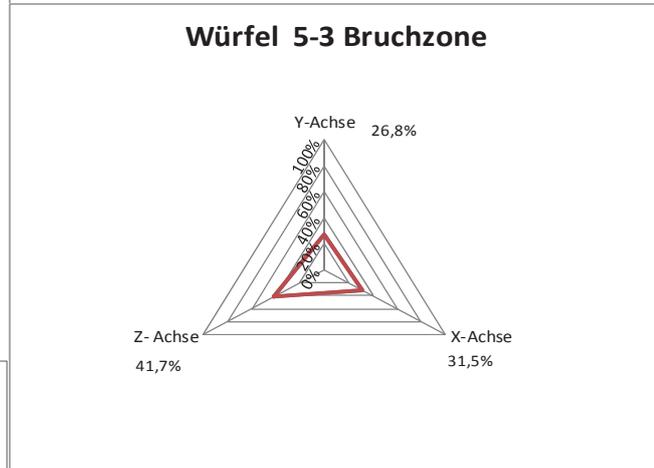
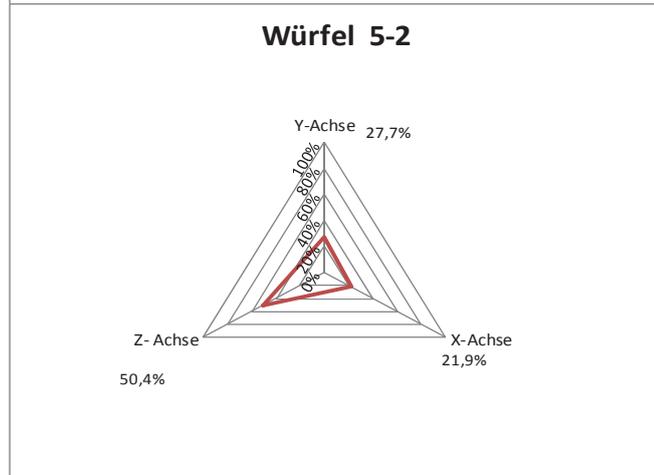
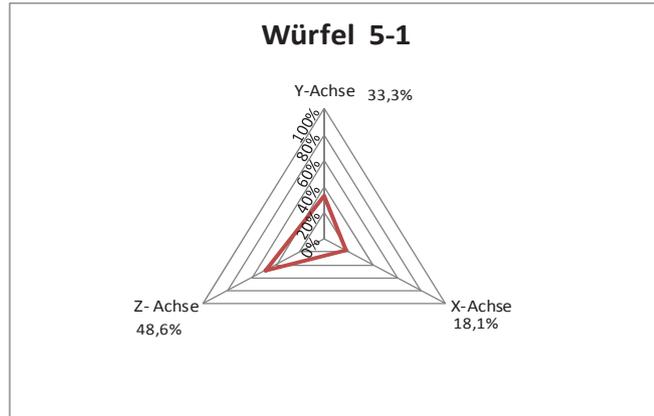
Würfel	5-4
Gemessene Menge	40,0 kg/m ³
berechnete Menge	49,6 kg/m ³
Y-Achse	32,6%
X-Achse	28,6%
Z- Achse	38,7%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 40,8 kg/m³



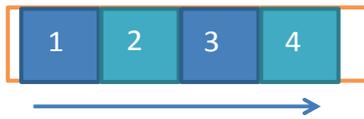
Rezeptur 2

Fließmaß 65 cm



Messprotokoll 31 Faserorientierung im Balken II-5

Mit Rampe



Fließrichtung
[z - Achse]

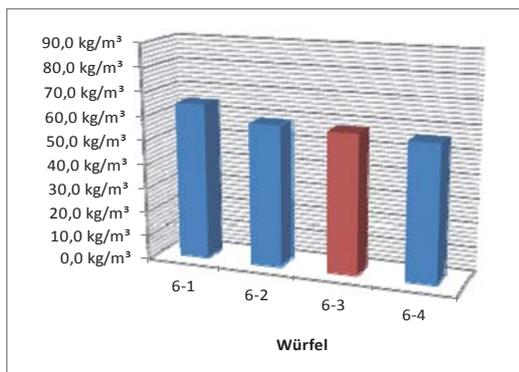
Würfel	6-1
Gemessene Menge	52,1 kg/m ³
berechnete Menge	64,6 kg/m ³
Y-Achse	36,9%
X-Achse	31,4%
Z- Achse	31,7%

Würfel	6-2
Gemessene Menge	47,0 kg/m ³
berechnete Menge	58,3 kg/m ³
Y-Achse	35,2%
X-Achse	43,2%
Z- Achse	21,6%

Würfel	6-3	Bruchzone
Gemessene Menge	46,5 kg/m ³	
berechnete Menge	57,7 kg/m ³	
Y-Achse	40,2%	
X-Achse	40,2%	
Z- Achse	19,6%	

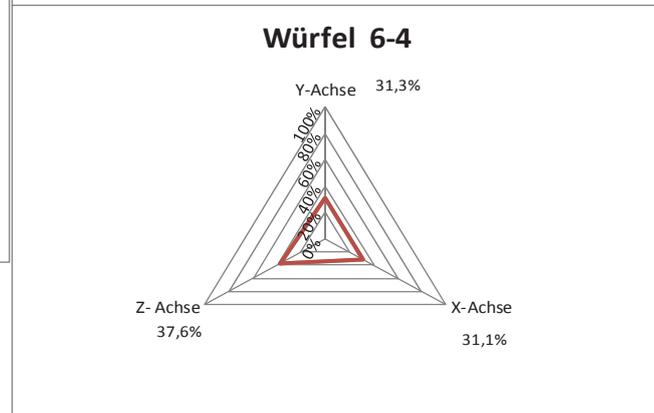
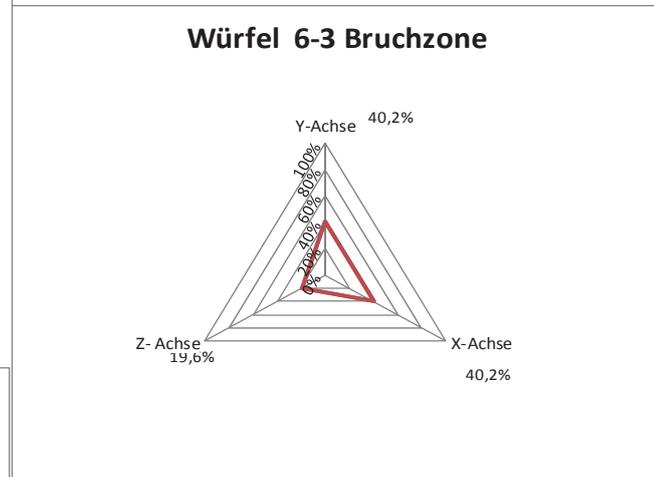
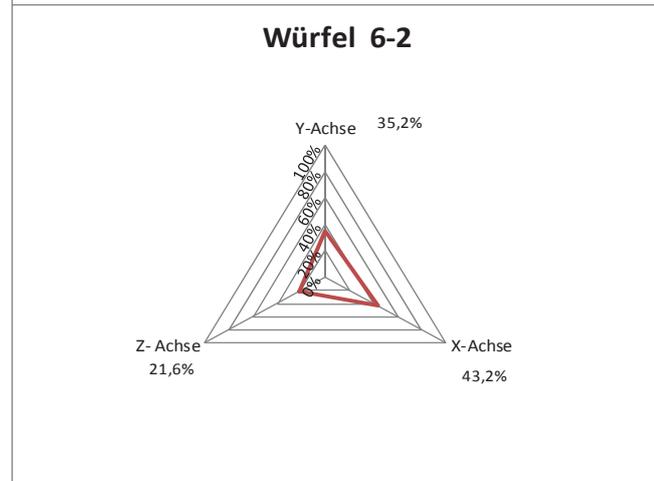
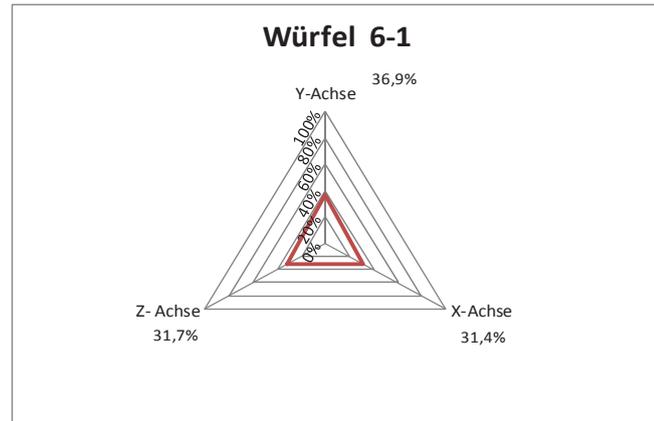
Würfel	6-4
Gemessene Menge	45,5 kg/m ³
berechnete Menge	56,4 kg/m ³
Y-Achse	31,3%
X-Achse	31,1%
Z- Achse	37,6%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 59,2 kg/m³

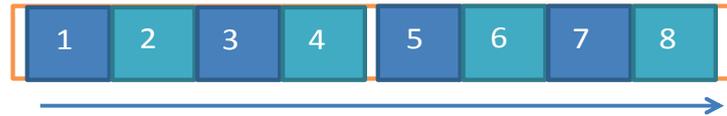


Rezeptur 2

Fließmaß 65 cm



Messprotokoll 32 Faserorientierung im Balken II-6



Fließrichtung
[z - Achse]

Würfel	1
Gemessene Menge	37,6 kg/m ³
berechnete Menge	48,3 kg/m ³
Y-Achse	28,0%
X-Achse	11,8%
Z- Achse	60,3%

Würfel	5
Gemessene Menge	35,2 kg/m ³
berechnete Menge	45,2 kg/m ³
Y-Achse	22,6%
X-Achse	19,1%
Z- Achse	58,3%

Würfel	2
Gemessene Menge	37,7 kg/m ³
berechnete Menge	48,4 kg/m ³
Y-Achse	25,3%
X-Achse	12,4%
Z- Achse	62,2%

Würfel	6	Bruchzone
Gemessene Menge	40,5 kg/m ³	
berechnete Menge	52,0 kg/m ³	
Y-Achse	24,4%	
X-Achse	21,5%	
Z- Achse	54,1%	

Würfel	3	Bruchzone
Gemessene Menge	39,5 kg/m ³	
berechnete Menge	50,7 kg/m ³	
Y-Achse	21,9%	
X-Achse	15,1%	
Z- Achse	63,1%	

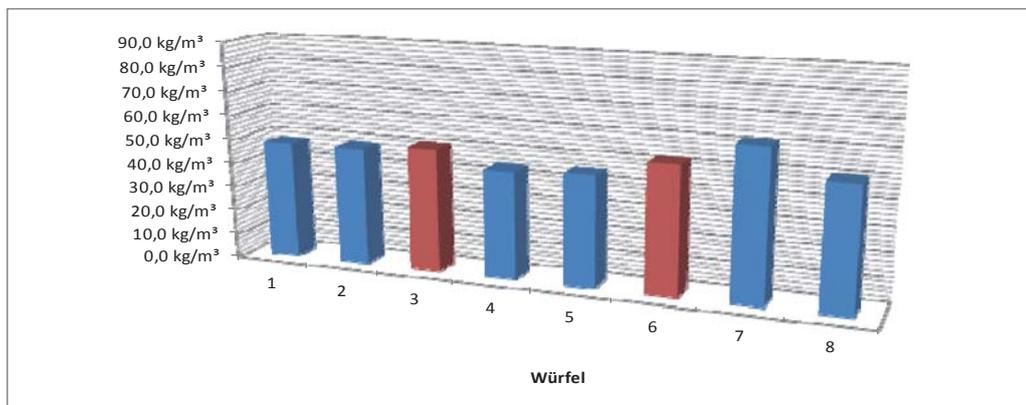
Würfel	7
Gemessene Menge	47,8 kg/m ³
berechnete Menge	61,3 kg/m ³
Y-Achse	25,5%
X-Achse	17,5%
Z- Achse	57,0%

Würfel	4
Gemessene Menge	34,3 kg/m ³
berechnete Menge	44,0 kg/m ³
Y-Achse	20,9%
X-Achse	13,9%
Z- Achse	65,2%

Würfel	8
Gemessene Menge	39,1 kg/m ³
berechnete Menge	50,2 kg/m ³
Y-Achse	36,3%
X-Achse	17,7%
Z- Achse	46,1%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 47,8 kg/m³

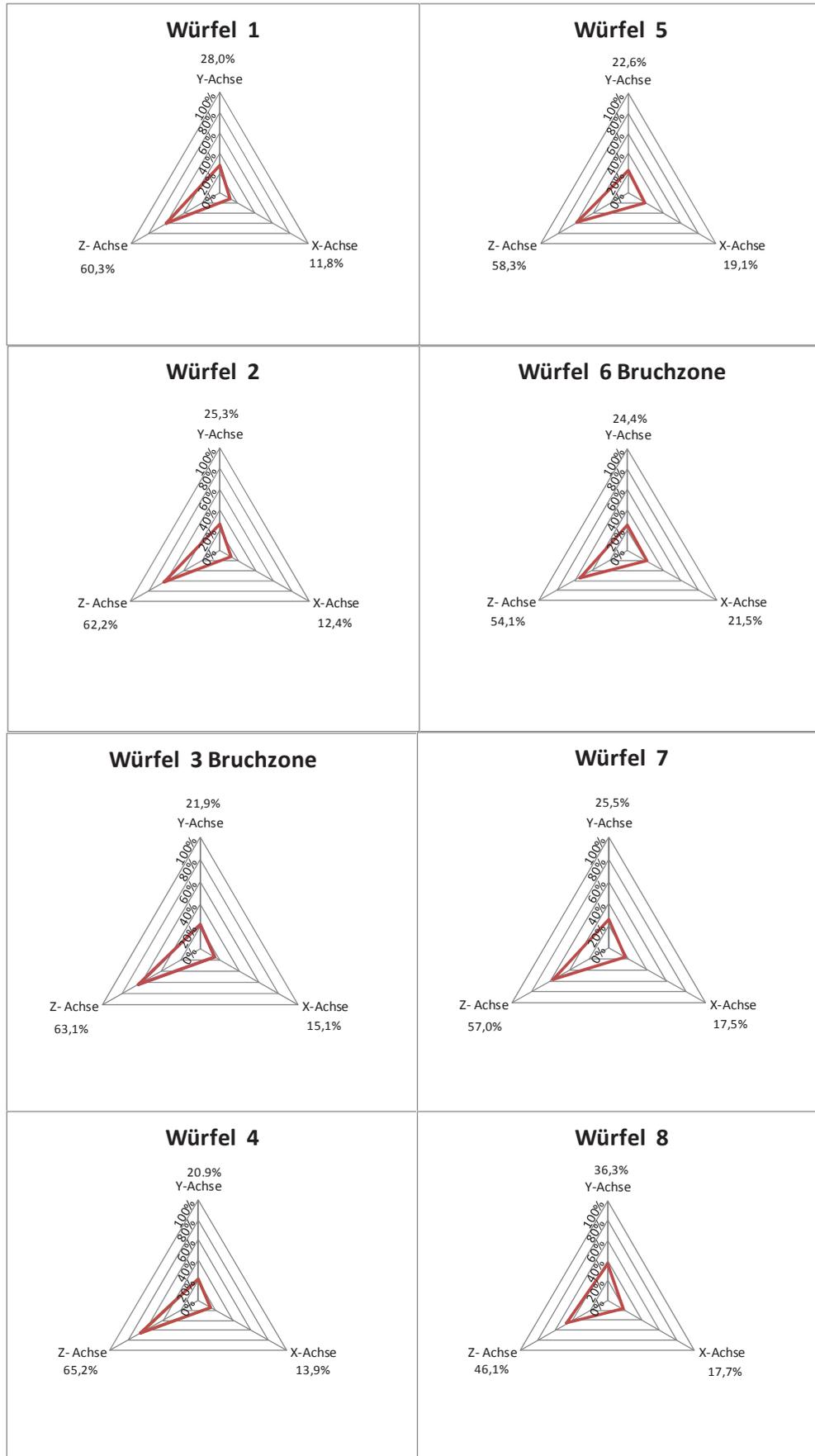
Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 52,2 kg/m³



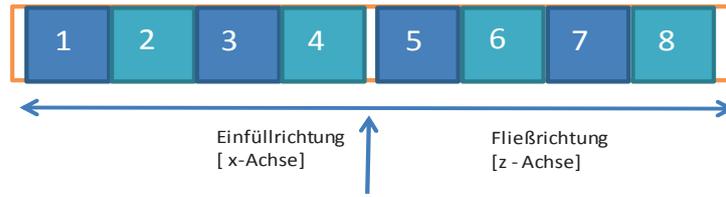
Rezeptur 2

Fließmaß 69 cm

Messprotokoll 33 Faserorientierung im Balken lang 1 (1/2)



Messprotokoll 34 Faserorientierung im Balken lang 1 (2/2)



Würfel	1
Gemessene Menge	30,9 kg/m ³
berechnete Menge	42,7 kg/m ³
Y-Achse	36,6%
X-Achse	19,7%
Z-Achse	43,7%

Würfel	5
Gemessene Menge	41,7 kg/m ³
berechnete Menge	57,6 kg/m ³
Y-Achse	30,1%
X-Achse	16,5%
Z-Achse	53,4%

Würfel	2
Gemessene Menge	34,8 kg/m ³
berechnete Menge	48,0 kg/m ³
Y-Achse	30,4%
X-Achse	13,9%
Z-Achse	55,6%

Würfel	6
Gemessene Menge	40,9 kg/m ³
berechnete Menge	56,5 kg/m ³
Y-Achse	29,9%
X-Achse	22,3%
Z-Achse	47,8%

Würfel	3	Bruchzone
Gemessene Menge	37,1 kg/m ³	
berechnete Menge	51,2 kg/m ³	
Y-Achse	26,9%	
X-Achse	15,5%	
Z-Achse	57,6%	

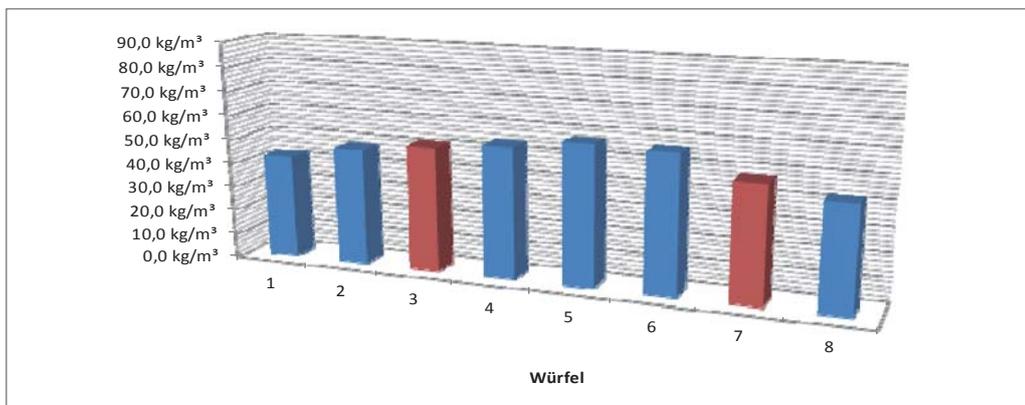
Würfel	7	Bruchzone
Gemessene Menge	34,4 kg/m ³	
berechnete Menge	47,5 kg/m ³	
Y-Achse	28,4%	
X-Achse	17,1%	
Z-Achse	54,5%	

Würfel	4
Gemessene Menge	39,0 kg/m ³
berechnete Menge	53,8 kg/m ³
Y-Achse	24,5%
X-Achse	13,9%
Z-Achse	61,5%

Würfel	8
Gemessene Menge	31,0 kg/m ³
berechnete Menge	42,8 kg/m ³
Y-Achse	31,6%
X-Achse	17,2%
Z-Achse	51,2%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 48,9 kg/m³

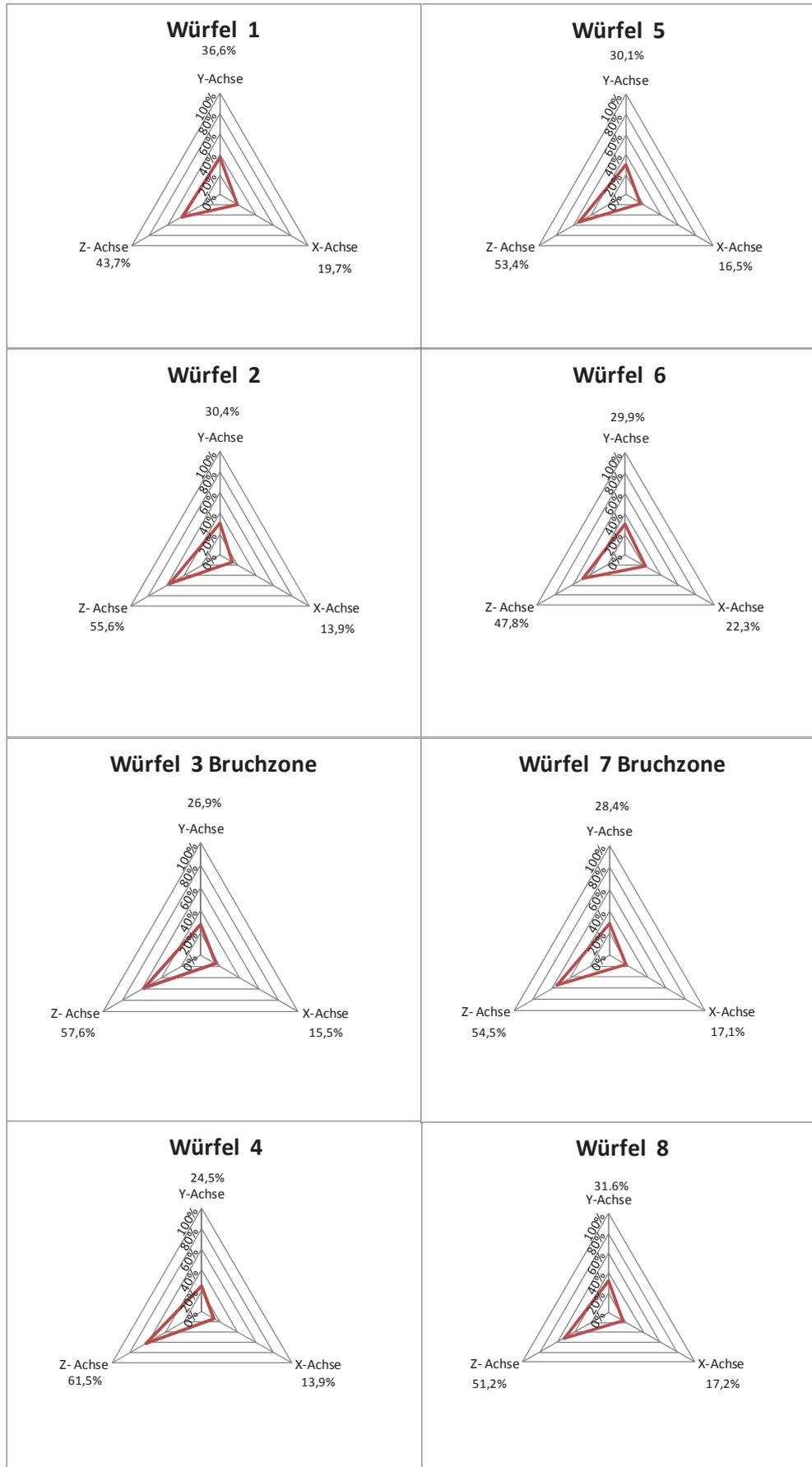
Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 51,1 kg/m³



Rezeptur 2

Fließmaß 69 cm

Messprotokoll 35 Faserorientierung im Balken lang 2 (1/2)



Messprotokoll 36 Faserorientierung im Balken lang 2 (2/2)



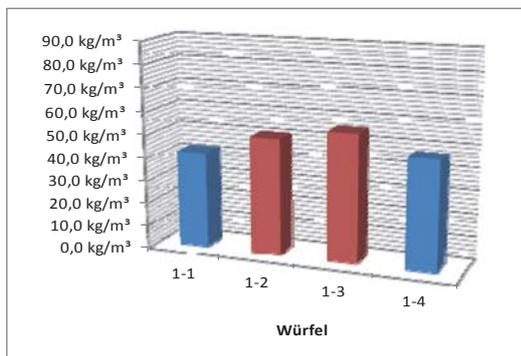
Würfel	1-1
Gemessene Menge	45,1 kg/m ³
berechnete Menge	42,1 kg/m ³
Y-Achse	20,5%
X-Achse	27,8%
Z- Achse	51,7%

Würfel	1-2	Bruchzone
Gemessene Menge	54,4 kg/m ³	
berechnete Menge	50,8 kg/m ³	
Y-Achse	18,5%	
X-Achse	24,3%	
Z- Achse	57,2%	

Würfel	1-3	Bruchzone
Gemessene Menge	59,4 kg/m ³	
berechnete Menge	55,4 kg/m ³	
Y-Achse	16,9%	
X-Achse	31,6%	
Z- Achse	51,6%	

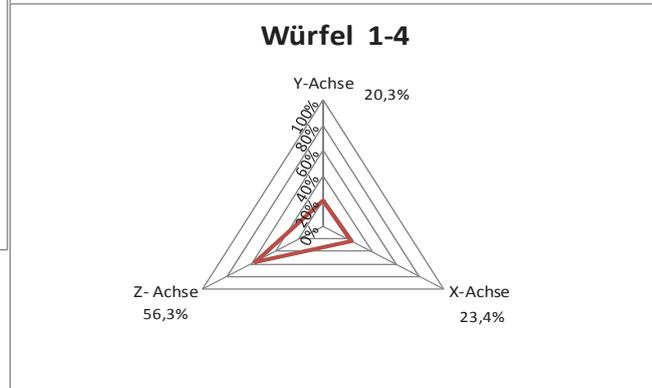
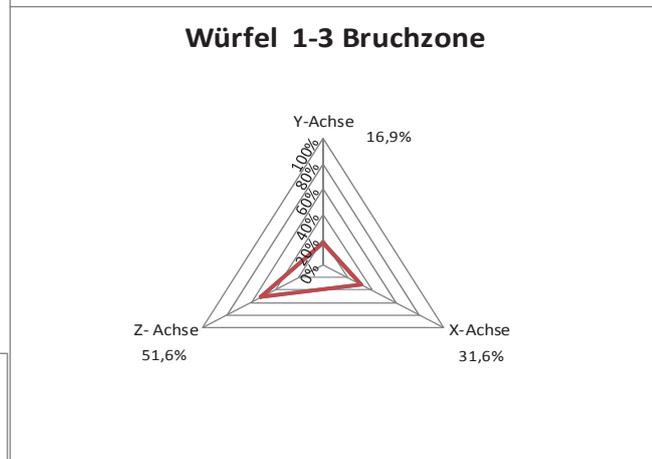
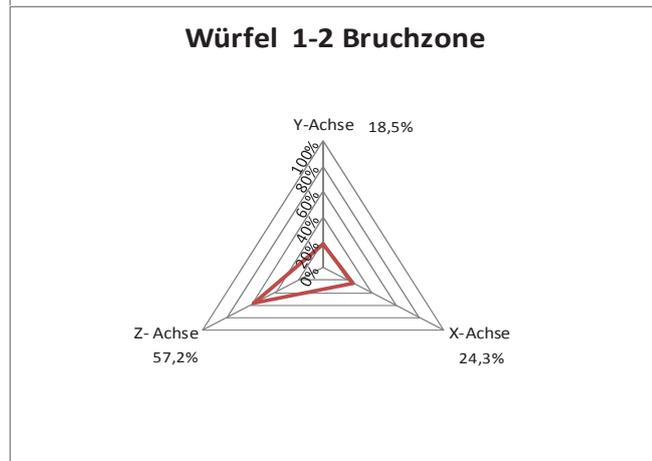
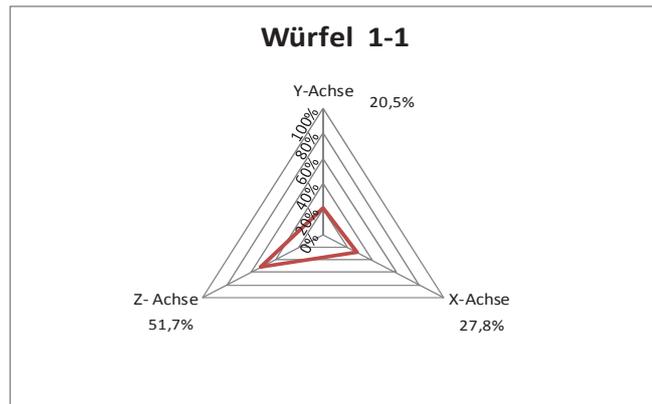
Würfel	1-4
Gemessene Menge	50,8 kg/m ³
berechnete Menge	47,4 kg/m ³
Y-Achse	20,3%
X-Achse	23,4%
Z- Achse	56,3%

Mittlerer Fasergehalt
im Bauteil 48,9 kg/m³



Rezeptur 2

Fließmaß 68 cm



Messprotokoll 37 Faserorientierung im Balken T-1



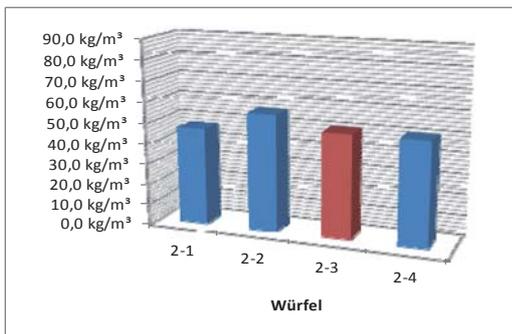
Würfel 2-1	
Gemessene Menge	50,5 kg/m ³
berechnete Menge	47,1 kg/m ³
Y-Achse	22,7%
X-Achse	28,7%
Z- Achse	48,6%

Würfel 2-2	
Gemessene Menge	60,4 kg/m ³
berechnete Menge	56,4 kg/m ³
Y-Achse	20,0%
X-Achse	23,8%
Z- Achse	56,0%

Würfel 2-3 Bruchzone	
Gemessene Menge	54,0 kg/m ³
berechnete Menge	50,4 kg/m ³
Y-Achse	21,4%
X-Achse	32,5%
Z- Achse	46,1%

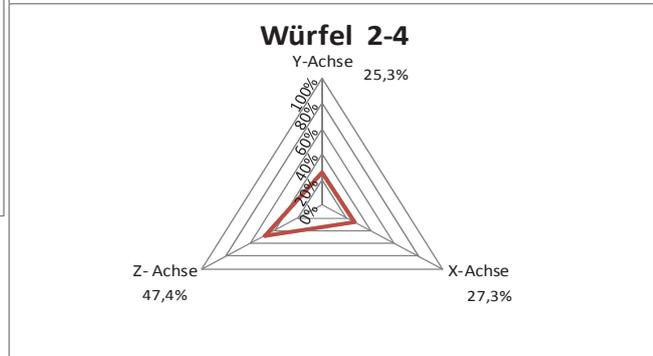
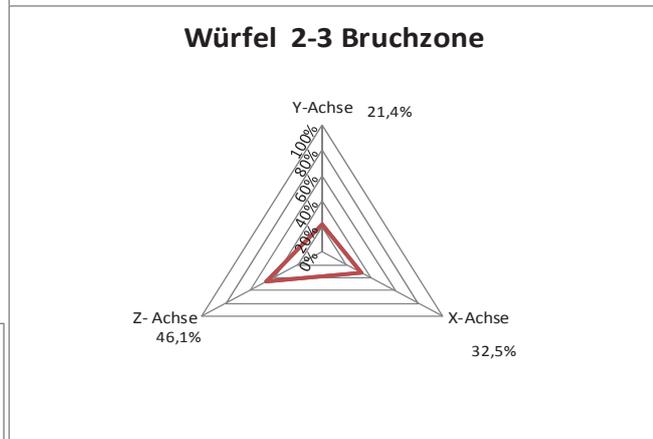
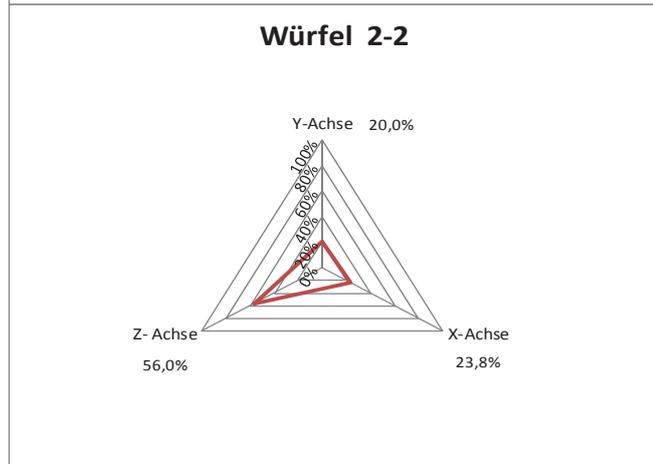
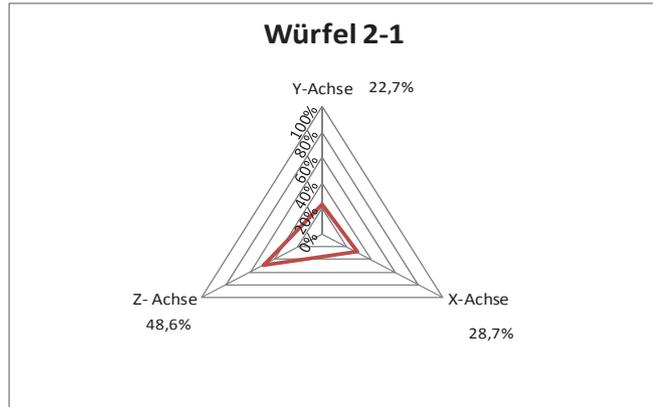
Würfel 2-4	
Gemessene Menge	54,0 kg/m ³
berechnete Menge	50,4 kg/m ³
Y-Achse	25,3%
X-Achse	27,3%
Z- Achse	47,4%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 51,1 kg/m³

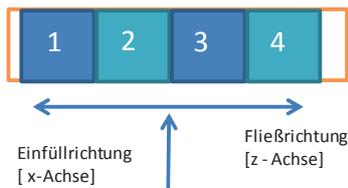


Rezeptur 2

Fließmaß 68 cm



Messprotokoll 38 Faserorientierung im Balken T-2



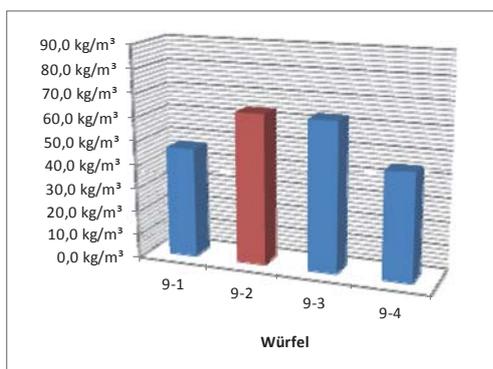
Würfel	9-1	
Gemessene Menge	49,9 kg/m ³	
berechnete Menge	46,5 kg/m ³	
Y-Achse	25,5%	
X-Achse	22,9%	
Z-Achse	51,6%	

Würfel	9-2	Bruchzone
Gemessene Menge	68,0 kg/m ³	
berechnete Menge	63,4 kg/m ³	
Y-Achse	20,2%	
X-Achse	19,6%	
Z-Achse	60,2%	

Würfel	9-3	
Gemessene Menge	67,6 kg/m ³	
berechnete Menge	63,0 kg/m ³	
Y-Achse	20,1%	
X-Achse	16,7%	
Z-Achse	63,1%	

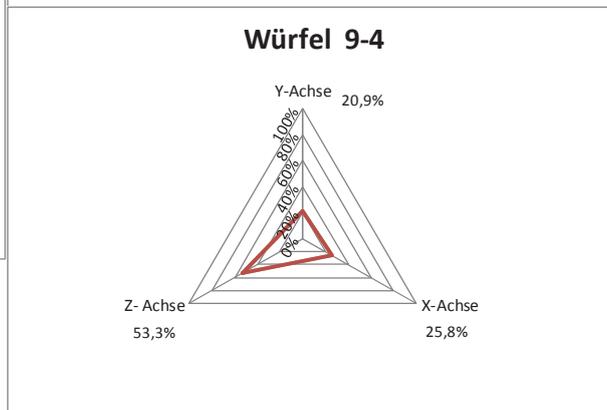
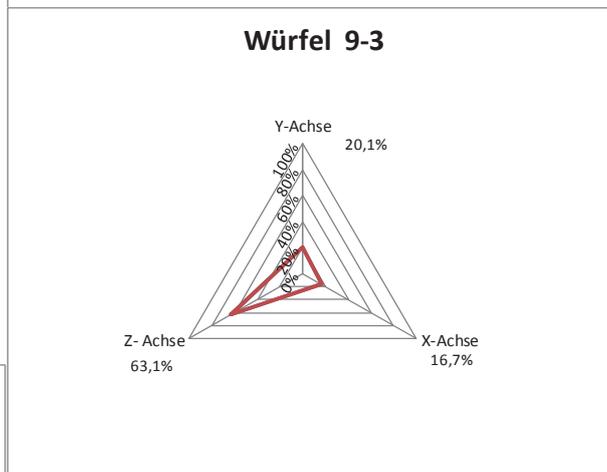
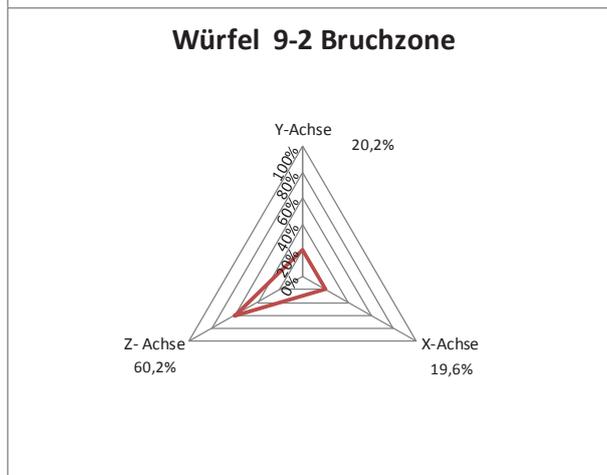
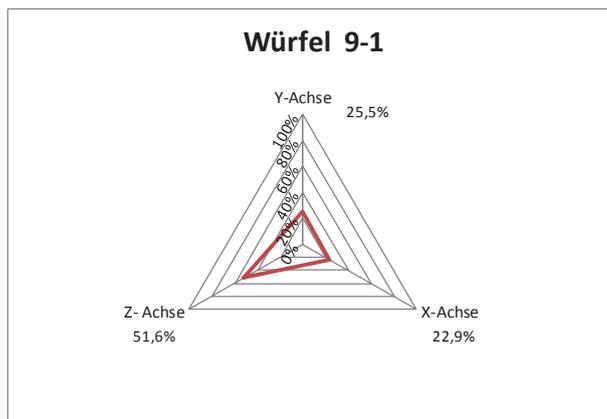
Würfel	9-4	
Gemessene Menge	48,4 kg/m ³	
berechnete Menge	45,1 kg/m ³	
Y-Achse	20,9%	
X-Achse	25,8%	
Z-Achse	53,3%	

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 54,5 kg/m³



Rezeptur 2

Fließmaß 66 cm



Messprotokoll 39 Faserorientierung im Balken T-9



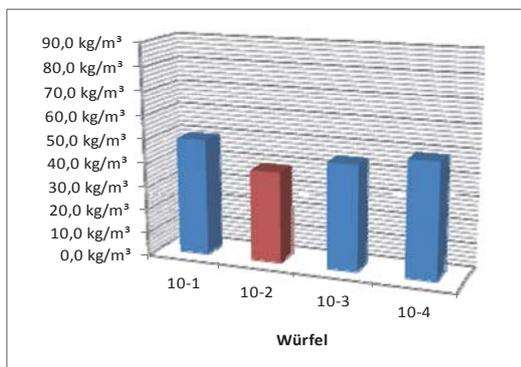
Würfel 10-1	
Gemessene Menge	53,0 kg/m ³
berechnete Menge	49,4 kg/m ³
Y-Achse	21,0%
X-Achse	24,3%
Z-Achse	54,7%

Würfel	10-2	Bruchzone
Gemessene Menge	41,6 kg/m ³	
berechnete Menge	38,8 kg/m ³	
Y-Achse	20,3%	
X-Achse	17,5%	
Z-Achse	62,2%	

Würfel 10-3	
Gemessene Menge	48,1 kg/m ³
berechnete Menge	44,8 kg/m ³
Y-Achse	19,1%
X-Achse	13,4%
Z-Achse	67,4%

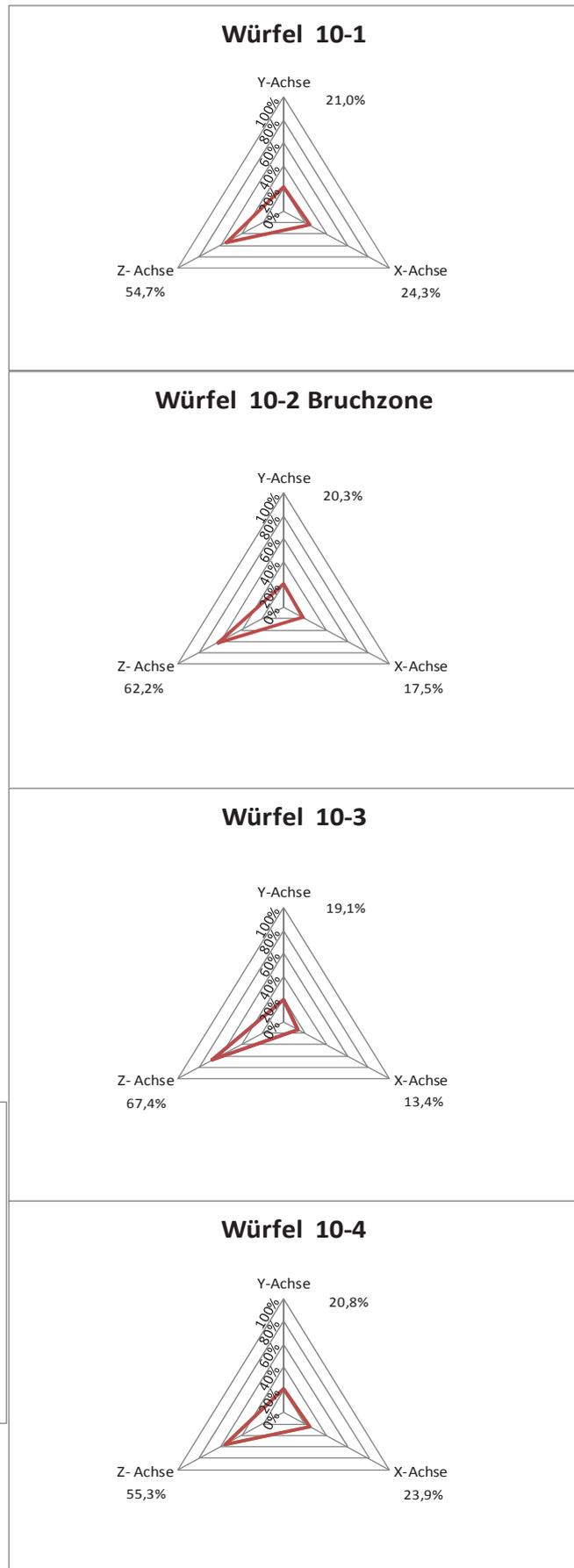
Würfel 10-4	
Gemessene Menge	52,5 kg/m ³
berechnete Menge	48,9 kg/m ³
Y-Achse	20,8%
X-Achse	23,9%
Z-Achse	55,3%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 45,5 kg/m³



Rezeptur 2

Fließmaß 66 cm



Messprotokoll 40 Faserorientierung im Balken T-10



Würfel 1-1	
Gemessene Menge	32,1 kg/m ³
berechnete Menge	64,2 kg/m ³
Y-Achse	22,6%
X-Achse	32,7%
Z-Achse	44,7%

Würfel 1-2	
Gemessene Menge	41,7 kg/m ³
berechnete Menge	83,4 kg/m ³
Y-Achse	22,2%
X-Achse	26,0%
Z-Achse	51,8%

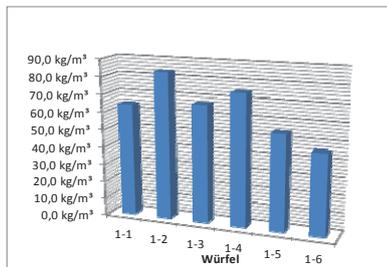
Würfel 1-3	
Gemessene Menge	33,5 kg/m ³
berechnete Menge	67,0 kg/m ³
Y-Achse	20,1%
X-Achse	27,5%
Z-Achse	52,4%

Würfel 1-4	
Gemessene Menge	37,4 kg/m ³
berechnete Menge	74,8 kg/m ³
Y-Achse	21,9%
X-Achse	25,6%
Z-Achse	52,4%

Würfel 1-5	
Gemessene Menge	27,3 kg/m ³
berechnete Menge	54,6 kg/m ³
Y-Achse	26,7%
X-Achse	20,3%
Z-Achse	53,0%

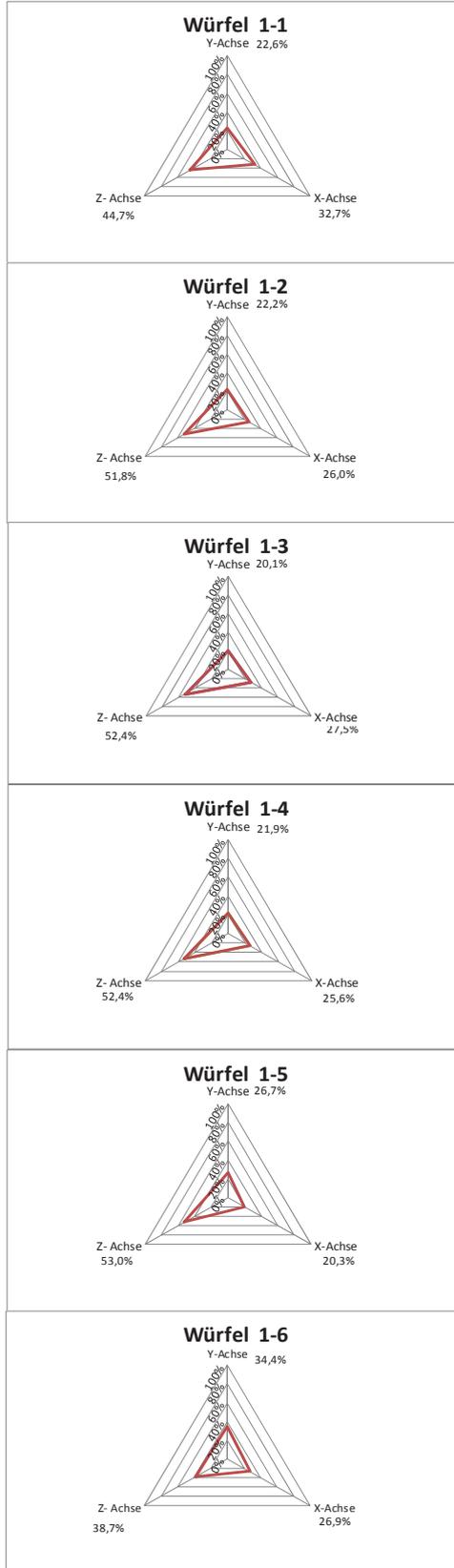
Würfel 1-6	
Gemessene Menge	23,1 kg/m ³
berechnete Menge	46,2 kg/m ³
Y-Achse	34,4%
X-Achse	26,9%
Z-Achse	38,7%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil: 65,0 kg/m³

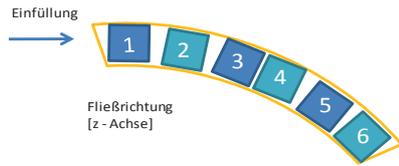


Rezeptur 6

Fließmaß 63 cm



Messprotokoll 41 Faserorientierung im Tübbing T1-1



Würfel	2-1	Rand
Gemessene Menge	24,8 kg/m ³	
berechnete Menge	48,8 kg/m ³	
Y-Achse	18,6%	
X-Achse	28,8%	
Z- Achse	52,6%	

Würfel	2-2
Gemessene Menge	42,3 kg/m ³
berechnete Menge	83,3 kg/m ³
Y-Achse	17,8%
X-Achse	25,5%
Z- Achse	56,7%

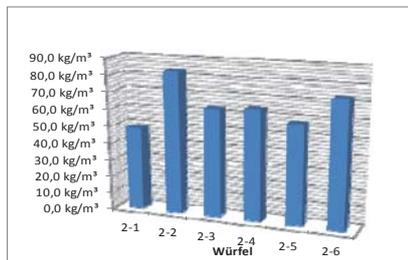
Würfel	2-3
Gemessene Menge	31,9 kg/m ³
berechnete Menge	62,8 kg/m ³
Y-Achse	19,1%
X-Achse	22,8%
Z- Achse	58,2%

Würfel	2-4
Gemessene Menge	32,7 kg/m ³
berechnete Menge	64,4 kg/m ³
Y-Achse	21,8%
X-Achse	26,7%
Z- Achse	51,5%

Würfel	2-5
Gemessene Menge	29,3 kg/m ³
berechnete Menge	57,7 kg/m ³
Y-Achse	24,8%
X-Achse	23,0%
Z- Achse	52,2%

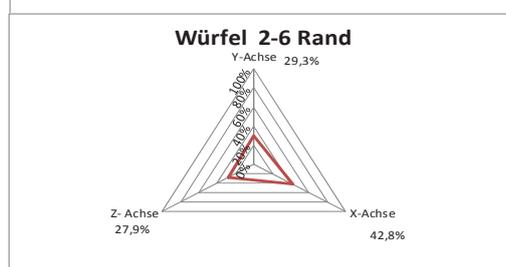
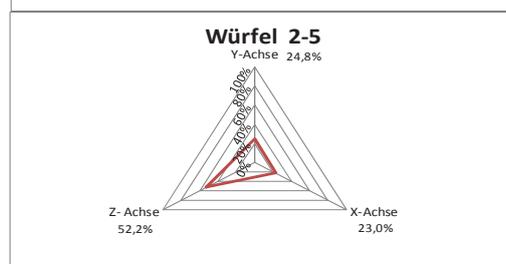
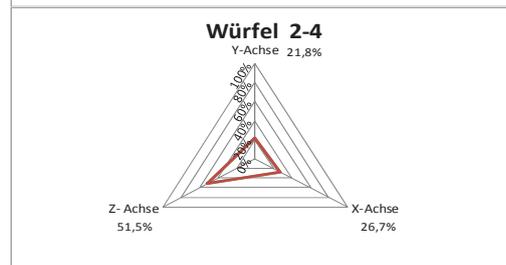
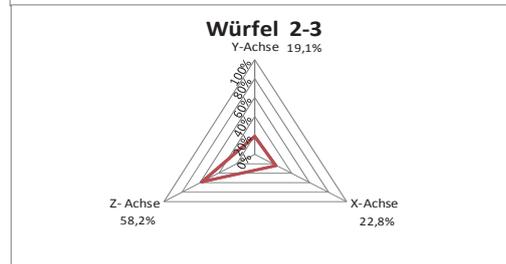
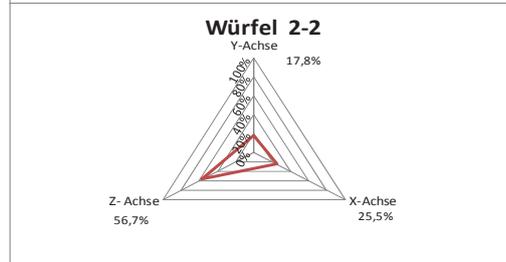
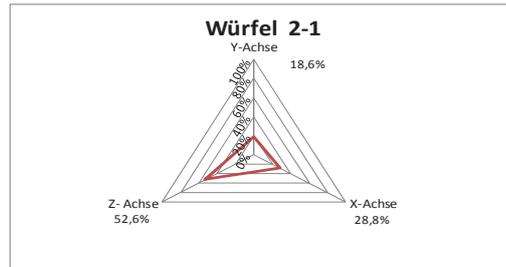
Würfel	2-6	Rand
Gemessene Menge	37,1 kg/m ³	
berechnete Menge	73,0 kg/m ³	
Y-Achse	29,3%	
X-Achse	42,8%	
Z- Achse	27,9%	

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³

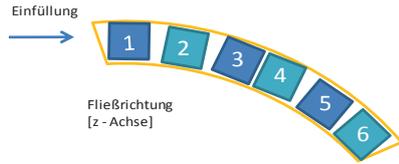


Rezeptur 6

Fließmaß 65 cm



Messprotokoll 42 Faserorientierung im Tübbing T1-2



Würfel	3-1	Rand
Gemessene Menge	24,4 kg/m ³	
berechnete Menge	46,3 kg/m ³	
Y-Achse	18,7%	
X-Achse	29,7%	
Z-Achse	51,6%	

Würfel	3-2	Rand
Gemessene Menge	33,0 kg/m ³	
berechnete Menge	62,6 kg/m ³	
Y-Achse	22,3%	
X-Achse	30,3%	
Z-Achse	47,4%	

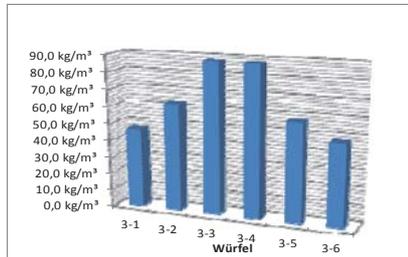
Würfel	3-3	Rand
Gemessene Menge	46,3 kg/m ³	
berechnete Menge	87,9 kg/m ³	
Y-Achse	21,6%	
X-Achse	28,4%	
Z-Achse	50,0%	

Würfel	3-4	Rand
Gemessene Menge	46,2 kg/m ³	
berechnete Menge	87,7 kg/m ³	
Y-Achse	20,7%	
X-Achse	28,4%	
Z-Achse	50,9%	

Würfel	3-5	Rand
Gemessene Menge	30,3 kg/m ³	
berechnete Menge	57,5 kg/m ³	
Y-Achse	25,1%	
X-Achse	24,9%	
Z-Achse	50,0%	

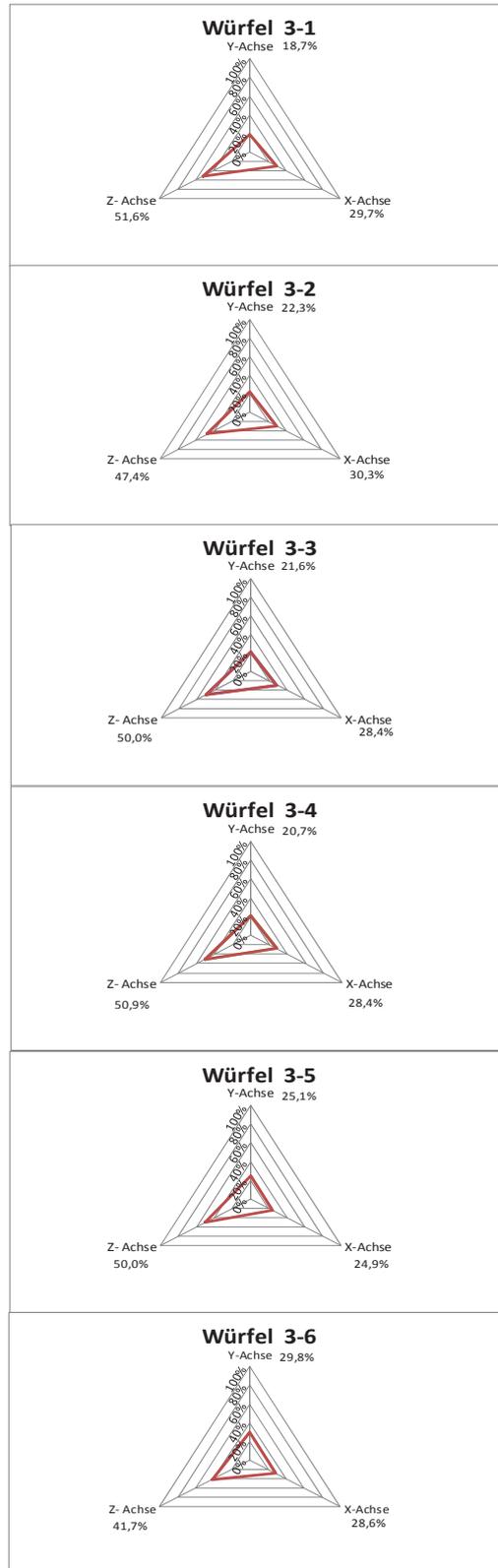
Würfel	3-6	Rand
Gemessene Menge	25,3 kg/m ³	
berechnete Menge	48,0 kg/m ³	
Y-Achse	29,8%	
X-Achse	28,6%	
Z-Achse	41,7%	

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil: 71,1 kg/m³

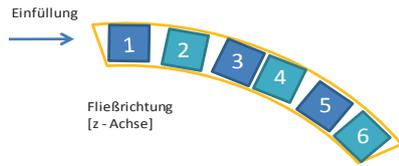


Rezeptur 6

Fliezmaß 67 cm



Messprotokoll 43 Faserorientierung im Tübbing T1-3



Würfel	4-1
Gemessene Menge	24,3 kg/m ³
berechnete Menge	56,0 kg/m ³
Y-Achse	21,9%
X-Achse	29,6%
Z-Achse	48,5%

Würfel	4-2
Gemessene Menge	23,0 kg/m ³
berechnete Menge	53,0 kg/m ³
Y-Achse	21,2%
X-Achse	23,3%
Z-Achse	55,5%

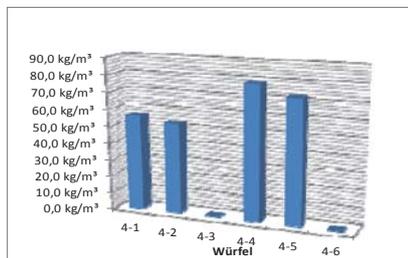
Würfel	4-3	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge	0,0 kg/m ³	
Y-Achse		
X-Achse		
Z-Achse		

Würfel	4-4
Gemessene Menge	34,1 kg/m ³
berechnete Menge	78,6 kg/m ³
Y-Achse	22,4%
X-Achse	20,1%
Z-Achse	57,5%

Würfel	4-5
Gemessene Menge	31,4 kg/m ³
berechnete Menge	72,4 kg/m ³
Y-Achse	20,9%
X-Achse	27,9%
Z-Achse	51,1%

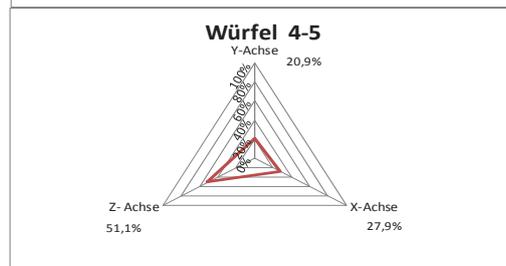
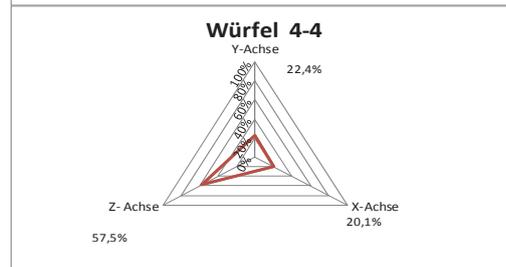
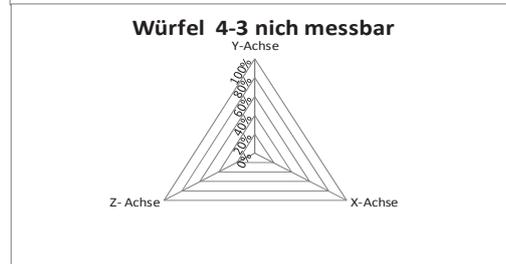
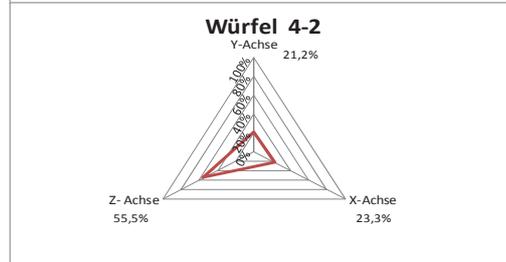
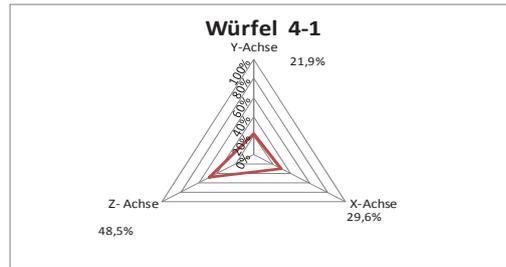
Würfel	4-6	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge	0,0 kg/m ³	
Y-Achse	0,0%	
X-Achse	100,0%	
Z-Achse		

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³



Rezeptur 6

Fließmaß 64 cm



Messprotokoll 44 Faserorientierung im Tübbing T1-4



Würfel 5-1	
Gemessene Menge	29,5 kg/m ³
berechnete Menge	54,5 kg/m ³
Y-Achse	14,5%
X-Achse	24,7%
Z-Achse	60,8%

Würfel 5-2	
Gemessene Menge	36,9 kg/m ³
berechnete Menge	68,2 kg/m ³
Y-Achse	18,0%
X-Achse	21,3%
Z-Achse	60,7%

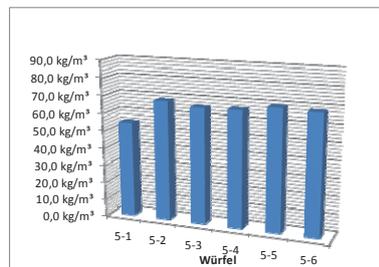
Würfel 5-3	
Gemessene Menge	35,7 kg/m ³
berechnete Menge	66,0 kg/m ³
Y-Achse	18,4%
X-Achse	20,6%
Z-Achse	61,0%

Würfel 5-4	
Gemessene Menge	35,9 kg/m ³
berechnete Menge	66,3 kg/m ³
Y-Achse	19,4%
X-Achse	25,2%
Z-Achse	55,4%

Würfel 5-5	
Gemessene Menge	37,4 kg/m ³
berechnete Menge	69,1 kg/m ³
Y-Achse	20,9%
X-Achse	28,1%
Z-Achse	51,0%

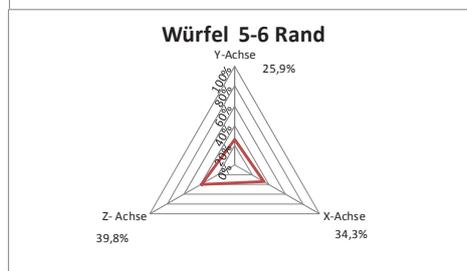
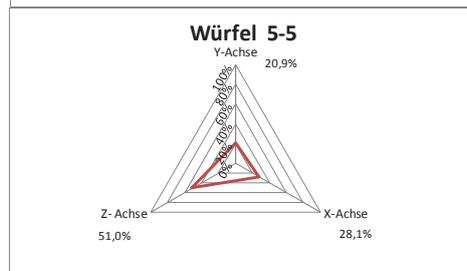
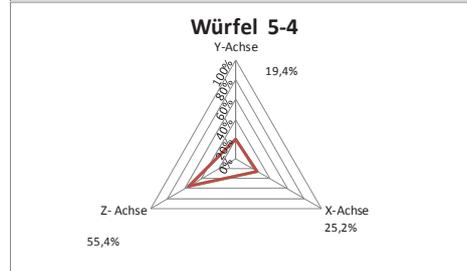
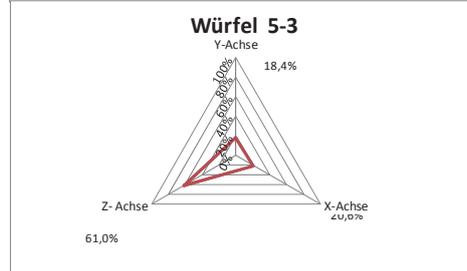
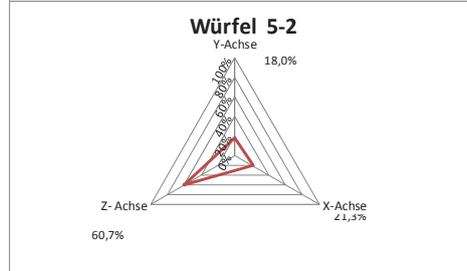
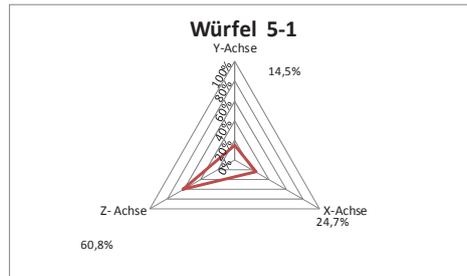
Würfel 5-6 Rand	
Gemessene Menge	36,9 kg/m ³
berechnete Menge	68,2 kg/m ³
Y-Achse	25,9%
X-Achse	34,3%
Z-Achse	39,8%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil: 65,3 kg/m³

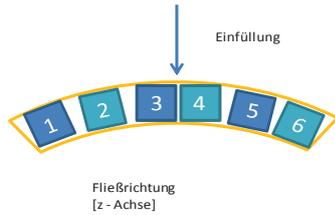


Rezeptur 6

Fließmaß: 63 cm



Messprotokoll 45 Faserorientierung im Tübbing T1-5



Würfel	1-1
Gemessene Menge	30,9 kg/m ³
berechnete Menge	63,4 kg/m ³
Y-Achse	26,7%
X-Achse	31,6%
Z-Achse	41,7%

Würfel	1-2
Gemessene Menge	32,5 kg/m ³
berechnete Menge	66,6 kg/m ³
Y-Achse	18,5%
X-Achse	25,5%
Z-Achse	56,0%

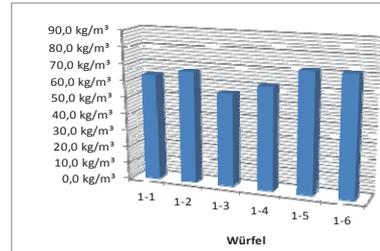
Würfel	1-3
Gemessene Menge	27,0 kg/m ³
berechnete Menge	55,4 kg/m ³
Y-Achse	17,4%
X-Achse	22,9%
Z-Achse	59,7%

Würfel	1-4
Gemessene Menge	30,0 kg/m ³
berechnete Menge	61,5 kg/m ³
Y-Achse	15,3%
X-Achse	27,8%
Z-Achse	56,9%

Würfel	1-5
Gemessene Menge	34,9 kg/m ³
berechnete Menge	71,6 kg/m ³
Y-Achse	17,4%
X-Achse	29,0%
Z-Achse	53,7%

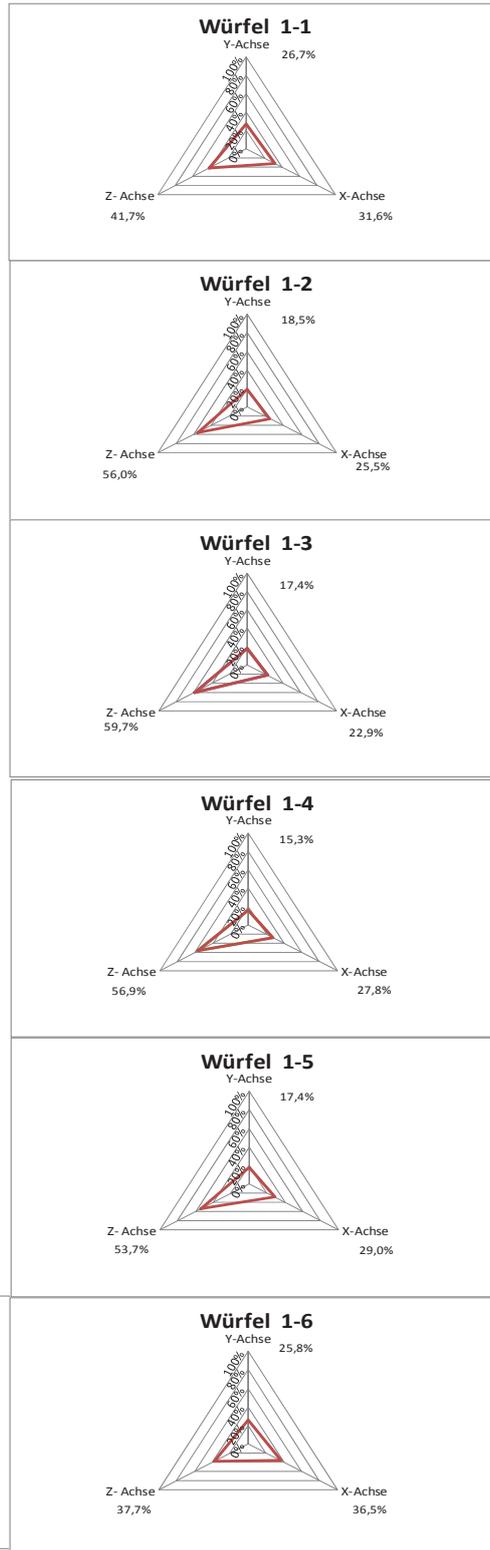
Würfel	1-6
Gemessene Menge	34,9 kg/m ³
berechnete Menge	71,6 kg/m ³
Y-Achse	25,8%
X-Achse	36,5%
Z-Achse	37,7%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³

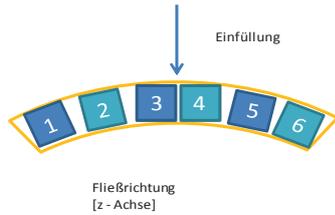


Rezeptur 6

Fließmaß 65 cm



Messprotokoll 46 Faserorientierung im Tübbing T2-1



Würfel	2-1
Gemessene Menge	46,0 kg/m ³
berechnete Menge	83,5 kg/m ³
Y-Achse	27,3%
X-Achse	35,7%
Z-Achse	37,0%

Würfel	2-2
Gemessene Menge	30,6 kg/m ³
berechnete Menge	55,5 kg/m ³
Y-Achse	15,4%
X-Achse	17,9%
Z-Achse	66,7%

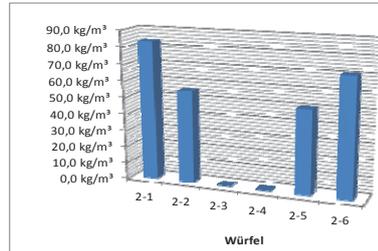
Würfel	2-3	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge	0,0 kg/m ³	
Y-Achse		
X-Achse		
Z-Achse		

Würfel	2-4	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge	0,0 kg/m ³	
Y-Achse		
X-Achse		
Z-Achse		

Würfel	2-5
Gemessene Menge	27,8 kg/m ³
berechnete Menge	50,4 kg/m ³
Y-Achse	12,7%
X-Achse	19,5%
Z-Achse	67,8%

Würfel	2-6
Gemessene Menge	38,9 kg/m ³
berechnete Menge	70,6 kg/m ³
Y-Achse	20,2%
X-Achse	28,8%
Z-Achse	51,1%

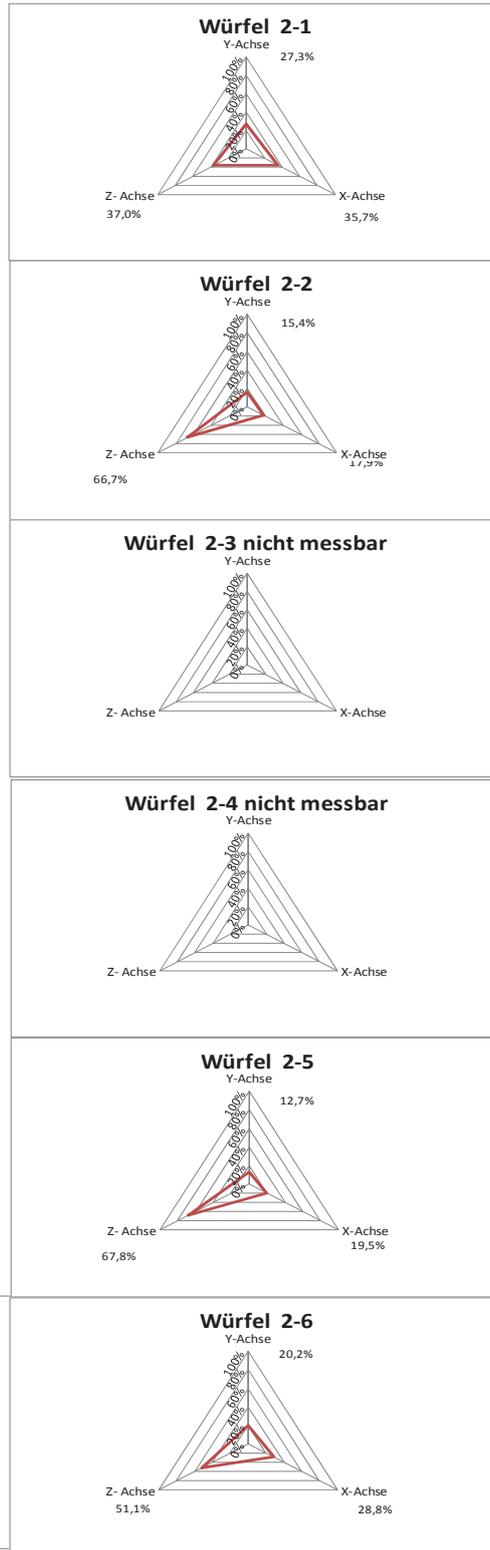
Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³



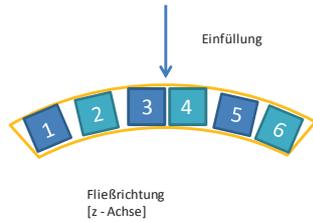
Rezeptur 6

Fließmaß

64 cm



Messprotokoll 47 Faserorientierung im Tübbing T2-2



Würfel	3-1	
Gemessene Menge	38,8 kg/m ³	
berechnete Menge	66,8 kg/m ³	
Y-Achse	20,8%	
X-Achse	33,2%	
Z-Achse	33,1%	

Würfel	3-2	
Gemessene Menge	36,7 kg/m ³	
berechnete Menge	63,1 kg/m ³	
Y-Achse	23,2%	
X-Achse	19,4%	
Z-Achse	57,4%	

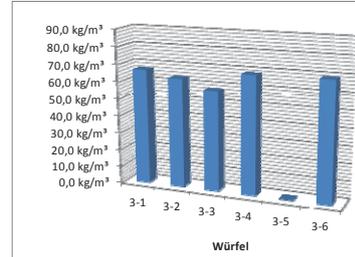
Würfel	3-3	
Gemessene Menge	33,6 kg/m ³	
berechnete Menge	57,8 kg/m ³	
Y-Achse	22,7%	
X-Achse	15,6%	
Z-Achse	61,7%	

Würfel	3-4	
Gemessene Menge	39,7 kg/m ³	
berechnete Menge	68,3 kg/m ³	
Y-Achse	26,7%	
X-Achse	25,5%	
Z-Achse	47,8%	

Würfel	3-5	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge	0,0 kg/m ³	
Y-Achse		
X-Achse		
Z-Achse		

Würfel	3-6	
Gemessene Menge	40,1 kg/m ³	
berechnete Menge	69,0 kg/m ³	
Y-Achse	16,5%	
X-Achse	31,2%	
Z-Achse	52,5%	

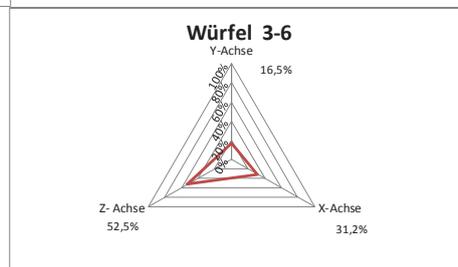
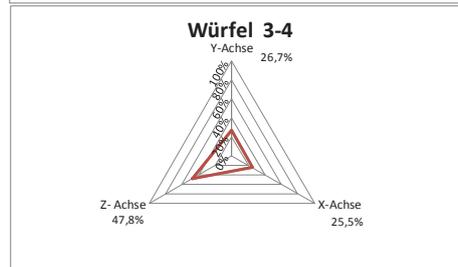
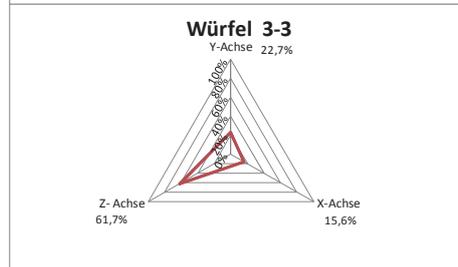
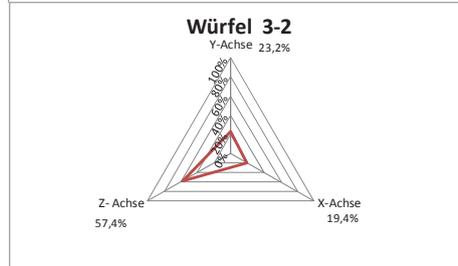
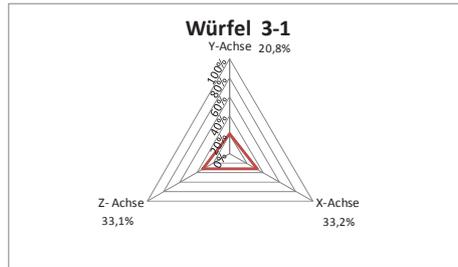
Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³



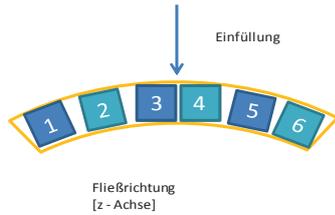
Rezeptur 6

Fließmaß

66 cm



Messprotokoll 48 Faserorientierung im Tübbing T2-3



Würfel	4-1
Gemessene Menge	36,2 kg/m ³
berechnete Menge	63,8 kg/m ³
Y-Achse	20,9%
X-Achse	33,0%
Z-Achse	46,1%

Würfel	4-2
Gemessene Menge	39,0 kg/m ³
berechnete Menge	68,8 kg/m ³
Y-Achse	15,4%
X-Achse	27,0%
Z-Achse	57,6%

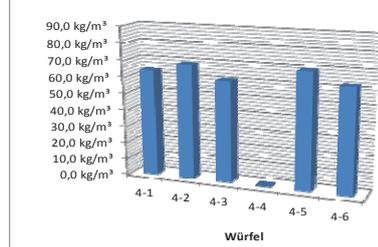
Würfel	4-3
Gemessene Menge	34,4 kg/m ³
berechnete Menge	60,7 kg/m ³
Y-Achse	15,6%
X-Achse	24,9%
Z-Achse	59,5%

Würfel	4-4	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge		0,0 kg/m ³
Y-Achse		
X-Achse		
Z-Achse		

Würfel	4-5
Gemessene Menge	39,3 kg/m ³
berechnete Menge	69,3 kg/m ³
Y-Achse	16,2%
X-Achse	26,8%
Z-Achse	57,0%

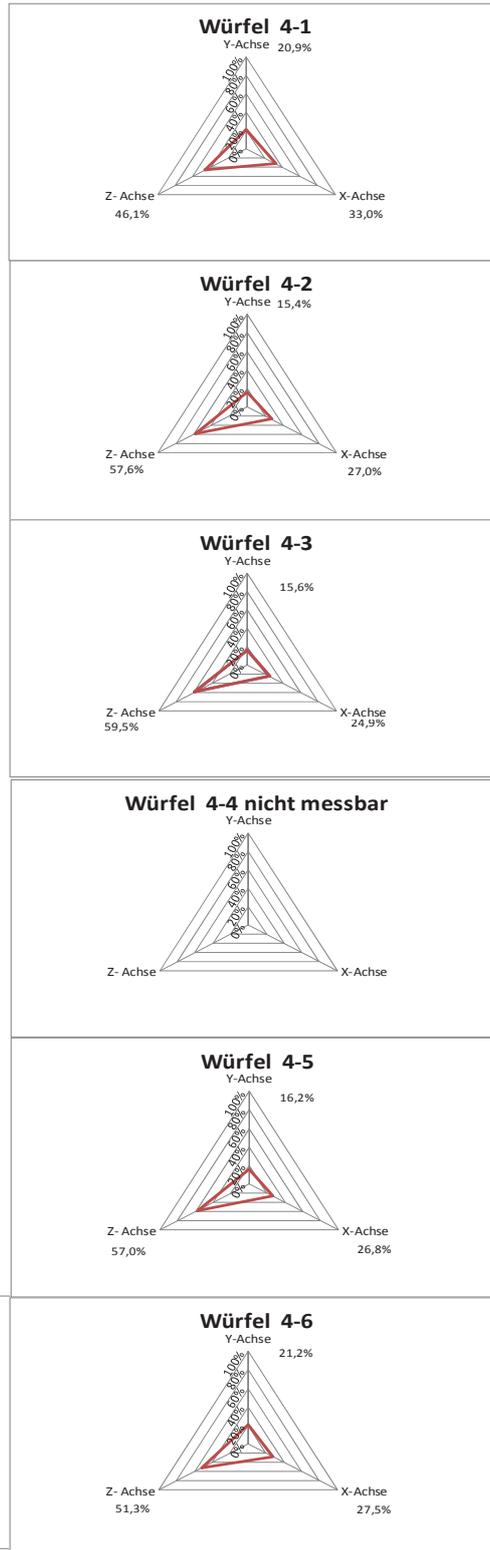
Würfel	4-6
Gemessene Menge	35,4 kg/m ³
berechnete Menge	62,4 kg/m ³
Y-Achse	21,2%
X-Achse	27,5%
Z-Achse	51,3%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³

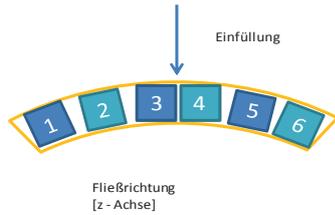


Rezeptur 6

Fließmaß 65 cm



Messprotokoll 49 Faserorientierung im Tübbing T2-4



Würfel	5-1
Gemessene Menge	61,7 kg/m ³
berechnete Menge	87,5 kg/m ³
Y-Achse	20,9%
X-Achse	29,8%
Z-Achse	49,2%

Würfel	5-2
Gemessene Menge	50,1 kg/m ³
berechnete Menge	71,0 kg/m ³
Y-Achse	14,2%
X-Achse	27,7%
Z-Achse	58,2%

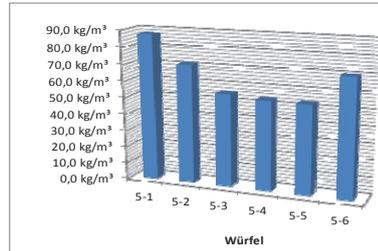
Würfel	5-3
Gemessene Menge	38,9 kg/m ³
berechnete Menge	55,1 kg/m ³
Y-Achse	14,6%
X-Achse	24,2%
Z-Achse	61,2%

Würfel	5-4
Gemessene Menge	37,6 kg/m ³
berechnete Menge	53,3 kg/m ³
Y-Achse	15,7%
X-Achse	22,0%
Z-Achse	62,3%

Würfel	5-5
Gemessene Menge	37,4 kg/m ³
berechnete Menge	53,0 kg/m ³
Y-Achse	15,5%
X-Achse	24,5%
Z-Achse	60,0%

Würfel	5-6
Gemessene Menge	49,4 kg/m ³
berechnete Menge	70,0 kg/m ³
Y-Achse	21,3%
X-Achse	34,5%
Z-Achse	44,2%

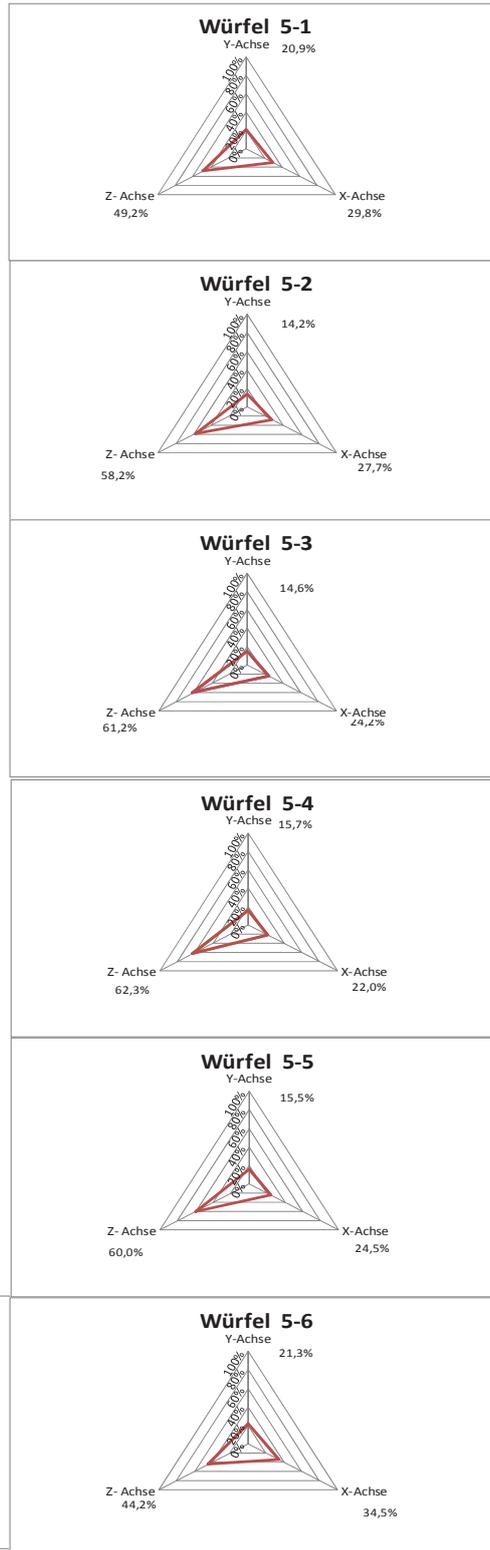
Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³



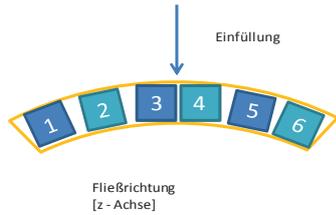
Rezeptur 6

Fließmaß

66 cm



Messprotokoll 50 Faserorientierung im Tübbing T2-5



Würfel	6-1
Gemessene Menge	56,6 kg/m ³
berechnete Menge	76,4 kg/m ³
Y-Achse	17,1%
X-Achse	31,4%
Z-Achse	51,5%

Würfel	6-2
Gemessene Menge	52,7 kg/m ³
berechnete Menge	71,1 kg/m ³
Y-Achse	18,3%
X-Achse	26,0%
Z-Achse	55,7%

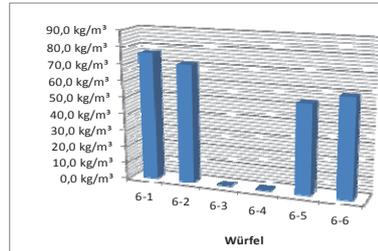
Würfel	6-3	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge	0,0 kg/m ³	
Y-Achse		
X-Achse		
Z-Achse		

Würfel	6-4	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge	0,0 kg/m ³	
Y-Achse		
X-Achse		
Z-Achse		

Würfel	6-5
Gemessene Menge	39,7 kg/m ³
berechnete Menge	53,6 kg/m ³
Y-Achse	18,3%
X-Achse	21,0%
Z-Achse	60,7%

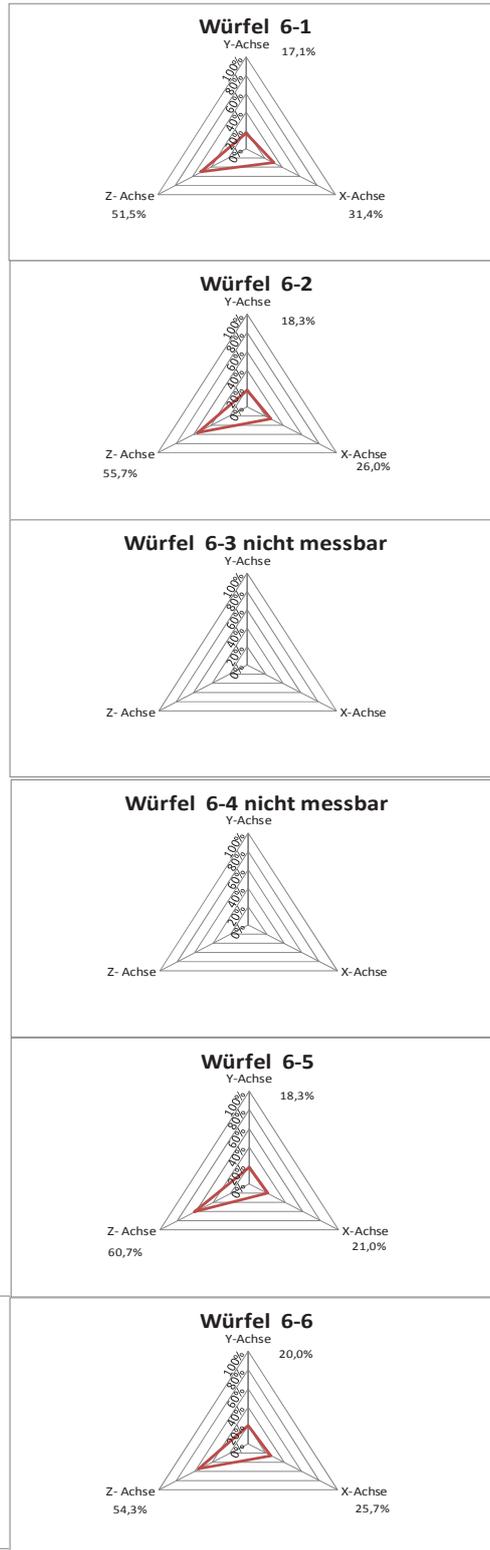
Würfel	6-6
Gemessene Menge	43,6 kg/m ³
berechnete Menge	58,9 kg/m ³
Y-Achse	20,0%
X-Achse	25,7%
Z-Achse	54,3%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³

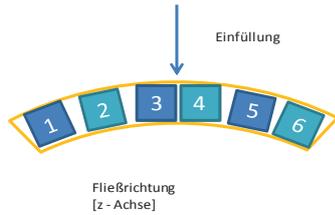


Rezeptur 6

Fließmaß 65 cm



Messprotokoll 51 Faserorientierung im Tübbing T2-6



Würfel	7-1
Gemessene Menge	32,1 kg/m ³
berechnete Menge	62,7 kg/m ³
Y-Achse	24,3%
X-Achse	30,7%
Z-Achse	45,0%

Würfel	7-2
Gemessene Menge	33,3 kg/m ³
berechnete Menge	65,0 kg/m ³
Y-Achse	20,0%
X-Achse	23,0%
Z-Achse	57,0%

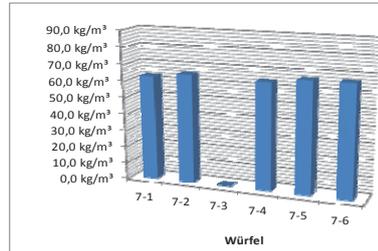
Würfel	7-3	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge	0,0 kg/m ³	
Y-Achse		
X-Achse		
Z-Achse		

Würfel	7-4
Gemessene Menge	32,8 kg/m ³
berechnete Menge	64,0 kg/m ³
Y-Achse	18,2%
X-Achse	24,8%
Z-Achse	57,0%

Würfel	7-5
Gemessene Menge	34,1 kg/m ³
berechnete Menge	66,6 kg/m ³
Y-Achse	19,7%
X-Achse	24,4%
Z-Achse	55,9%

Würfel	7-6
Gemessene Menge	34,2 kg/m ³
berechnete Menge	66,8 kg/m ³
Y-Achse	29,2%
X-Achse	36,3%
Z-Achse	34,5%

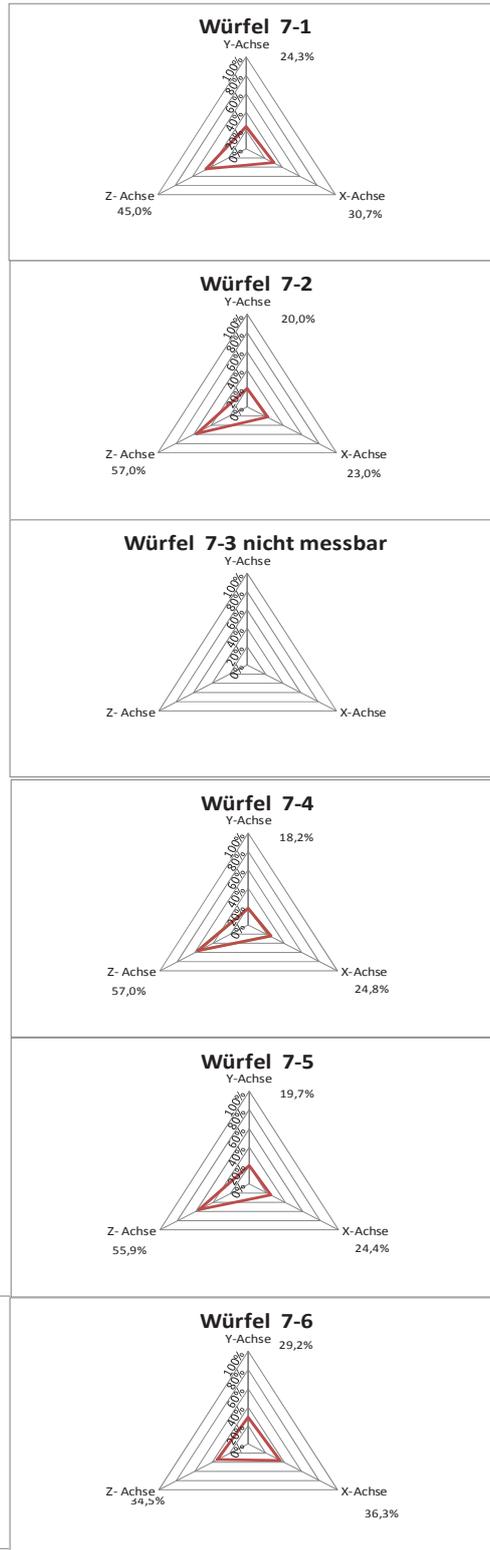
Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³



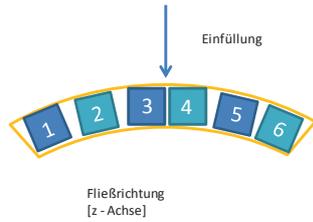
Rezeptur 6

Fließmaß 0

64 cm



Messprotokoll 52 Faserorientierung im Tübbing T2-7



Würfel	8-1
Gemessene Menge	34,2 kg/m ³
berechnete Menge	65,4 kg/m ³
Y-Achse	35,4%
X-Achse	18,2%
Z-Achse	46,4%

Würfel	8-2
Gemessene Menge	33,4 kg/m ³
berechnete Menge	63,8 kg/m ³
Y-Achse	12,8%
X-Achse	24,1%
Z-Achse	63,1%

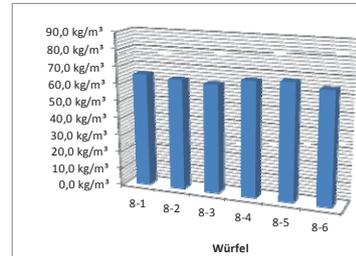
Würfel	8-3
Gemessene Menge	32,8 kg/m ³
berechnete Menge	62,7 kg/m ³
Y-Achse	19,3%
X-Achse	22,4%
Z-Achse	58,3%

Würfel	8-4
Gemessene Menge	34,7 kg/m ³
berechnete Menge	66,3 kg/m ³
Y-Achse	23,2%
X-Achse	26,7%
Z-Achse	50,1%

Würfel	8-5
Gemessene Menge	35,2 kg/m ³
berechnete Menge	67,3 kg/m ³
Y-Achse	21,7%
X-Achse	22,9%
Z-Achse	55,4%

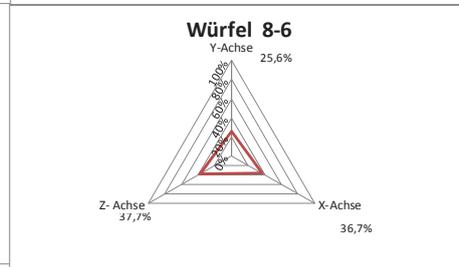
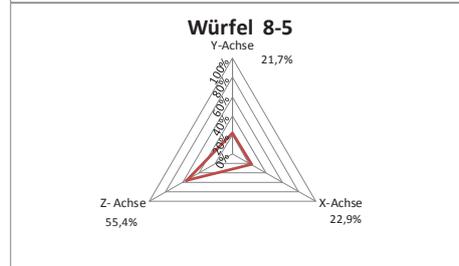
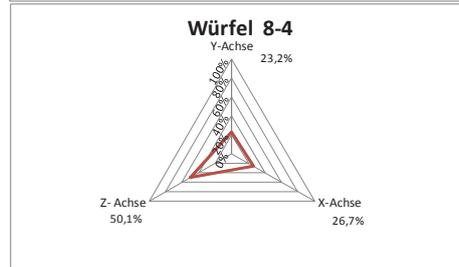
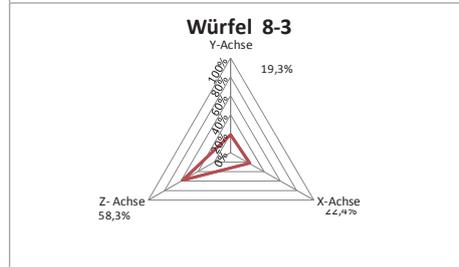
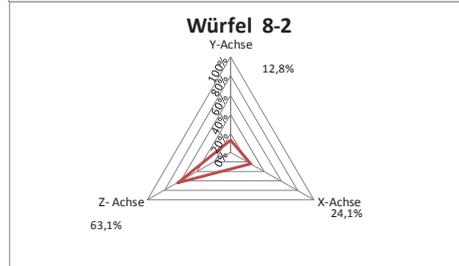
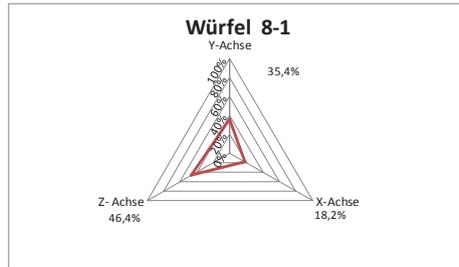
Würfel	8-6
Gemessene Menge	33,8 kg/m ³
berechnete Menge	64,6 kg/m ³
Y-Achse	25,6%
X-Achse	36,7%
Z-Achse	37,7%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³

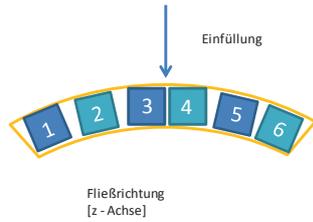


Rezeptur 6

Fließmaß 66 cm



Messprotokoll 53 Faserorientierung im Tübbing T2-8



Würfel	9-1
Gemessene Menge	31,2 kg/m ³
berechnete Menge	58,7 kg/m ³
Y-Achse	36,4%
X-Achse	31,9%
Z-Achse	31,7%

Würfel	9-2
Gemessene Menge	34,6 kg/m ³
berechnete Menge	65,1 kg/m ³
Y-Achse	22,8%
X-Achse	26,3%
Z-Achse	50,9%

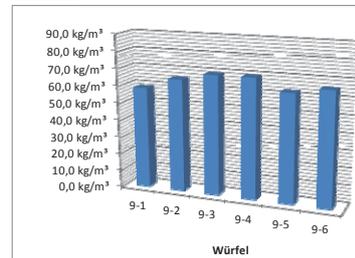
Würfel	9-3
Gemessene Menge	36,7 kg/m ³
berechnete Menge	69,0 kg/m ³
Y-Achse	26,2%
X-Achse	27,8%
Z-Achse	46,0%

Würfel	9-4
Gemessene Menge	36,8 kg/m ³
berechnete Menge	69,2 kg/m ³
Y-Achse	23,8%
X-Achse	30,1%
Z-Achse	46,1%

Würfel	9-5
Gemessene Menge	33,2 kg/m ³
berechnete Menge	62,4 kg/m ³
Y-Achse	19,2%
X-Achse	23,5%
Z-Achse	57,3%

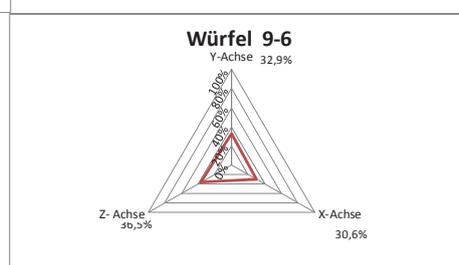
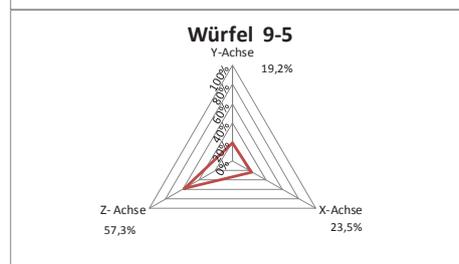
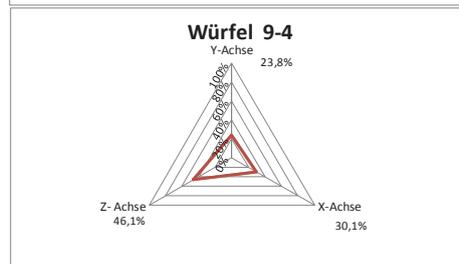
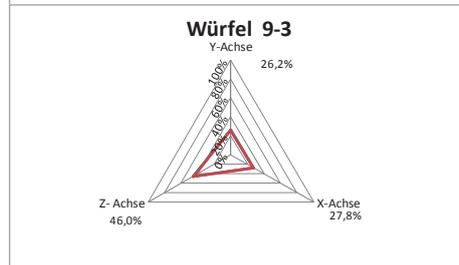
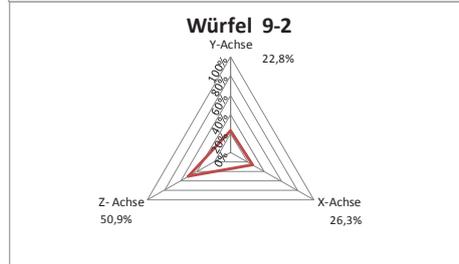
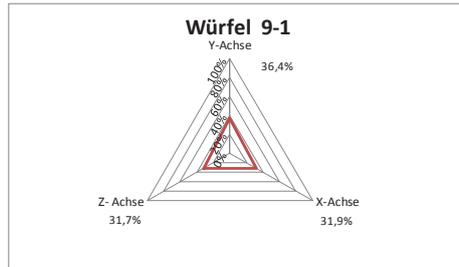
Würfel	9-6
Gemessene Menge	34,9 kg/m ³
berechnete Menge	65,6 kg/m ³
Y-Achse	32,9%
X-Achse	30,6%
Z-Achse	36,5%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³

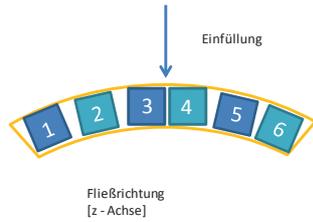


Rezeptur 6

Fließmaß 63 cm



Messprotokoll 54 Faserorientierung im Tübbing T2-9



Würfel	10-1
Gemessene Menge	36,9 kg/m ³
berechnete Menge	66,9 kg/m ³
Y-Achse	31,5%
X-Achse	33,1%
Z-Achse	35,4%

Würfel	10-2
Gemessene Menge	34,6 kg/m ³
berechnete Menge	62,7 kg/m ³
Y-Achse	18,2%
X-Achse	18,2%
Z-Achse	63,6%

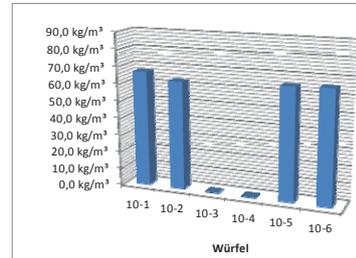
Würfel	10-3	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge		0,0 kg/m ³
Y-Achse		
X-Achse		
Z-Achse		

Würfel	10-4	nicht messbar
Gemessene Menge		
berechnete Menge		0,0 kg/m ³
Y-Achse		
X-Achse		
Z-Achse		

Würfel	10-5
Gemessene Menge	35,8 kg/m ³
berechnete Menge	64,9 kg/m ³
Y-Achse	20,3%
X-Achse	18,0%
Z-Achse	61,7%

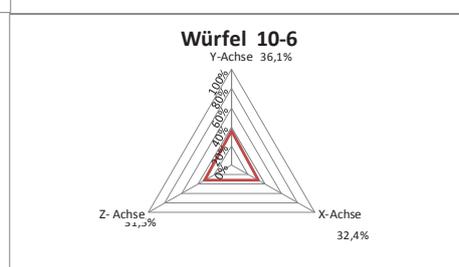
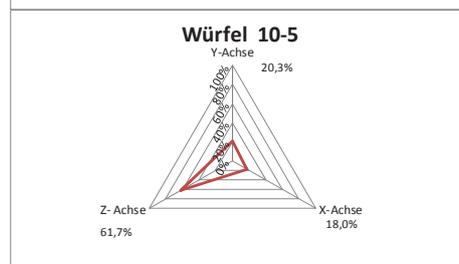
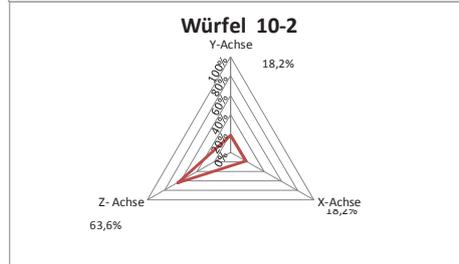
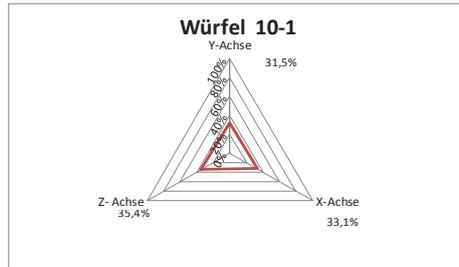
Würfel	10-6
Gemessene Menge	36,2 kg/m ³
berechnete Menge	65,6 kg/m ³
Y-Achse	36,1%
X-Achse	32,4%
Z-Achse	31,5%

Mittlerer Fasergehalt im Bauteil 65,0 kg/m³

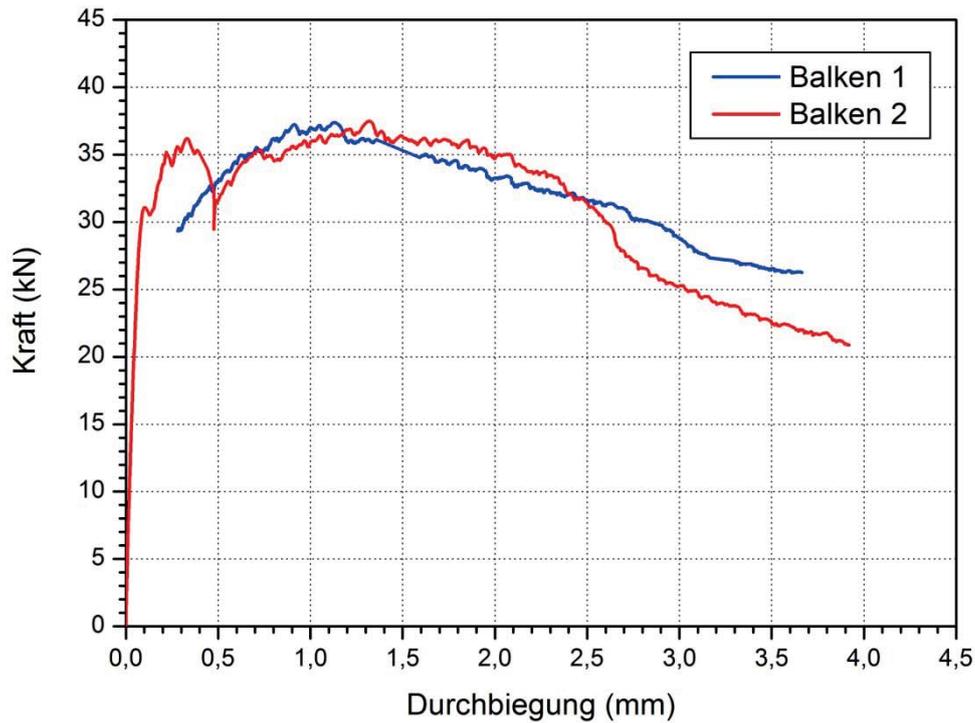


Rezeptur 6

Fließmaß 65 cm

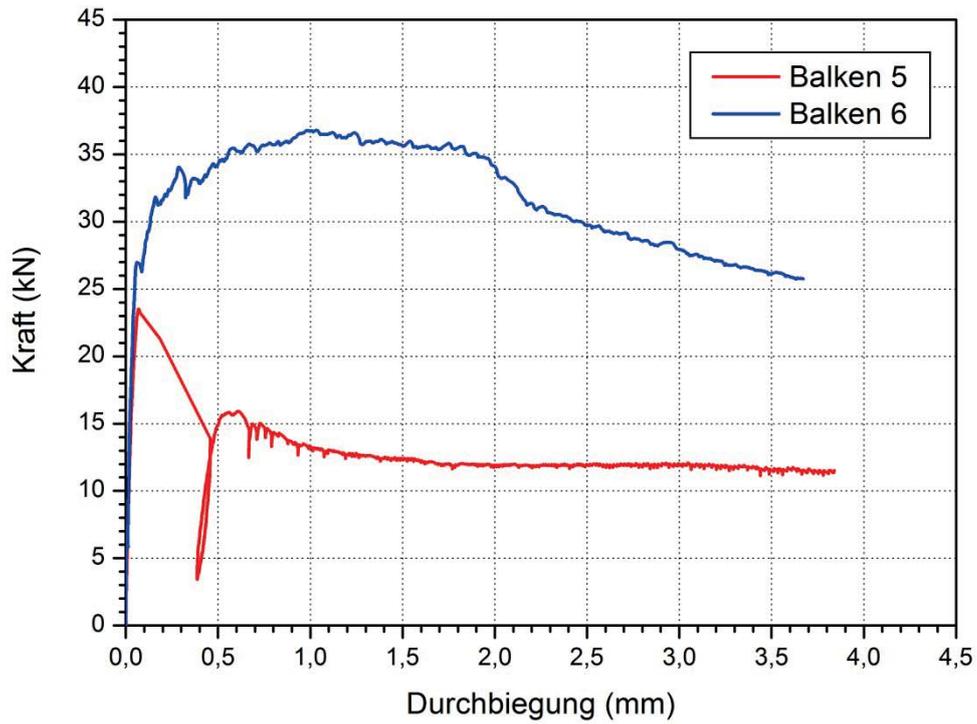


Messprotokoll 55 Faserorientierung im Tübbing T2-10



	$F_{1. \text{ Riss}}$ [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			$F_{0,5 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqms} [N/mm ²]	$A_{0,5-3,0 \text{ mm}}$	$F_{0,5-3,0 \text{ mm}}$ [kN]	f_{eqmu} [N/mm ²]
Balken2	31,1	4,15 BZ 4,5	31,6	4,21 G Sonderklasse	84,1	33,63	4,48 T Sonderklasse
Balken1			33,1	4,41 G Sonderklasse	84,9	33,94	4,53 T Sonderklasse

Messprotokoll 56 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 1-1 und Rezeptur 1-2 (am Rand befüllte Prismen) mit Auswertung des Versuchs nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)



	F _{1. Riss} [kN]	BZ [N/mm ²]	Gebrauchstauglichkeit G		Tragsicherheit T		
			F _{0,5 mm} [kN]	f _{eqms} [N/mm ²]	A _{0,5-3,0 mm}	F _{0,5-3,0 mm} [kN]	f _{eqmu} [N/mm ²]
Balken 5	23,5	3,13 BZ 3,0	14,9	1,99 G 6	31,7	12,67	1,69 T 5
Balken 6	27,0	3,59 BZ 4,5	34,3	4,57 G Sonderklasse	83,7	33,48	4,46 T Sonderklasse

Messprotokoll 57 Kraft-Durchbiegungsdiagramm der Rezeptur 1-1 und Rezeptur 1-2 (über Rampe gefüllte Prismenform) mit Auswertung des Versuchs nach Richtlinie Faserbeton 2008 (ÖVBB)



Messprotokoll 58 Faserorientierung Tübbing Zams I (1/2)

Bohrkern 1-1	
Y-Achse	12,8%
X-Achse	29,1%
Z- Achse	58,1%

Bohrkern 1-2	
Y-Achse	10,7%
X-Achse	31,6%
Z- Achse	57,7%

Bohrkern 1-3	
Y-Achse	17,5%
X-Achse	31,0%
Z- Achse	51,5%

Bohrkern 1-4	
Y-Achse	31,6%
X-Achse	33,0%
Z- Achse	35,4%

Bohrkern 1-5	
Y-Achse	23,7%
X-Achse	35,7%
Z- Achse	46,6%

Bohrkern 1-6	
Y-Achse	22,8%
X-Achse	23,3%
Z- Achse	53,8%

Bohrkern 1-7	
Y-Achse	19,8%
X-Achse	25,8%
Z- Achse	54,5%

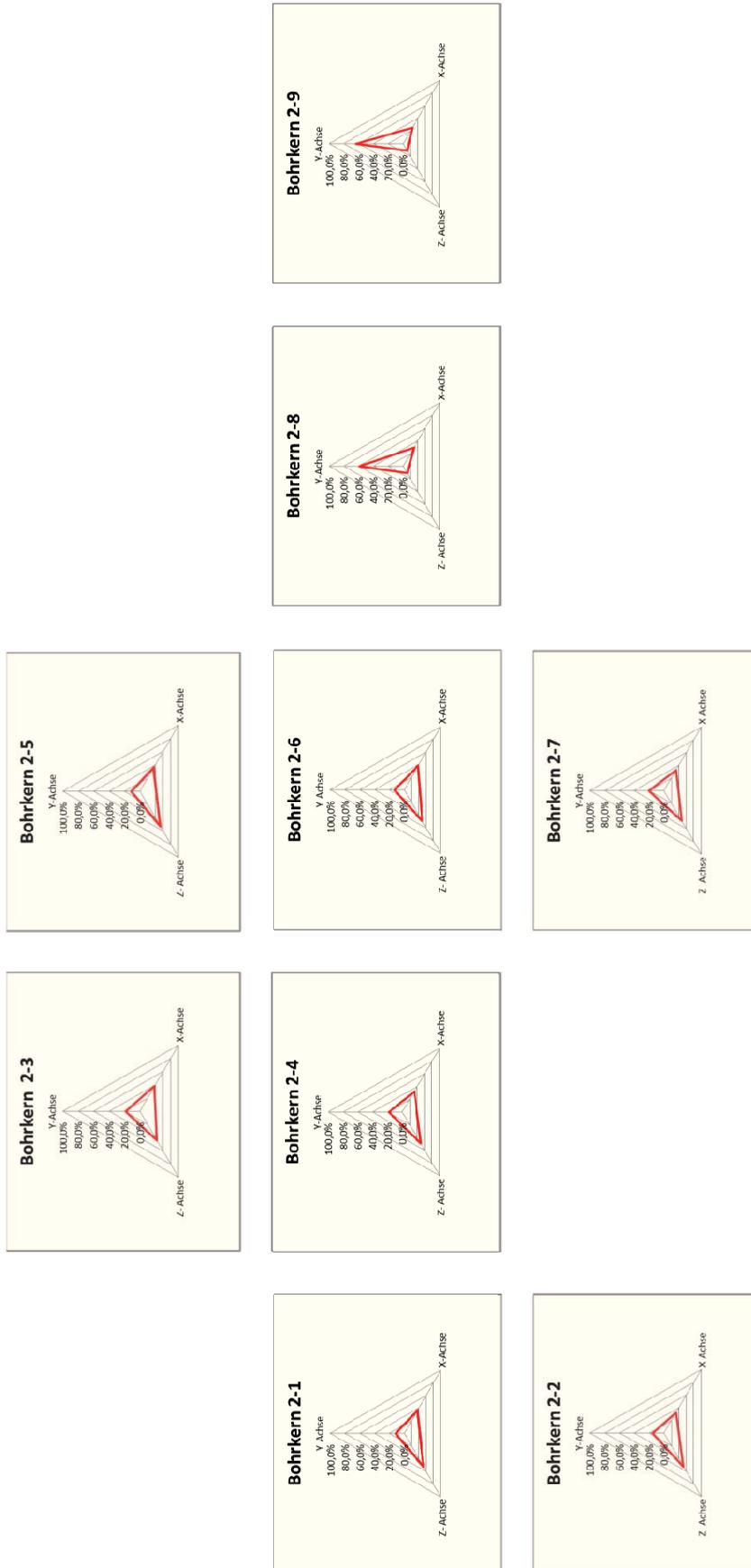
Bohrkern 1-8	
Y-Achse	31,4%
X-Achse	31,3%
Z- Achse	37,3%

Bohrkern 1-9	
Y-Achse	17,5%
X-Achse	27,0%
Z- Achse	55,4%

Bohrkern 1-10	
Y-Achse	66,7%
X-Achse	21,0%
Z- Achse	12,3%

Bohrkern 1-11	
Y-Achse	57,4%
X-Achse	30,0%
Z- Achse	12,6%

Messprotokoll 59 Messprotokoll Tübbing Zams I (2/2)



Messprotokoll 60 Faserorientierung Tübbing Zams II (1/2)

Bohrkern 2-1	
Y-Achse	11,4%
X-Achse	36,3%
Z- Achse	52,4%

Bohrkern 2-2	
Y-Achse	15,1%
X-Achse	32,2%
Z- Achse	52,7%

Bohrkern 2-3	
Y-Achse	18,6%
X-Achse	37,8%
Z- Achse	43,7%

Bohrkern 2-4	
Y-Achse	18,3%
X-Achse	32,4%
Z- Achse	49,3%

Bohrkern 2-5	
Y-Achse	11,4%
X-Achse	34,8%
Z- Achse	53,7%

Bohrkern 2-6	
Y-Achse	12,5%
X-Achse	38,0%
Z- Achse	49,5%

Bohrkern 2-7	
Y-Achse	20,0%
X-Achse	32,5%
Z- Achse	47,5%

Bohrkern 2-8	
Y-Achse	59,5%
X-Achse	29,5%
Z- Achse	11,0%

Bohrkern 2-9	
Y-Achse	63,9%
X-Achse	25,3%
Z- Achse	10,8%

Messprotokoll 61 Faserorientierung Tübbing Zams II (2/2)





